

PUCRS

ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS  
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

CAUANA MELO COPETTI

**AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RESÍDUO DE BORRACHA E  
SÍLICA ATIVA NO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DAS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Porto Alegre

2019

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



**AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RESÍDUO  
DE BORRACHA E SÍLICA ATIVA NO COMPORTAMENTO FÍSICO-  
MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DAS PROPRIEDADES DO  
CONCRETO**

**CAUANA MELO COPETTI**  
ENGENHEIRA CIVIL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**  
**Agosto, 2019**



**AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RESÍDUO  
DE BORRACHA E SÍLICA ATIVA NO COMPORTAMENTO FÍSICO-  
MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DAS PROPRIEDADES DO  
CONCRETO**

**CAUANA MELO COPETTI**

ENGENHEIRA CIVIL

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade

Dissertação de mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Agosto, 2019**

## Ficha Catalográfica

C782a Copetti, Cauana Melo

Avaliação do pré-tratamento superficial de resíduo de borracha e sílica ativa no comportamento físico-mecânico e microestrutural das propriedades do concreto / Cauana Melo Copetti . – 2019.

76 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade.

1. Concreto com borracha. 2. Tratamento superficial. 3. Sílica ativa. 4. Propriedades física-mecânica. 5. Microtomografia de raio X. I. Andrade, Jairo José de Oliveira. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363




**AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL DE  
RESÍDUO DE BORRACHA E SÍLICA ATIVA NO  
COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO E  
MICROESTRUTURAL DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

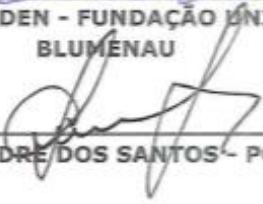
**CANDIDATA: CAUANA MELO COPETTI**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

  
DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - ORIENTADOR

**BANCA EXAMINADORA**

  
DR. ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN - FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DE  
BLUMENAU

  
DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - PGETEMA - PUCRS

"O sucesso nasce do querer, da determinação e da persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."

(José de Alencar)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Tarcísio e Jane, e a minha irmã, Dandara.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Dr. Jairo Andrade, por todas as palavras de apoio que teve comigo, por sua paciência e seu incentivo. O seu exemplo como profissional dedicado é extremamente valioso para o desenvolvimento da minha carreira profissional. Agradeço ao Laboratório Central de Microscopia e Microanálise da PUCRS, pela ajuda com as amostras para as microscopias eletrônicas de varredura. Ao Laboratório de Materiais – LAMAT, em especial ao Douglas e Eduardo. Ao Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais (IPR PUCRS), pela ajuda com a microtomografia. Ao Laboratório de Processos Ambientais (LAPA PUCRS) pela ajuda com o pré-tratamento do resíduo de borracha. Ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS, pela disponibilidade da realização do ensaio DRX de algumas amostras de materiais.

À empresa HOFF, pela doação do resíduo de borracha de pneu, e à empresa Supermix, pela doação da sílica ativa, ambos materiais utilizados nessa pesquisa. Ao meu colega de pesquisa Sérgio Roberto da Silva que prontamente me ajudou em todo período do trabalho. À Pietra Moraes Borges, que foi essencial na finalização do mesmo. Aos professores, funcionários e colegas do PGETEMA, que me auxiliaram de alguma forma durante o período do mestrado. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço então à bolsa concedida para realização do mestrado.



## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>6</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>7</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>10</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
2.1. Objetivos Específicos.....	16
2.2. Delimitação do Trabalho.....	17
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
3.1. Sustentabilidade na Indústria da Construção Civil.....	18
3.2. Emprego de Materiais Sustentáveis na Produção dos Concretos.....	19
3.2.1. Adições Minerais.....	20
3.2.2. Resíduo da Construção Civil (RCC).....	22
3.2.3. Concreto com Resíduo de Borracha de Pneu.....	23
3.3. Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS).....	30
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>62</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO A – SUBMISSÃO DO ARTIGO.....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura1 - Emissão mundial Co <sub>2</sub> .....	19
Figura 2 - Borracha (a) lascada; (b) triturada; (c) em pó.....	24
Figura 3 - MEV borracha (a) como recebida; (b) com tratamento (adaptado Segre e Joeques, 2000).....	26
Figura 4 - Zona interfacial (a) sem sílica ativa; (b) com sílica ativa (adaptado Pelisser et al., 2001).....	28
Figura 5 - Zona interfacial agregado/cimento (adaptado Gupta et al., 2014).....	29
Figura 6 - Ensaio extraídos dos artigos da seleção final.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns artigos com métodos de tratamento com NaOH.....	25
Tabela 2 - Resultados de todas as etapas e a seleção final da revisão bibliográfica sistemática.....	31
Tabela 3 - Alguns artigos com aplicações inovadoras.....	33

## RESUMO

COPETTI, Cauana Melo. **Avaliação do pré-tratamento superficial de resíduo de borracha e o efeito da sílica ativa no comportamento físico-mecânico e microestrutural do concreto.** Porto Alegre. 2019. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O crescente acúmulo de pneus se tornou um problema social e de saúde pública devido a sua degradação ser extremamente demorada e difícil. O uso de borracha no concreto tornou-se então uma alternativa sustentável para auxiliar no descarte desse resíduo sólido, contribuindo de alguma forma para a redução do uso de recursos naturais não renováveis. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o pré-tratamento químico com solução de hidróxido de sódio (NaOH) nas propriedades físico-mecânicas e microestruturais do concreto. A relação água/aglomerante foi fixada de 0,5 para todos traços. A borracha de pneu foi substituída (em volume) por teores 15% e 30% como agregado miúdo natural e a utilização de sílica ativa com teores de 7,5% e 15% para substituir (em peso) o cimento Portland. A significância estatística dos resultados físicos-mecânicos de absorção, porosidade, massa específica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo elástico foram analisadas através da análise de variância (ANOVA) e a microscopia eletrônica de varredura e microtomografia de raio-X para investigar a influência do tratamento e da sílica na microestrutura do concreto. Os resultados mostraram que o uso de borracha na matriz de cimento, independente do tratamento ou não, tenderá sempre a diminuir as propriedades físico-mecânicas. O uso de sílica ativa apresentou ganhos significativos de resistência, cuja influência pôde ser confirmada pela análise microestrutural e pela densificação da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento.

Palavras-Chaves: Concreto com borracha, tratamento superficial, sílica ativa, propriedades física-mecânica, microtomografia de raio X.

## ABSTRACT

COPETTI, Cauana Melo. **Evaluation of tire rubber surface pre-treatment and the effect of silica fume on concrete physical-mechanical and microstructural behavior.** Porto Alegre. 2019. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The increasing accumulation of tire waste has become a social environmental and public health problem because rubber degradation is extremely difficult to achieve and time consuming. The use of rubber in concrete has become an alternative to assist in the disposal of this solid waste. It also contributes to reduce the use of non-renewable natural resources. Therefore, the present work evaluated the effect of a chemical pretreatment with sodium hydroxide solution (NaOH) on the physical, mechanical and microstructural properties of a concrete. The relation of water/binder ratio of 0.5 for all the mixtures. The different rubber residue contents (15% and 30%) as a substitution for natural fine aggregate (for volume) and the addition of silica fume (7.5% and 15%) to replace Portland cement (for weight). The statistical significance of the physical-mechanical results for absorption, porosity, bulk density, compressive strength, tensile strength and modulus elastic were analyzed using the analysis of variance. Scanning electron microscopy and X-ray microtomography were used to investigate the influence of treatment rubber and silica fume in the microstructure of concretes. The results showed that the use of rubber in the cement matrix, regardless of the treatment (or lack thereof), decreases the physical-mechanical properties of the concrete. The rubber pre-treatment did not significantly influence the concrete behavior. In contrast, the use of silica fume showed significant strength gains. These gains were confirmed by the microstructural analysis and the densification of the interfacial transition zone between the aggregates and the cement paste.

*Keywords: Tire rubber concrete, surface treatment, silica fume, physical-mechanical properties, X-Ray microtomography.*

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Santos (2005), o pneu é um dos produtos de maior consumo no mundo e um dos resíduos de mais difícil decomposição na natureza. Quando se tornam inservíveis são colocados em aterros onde podem permanecer por mais de 500 anos. Segundo Brasil (2017), o art. 16 da Resolução Conama nº416/2009 fala sobre a prevenção da degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada. A resolução determina que os fabricantes e importadores de pneus novos devem coletar e dar a destinação final adequada aos pneus inservíveis do território nacional brasileiro, além de ser necessária a implementação de pontos de coleta em municípios com população superior à 100 mil habitantes (BRASIL, 2017).

O relatório de pneus com ano-base 2016 mostra que o total de pneus novos produzidos é de 966.343,70 toneladas. A meta de destinação nacional calculada para 2016, que corresponde à soma das metas individuais para os fabricantes e importadores de pneus novos, é de 510.449,83 toneladas. O saldo de destinação foi de 493.399,13 toneladas, ou seja, correspondente à 96,66% (BRASIL, 2017).

Conforme Monteiro (2001), se for deixado em ambiente aberto, sujeitos à ação das intempéries, os pneus inservíveis acumulam água e acabam servindo de local para a proliferação de mosquitos. Se forem encaminhados para aterros de lixo convencionais podem causar instabilidade do aterro. Se destinados em unidades de incineração, a queima da borracha gera enormes quantidades de material particulado e gases tóxicos, necessitando de um sistema de tratamento dos gases extremamente eficiente e caro.

Visando evitar tal impacto ambiental, o Conselho Nacional do Meio Ambiente na Resolução nº 416/09 cita que, as tecnologias de destinação ambientalmente adequadas são o coprocessamento, a laminação, a granulação e

a pirólise. A mais comumente utilizada é o coprocessamento (60,23%), seguido da granulação (27,15%), da laminação (11,54%) e da pirólise (1,08%) (BRASIL, 2017).

Segundo Santos (2005), dentro da construção civil é possível encontrar algumas formas de reciclagem de resíduos industriais que se consolidaram como materiais para aplicações específicas. Dentre estes materiais, pode-se citar a escória de alto forno, a cinza de casca de arroz e a sílica ativa, que passaram de um resíduo à um material importante na produção de cimento e concretos.

Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos são considerados compostos quando além de sua composição básica de clínquer e sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) é acrescentado materiais como a escória granulada de alto-forno, materiais pozolânicos e/ou materiais carbonáticos. Os tipos variam de acordo com as composições. O CP II-E é composto de 51-94% de clínquer e sulfato de cálcio, 6-34% de escória granulada de alto forno e 0-15% de material carbonático; o CP II-Z é composto de 71-94% de clínquer e sulfato de cálcio, 6-14% de material pozolânico e 0-15% de material carbonático; e o CP II-F é composto de 75-89% de clínquer e sulfato de cálcio e 11-25% de material carbonático.

Dentre as diversas adições minerais comumente empregadas nas composições cimentícias, verifica-se que a sílica ativa é bastante empregada devido ao efeito pozolânico, onde ocorre a interação com o hidróxido de cálcio do cimento produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aumentando assim a resistência favorecendo a durabilidade dos compósitos e também pelo efeito físico *filler*, onde há uma diminuição da permeabilidade pelo preenchimento dos vazios (ROMANO et al., 2008).

Há também várias pesquisas que estudam a utilização de outros resíduos em argamassas e concretos, como os resíduos da construção e demolição (RCD) (PACHECO et al., 2019, XIAO et al., 2018, DA SILVA e ANDRADE, 2017), o resíduo da indústria de mármore e granito (ANDRE et al., 2014, KUMAR et al., 2017, VARDHAN et al., 2019) e as fibras de borrachas de pneu, estas vindas da recapagem (MEDINA et al., 2017, THOMAS et al., 2016, GUO et al., 2017). A recapagem é considerada uma das formas de reciclagem do pneu mais eficazes, pois pode prolongar a vida útil em até três vezes. Mas é através da moagem e comutação durante esse processo que se obtém a borracha moída reciclada (SANTOS, 2005).

Pesquisas sobre o uso de agregados de borracha reciclada como substituto de agregados naturais tradicionais no concreto foram exploradas na última década, à medida que cresce a necessidade de encontrar aplicações úteis para resíduos de borracha e a diminuição da utilização dos recursos naturais não renováveis (DONG et al., 2013; SHU e HUANG, 2014). De uma forma geral tais pesquisas mostram apesar de o concreto com borracha diminuir os valores de resistência há fatores que podem ser melhorados como o isolamento térmico e acústico, a absorção de energia é significativamente melhorada e também pelo fato de a borracha apresentar uma massa específica muito menor do que os agregados convencionais, essa substituição no concreto faz com que, conseqüentemente, haja uma redução na massa específica do concreto com borracha.

Dessa forma, esta pesquisa vem ao encontro da necessidade de contribuir à preservação do meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável, uma vez que estuda a possibilidade da utilização de resíduos de borracha provenientes da recapagem de pneu para produção de um novo concreto com o propósito de investigar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos mesmos. Assim, tentando somar vantagens ao concreto, no que diz respeito ao seu comportamento e aptidão aos fins da engenharia civil.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o pré-tratamento químico realizado nas partículas de borracha de pneu e a utilização da sílica ativa para melhorar a interface aderente entre o resíduo de borracha e a pasta de cimento nas propriedades físico-mecânicas dos concretos.

### 2.1. Objetivos Específicos

Para os objetivos específicos, destacaram-se os seguintes aspectos:

- Análise da influência do pré-tratamento químico com a solução de hidróxido de sódio (NaOH) nas partículas de borracha com diferentes teores de substituições (15% e 30%) do agregado miúdo natural;
- Análise da adição de sílica ativa com diferentes teores (7,5% e 15%) em substituição ao cimento Portland;
- Investigar os resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dos concretos com diferentes teores de borracha e sílica para comparar com o concreto referência;
- Comparar os resultados de absorção, porosidade e massa específica dos concretos com diferentes teores de borracha e sílica para comparar com o concreto referência;
- Verificar a microscopia e microtomografia dos concretos com diferentes teores de borracha e sílica para comparar com o concreto referência;

## 2.2. Delimitação do Trabalho

Em um trabalho desse gênero algumas delimitações se fazem necessárias. Nesta investigação não foram analisadas as seguintes considerações: influência e variação da relação água/cimento e do tipo de cimento.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Sustentabilidade na Indústria da Construção Civil

Sustentabilidade é um termo relativamente antigo, de origem em 1987, que surgiu através de um relatório chamado “Nosso Futuro Comum”, posteriormente conhecido como “Relatório Brundtland”, apresentado à Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) com o intuito de trazer a discurso público o conceito de desenvolvimento sustentável. Este foi definido como, o desenvolvimento que consegue atender todas as necessidades básicas populacionais sem que comprometa as gerações futuras de atender às suas (ONU, 2019).

No que diz respeito às dimensões sustentáveis, sejam elas ambientais, sociais e econômicas, a construção civil destaca-se no quesito econômico por ser responsável por 15% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e oferece uma elevada demanda de empregos à população. Porém, no que diz respeito à questão ambiental, chama-se atenção para os grandes impactos ambientais causados em todas etapas da sua cadeia produtiva (NAGALLI, 2014).

Atualmente é sabido que 50% dos recursos naturais extraídos estão relacionados com a construção civil (KARPINSK, 2009). Em 2010, a produção mundial do cimento foi de 3,3 bilhões de toneladas e destaca-se junto com o concreto em termos de volume de produção. Porém, cerca de 10% das emissões de CO<sub>2</sub> estão relacionadas à fabricação de concreto, sendo que 85% são produzidas durante a fabricação do cimento (MARTIRENA e SCRIVENER, 2015).

Entretanto, as emissões de CO<sub>2</sub> não vem apenas da queima de combustíveis no forno de cimento, mas também da conversão química (calcinação) de carbonato de cálcio para óxido de cálcio (SCHUMACHER E JUNIPER, 2013). Neste processo

de calcinação do calcário durante a produção do clínquer, uma média entre 0,8 e 1 toneladas de CO<sub>2</sub> é liberada por tonelada de cimento fabricado (RADONJANIN et al. 2013).

Conforme IPCC (2019), acredita-se que as atividades humanas tenham ajudado a gerar 1°C de aquecimento global e que provavelmente atinja 1,5°C entre 2030 e 2052. Atingir e manter zero emissões globais de CO<sub>2</sub> através de um programa chamado “*non-CO2 radiative*” interromperia e manteria o aquecimento durante décadas, conforme mostrado na Figura 1.

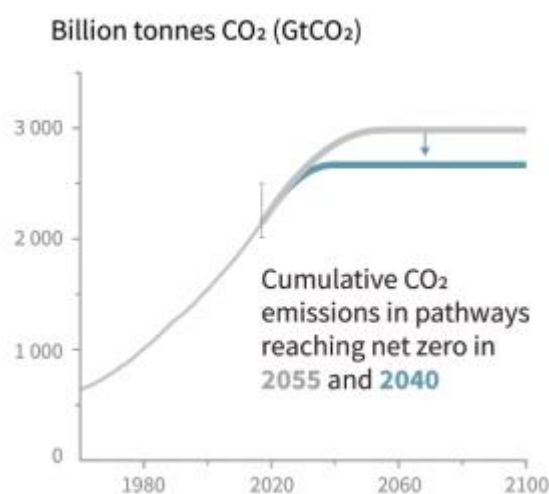


Figura 1 - Emissão mundial CO<sub>2</sub>

Portanto, se faz necessário a utilização de materiais ambientalmente corretos. Surge o interesse pelas mais diversas linhas de pesquisa em tecnologia e inovação de aproveitamento de resíduos industriais como matéria prima no setor da construção civil. Nesse sentido, algumas propostas como a substituição parcial de matérias primas utilizadas no concreto (areia e brita) por resíduos passa a ser uma proposta sustentável como método de redução do impacto ambiental (LOPES et al. 2018).

### 3.2. Emprego de Materiais Sustentáveis na Produção dos Concretos

Alguns materiais já têm destaque na indústria de produção dos cimentos, como é o caso da cinza volante, escória granulada de alto forno, cinza de casca de

arroz e sílica ativa que são usadas para substituir uma parte do clínquer através de adições minerais por razões econômicas e ambientais (AUBERT et al., 2012). A produção de clínquer consome muita energia e gera emissões significativas de CO<sub>2</sub> em comparação com as adições minerais (GARTNER, 2004).

Dessa forma, serão apresentadas as principais adições minerais utilizadas na fabricação de concretos e/ou argamassas, com suas principais potencialidades de utilização.

### 3.2.1. Adições Minerais

As adições minerais podem ser de origem natural como os materiais de origem vulcânica ou artificiais como os subprodutos industriais. Os naturais possuem atividade pozolânica no seu estado natural ou podem ser facilmente transformadas em pozolanas por um processo de calcinação e moagem. Já as artificiais podem ou não necessitar de um tratamento (secagem ou moagem complementar) para que venham a desenvolver atividade pozolânica (FONSECA, 2010).

Devido ao alto impacto ambiental das indústrias cimenteiras, surge o interesse por parte de pesquisadores de fazer o aproveitamento de subprodutos industriais para a fabricação de cimento Portland (SANDOVAL, 2013). Segundo Ishee (2008), já é comumente utilizado subprodutos da produção de ligas de silício metálico ou ferrossilício (sílica ativa), da indústria siderúrgica (escória de alto forno), de usinas termoelétricas (cinza volante) e de subprodutos agrícolas (cinza de casca de arroz). A escória de alto forno, por exemplo, tem sido usada desde a década de 1940 em fábricas de cimento como uma substituição de clínquer ou substituição parcial de cimento Portland (ROY E IDORN, 1982).

As adições minerais também podem ser divididas em três grupos de materiais conforme à sua atividade em uso na produção do concreto, principalmente, em função da sua composição química e mineralógica, tais como: materiais pozolânicos, cimentantes e fíler (SCHUMACHER E JUNIPER, 2013). Estas adições acabam modificando e acelerando o processo de hidratação do

cimento Portland, alterando suas características físicas e o comportamento mecânico (NAGROCKIENÉN et al., 2017).

Segundo Schumacher e Juniper (2013), uma pozolana é descrita como sendo um material silicioso e aluminoso, que por si só possui pouca propriedade cimentícia mas que na presença de umidade, reage através de um processo químico com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos que possuem propriedades de consolidação. De acordo com Andrade e Bujak (2013), as adições são materiais que reagem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido pela hidratação dos silicatos de cálcio para formar o hidrato de silicato de cálcio (C-S-H). Tem como destaque desse grupo cimentante, a escória granulada de alto forno e a cinza de casca de arroz queimada em campo.

Para desenvolver um comportamento de cimentação, os materiais pozolânicos requerem a mistura com uma fonte de hidróxido de cálcio. Isto é normalmente conseguido através da mistura de pozolânicas com cal ou cimento e água, sendo o hidróxido de cálcio um produto de reações com o cimento e a água (SCHUMACHER E JUNIPER, 2013).

A adição de pozolanas, geralmente, se reflete em uma série de benefícios para o concreto. Segundo Malhotra e Mehta (1996), a vantagem técnica do uso de pozolanas no concreto é o aumento da durabilidade e a melhoria de suas propriedades mecânicas. De acordo com Nagrockiené et al (2017), as adições minerais modificam e aceleram o processo de hidratação do cimento Portland, fazendo com que haja a alteração das características físicas e comportamento mecânico.

A sílica ativa tende a atuar de forma física e química. Quando age de forma física ocorre o efeito fíler, onde há um preenchimento de vazios e, assim, ocasionando no acréscimo de coesão e compacidade da pasta e na zona de transição. Já quando age na forma química, ocorre a reação pozolânica (ALMEIDA, 2005). Para Dybel e Furtak (2017), a ação da sílica ativa no concreto é explicado pelo preenchimento da área anteriormente ocupada pela água na zona de transição por partículas de sílica, e esta zona torna-se densificada pela fase C-S-H rapidamente formada de acordo com a redução do  $\text{Ca(OH)}_2$  como resultado da reação pozolânica.

### 3.2.2. Resíduo de Construção Civil (RCC)

Como o próprio nome diz, os resíduos de construção e demolição tem origem de atividades de construção civil, reconstrução e demolição. São misturas de diferentes tipos de materiais, os quais incluem resíduos inertes, resíduos perigosos não inertes e resíduos perigosos (MENEGAKI E DAMIGOS, 2018).

Nas cidades do Brasil, os resíduos de construção e demolição representam de 41 a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos gerados (PINTO, 2005). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018), foi gerado no ano de 2017 um total anual de 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. O valor coletado foi de 71,6 milhões de toneladas, o que resulta num índice de 91,2%, ou seja, 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram coletados e com isso, tiveram destinação inadequada.

Os dados ainda mostram que cerca de 42,3 milhões de toneladas ou 59,1% do coletado foram dispostos em aterros sanitários. O restante (40,9%) foi despejado em locais impróprios, onde não há quaisquer medidas de proteção do meio ambiente e à saúde pública. De acordo com Menegaki e Damigos (2018), estima-se que 35% da quantidade de resíduo de construção e demolição gerados globalmente são direcionados sem qualquer tipo de tratamento para aterros sanitários.

Para Nagalli (2014), na capital do Paraná 48% dos resíduos sólidos gerados são provenientes da construção civil. Segundo a Abrelpe (2017), os municípios brasileiros coletaram em 2017 aproximadamente 123.421 ton/dia de resíduos de construção e demolição, totalizando 45.048 ton/ano. Em 2016 os valores tinham sido de 123.619 ton/dia, resultando em 45.120 ton/ano. Ou seja, houve uma diminuição de 0,1% em relação aos últimos anos na coleta.

Entretanto, pode-se destacar como a região que mais coletou resíduo de construção e demolição a sudeste com 64.063 ton/dia, seguida da região nordeste com 24.585 ton/dia, região sul com 16.472 t/dia, centro-oeste com 13.574 ton/dia e norte com 4.727 ton/dia (ABRELPE, 2017).

Para Brasileiro et al. (2015), o RCC poderia servir de matéria-prima de agregados de alta qualidade e que poderiam ser utilizados em diferentes processos construtivos. Geralmente esses resíduos de construção e demolição são compostos por argamassas, tijolos, alvenaria, concreto e cerâmica (DURAN et al., 2006).

Conforme Brasileiro et al. (2015), na Europa teve início no final dos anos de 1980 as políticas públicas para destinação adequada dos resíduos gerados pela construção civil, enquanto que no Brasil somente a partir de 2002 passou a vigorar uma Resolução de nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qual passa a estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão desses resíduos. Em seguida, no ano de 2010, surge no Brasil a Lei nº 12.305 da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, a qual define a forma com que deve ser disposto os resíduos, passando a incentivar a reciclagem e a sustentabilidade. Nela, todos os agentes envolvidos são responsáveis, desde a produção, a distribuição, venda e consumo (BRASIL, 2012).

### **3.2.3. Concreto com Resíduo de Borracha de Pneu**

A eliminação do resíduo de borracha tornou-se uma questão importante sob o ponto de vista ambiental em todas as partes do mundo. Países desenvolvidos como a Austrália, o Canadá e a Nova Zelândia, estão tentando utilizar a borracha de pneu descartada em concretos através da substituição dos agregados naturais. Essa aplicação seria uma possível solução sustentável para esse resíduo.

Thomas et al. (2015) explicam que existem quatro diferentes formas de classificação da borracha de pneu para utilização: a borracha lascada, a triturada, a moída e a em pó. O diâmetro da borracha lascada varia em torno de 430 mm à 100 mm (Figura 2) e a triturada de 76 mm à 13 mm (Figura 3). Para borracha moída o valor correspondente ao diâmetro é de 4,75 mm à 0,425 mm. E para a borracha em pó (Figura 4) as partículas são de aproximadamente 0,425 mm à 0,075 mm e passam por separação magnética e triagem.



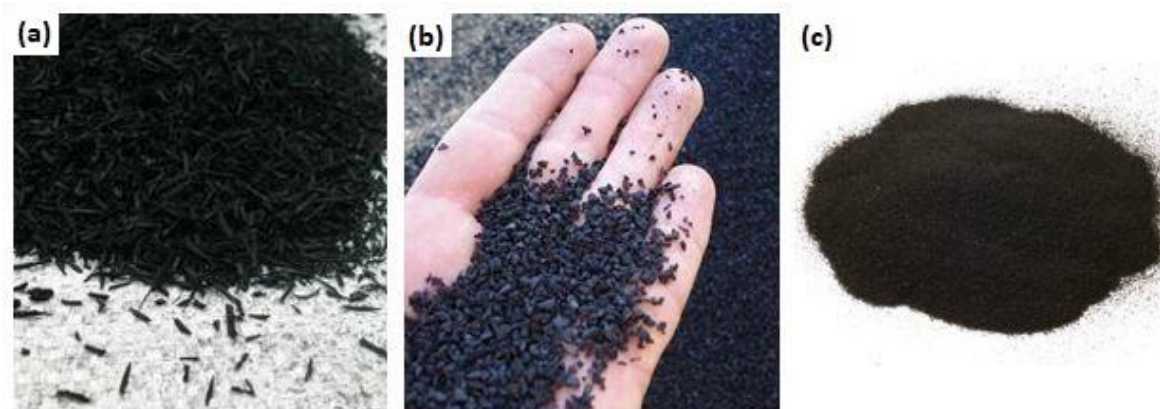


Figura 2. Borracha (a) lascada; (b) triturada; (c) em pó.

Segundo Guo et al. (2017), a borracha como agregado em concreto foi proposta pela primeira vez por Eldin e Senoduci (1993), quando resolveram incorporar resíduo de pneu no traço de concreto com uma porcentagem variável de borracha moída de pneus e borracha lascada como substituição de agregados miúdos e agregados graúdos, respectivamente. Os resultados mostraram que a substituição de agregados graúdos obteve piores valores de resistência à compressão (85% de redução) do que a substituição de agregados miúdos (65% de redução).

Desde então, passou-se a observar o grande número de pesquisas sendo realizadas em função do desempenho de concretos com a substituição de agregados miúdos por resíduos de borracha (PELISSER et al., 2011; ONUAGULUCHI E PANESAR, 2014; SI et al., 2017). O maior problema relacionado à utilização desse material nos concretos, independentemente do tamanho das partículas, é a perda de resistência mecânica. Essa redução sempre tende ao crescimento com o acréscimo dos teores de substituições do resíduo (RASHAD, 2016; GUPTA et al., 2014). A principal causa da redução da resistência principalmente à compressão, segundo Tiwari et al. (2016), se dá pelo fato da partícula de borracha possuir maior tenacidade que as partículas dos agregados naturais e também por possuir uma superfície lisa, a qual dificulta a ligação da pasta de cimento e das partículas de borracha.

Para Guo et al. (2017), essa fraca ligação também é a principal razão para a redução do desempenho mecânico, por que tem mais porosidade na zona de transição e por possuir cristais de hidróxido de cálcio. Segundo Shu et al. (2004),

a ligação entre a borracha e o cimento hidratado é fraca devido à natureza hidrofóbica da borracha o que resulta na redução significativa da resistência à compressão e à tração do concreto com borracha.

Para melhorar essa ligação do agregado de borracha e pasta de cimento, foram sendo desenvolvidos pesquisas com métodos de tratamento superficial dos agregados antes da sua utilização no concreto. Dentre as técnicas encontradas para o tratamento desses resíduos há a simples lavagem com água (H<sub>2</sub>O) realizada por Aslani et al. (2018) e a exposição aos raios UV (Ossola e Wojcik, 2014). Porém, a técnica vista que tem sido mais utilizada é a com soluções básicas de hidróxido de sódio (NaOH) realizadas por autores como Kanshani et al. (2017); Si et al. (2017); Guo et al. (2017); Youssf (2016); Elchalakani (2015); Pelisser et al. (2011). Para melhor entendimento, os métodos foram descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Alguns artigos com métodos de tratamento com NaOH

Autor	Método tratamento com NaOH
Kashani et al. (2017)	Para o tratamento com NaOH, os resíduos de borracha de pneu foram embebidos numa solução aquosa de NaOH a 20% por 30 minutos antes de serem removidos por filtração, lavados com água, secos e adicionados à mistura de cimento seco.
Si et al. (2017)	Os resíduos de borracha foram primeiro embebidos em solução de NaOH 1M durante 40 min. Depois, foram lavados com água da torneira por várias vezes até o pH da água de lavagem estar próximo do neutro. Por fim, foram secos ao ar à temperatura ambiente.
Guo et al. (2017)	Os resíduos de borracha recebidos foram primeiro embebidos com solução de NaOH 1M e lavadas durante 40 min. Em seguida, foram retirados e lavados novamente com água limpa até que o valor de PH da água de lavagem atingisse 7. Então as amostras foram secas ao ar à temperatura ambiente.
Youssf et al. (2016)	Os resíduos foram pré-tratados com solução de NaOH com concentração de 10%, utilizando diferentes períodos de tratamento de meia hora, uma hora e duas horas. Os resultados mostraram que meia hora é o suficiente.
Elchalakani (2015)	Os resíduos de borracha em pó e migalhas foram imersos em uma solução de NaOH por aproximadamente 1 hora. A composição química e concentração da solução de hidróxido de sódio foi de 0,3M.

Pelisser et al. (2011)

O resíduo de borracha foi lavado com hidróxido de sódio NaOH à 1M para aumentar a hidrofiliabilidade da superfície da partícula de borracha.

Segre e Joeques (2000) propuseram testar a utilização de hidróxido de sódio (NaOH) como pré-tratamento do resíduo de borracha antes da sua utilização no concreto. A análise microscópica foi com um concreto com borracha como recebida (figura 5) e um concreto com o tratamento de superfície de NaOH (figura 6) e tem como resultado um aumento na adesão borracha-matriz após o tratamento.

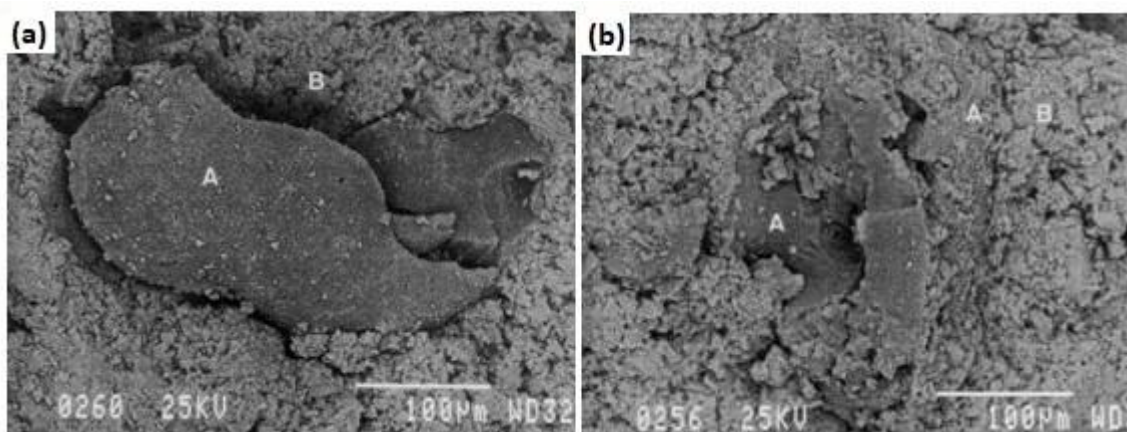


Figura 3. MEV borracha (a) como recebida; (b) com tratamento (adaptado por Segre e Joeques, 2000).

Youssf et al. (2016) realizaram uma pesquisa voltada para o período ideal de tratamento das partículas, com variações de 0h, 0,5h, 1h e 2h. Os autores concluíram que 0,5h de tratamento com a NaOH foi suficiente para melhorar o desempenho de concreto com borracha, uma vez que os demais períodos não tiveram grandes variações de resultados.

O tempo de tratamento observado por autores como Kashani et al. (2017), Youssf et al. (2016), Guo et al. (2017) e Si et al. (2017), que realizaram esse método é variado entre 30 a 40 minutos. A concentração apresentada por eles se dá em variações de 10% e 20% do valor da solução ou então de 1N, respectivamente.

Outra característica física que melhorou com a utilização do tratamento foi a absorção de água. Conforme observado por Si et al. (2017), essa absorção de água foi ainda diminuída nas amostras com borracha tratada quando comparada

com as amostras contendo partículas de borracha como recebidas. Isso também indica menos porosidade, bem como uma melhor aderência borracha-cimento da borracha tratada com NaOH do que a da borracha não tratada.

O tratamento utilizado por Segre et al. (2002), nos resíduos de borracha foi com solução básica de NaOH, pois acreditavam que a solução teria capacidade de remover o estearato de zinco da superfície de borracha aumentando então, a homogeneidade da superfície do mesmo. Este aditivo seria responsável pelas poucas características de adesão da partícula.

Porém para Wang (2017) todos estes fatos são controversos. Em suas análises microscópicas foi relatado uma grande zona de transição entre os agregados de resíduo e a matriz de cimento mesmo quando há o tratamento das partículas. Li et al. (2002), mostraram que a ruptura dos concretos convencionais começava a partir da camada da pasta de cimento próxima aos agregados. Esse fato pode ser observado pelo autor através de análises microscópicas, onde a zona de transição apresentava grande quantidade de cristais em forma de agulha (etringita) e por isso causava o estresse na região.

Para ajudar num possível preenchimento da zona de transição interfacial nesse tipo de concreto se faz necessário a utilização de materiais complementares, como a sílica ativa e a cinza volante, pelo fato delas possuírem características pozolânicas (ONUAGULUCHI E PANESAR, 2014). Segundo Gupta et al. (2015), em temperaturas normais e na presença de umidade, a sílica ativa é mais reativa que a cinza volante em menores idades. Para Neville (1998), a sílica ativa reage com os cristais de hidróxido de cálcio da zona de transição e produz o gel de CSH durante a reação pozolânica, servindo como preenchimento nos poros capilares da zona de transição do concreto.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos empregando-se a sílica ativa em conjunto com a borracha em concretos. Pelisser et al. (2011), realizaram um trabalho com a substituição de apenas um teor (10%) de agregado miúdo por borracha de pneu reciclado e com adição de 15% sílica ativa. Os traços foram com borracha convencional, borracha modificada com ativação alcalina como modificador de superfície. As Figuras 7 e 8 mostram as análises microscópicas realizadas, nas quais percebe-se que a presença de sílica ativa na interface borracha/cimento levou a uma melhor adesão e redução dos pontos fracos.

Neste caso, a combinação do tratamento com borracha com hidróxido de sódio, seguida da adição de sílica ativa, favoreceu a redução da porosidade na interface destes agregados, contribuindo para a recuperação da resistência do concreto e uma menor permeabilidade (PELISSER et al., 2011).

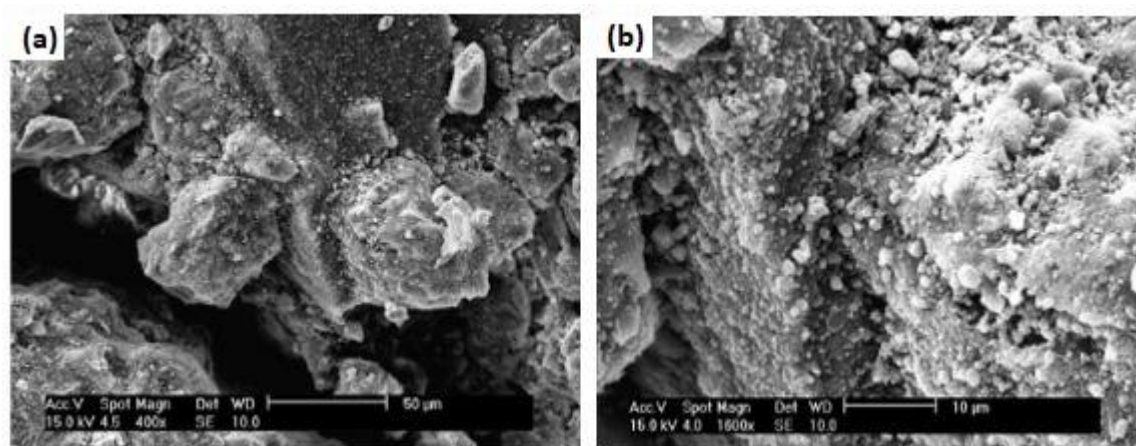


Figura 4. Zona interfacial (a) sem sílica ativa; (b) com sílica ativa (adaptado por Pelisser et al., 2001).

Já pesquisadores como Gupta et al. (2014) avaliaram um concreto com substituição do cimento por 10% de cinza volante e substituição de 25% de resíduo de borracha em formato de fibras pelo agregado miúdo natural. Neste caso os autores puderam observar através de análises microscópicas que ainda havia uma separação entre as partículas de borracha e a matriz de cimento. Isso indicaria que a ligação interfacial é tão fraca que ainda assim ocorre a fissura na interface, ocasionando a redução da resistência do concreto com o resíduo de borracha.



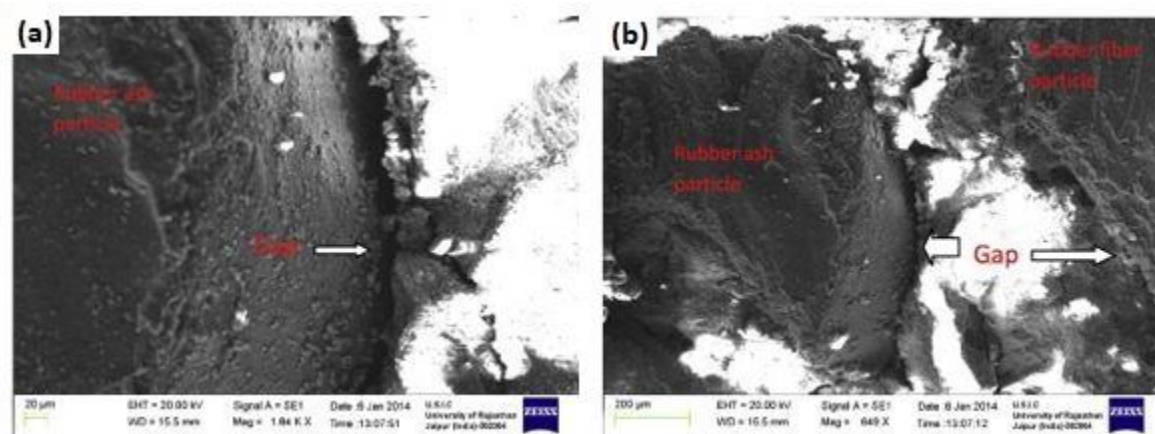


Figura 5. Zona interfacial agregado/cimento (adaptado por Gupta et al., 2014).

Para o módulo de elasticidade testado por Gupta et al. (2014), foi relatado uma redução, tanto no módulo de elasticidade estático quanto no dinâmico, indicando uma maior deformabilidade do material. Esse fato é explicado pelo resíduo de borracha possuir uma menor rigidez que o agregado mineral atuando então como grandes poros e assim, não contribuem significativamente para a resistência e por isso o módulo de elasticidade do concreto diminui com o aumento desse conteúdo.

Já Guneyisi et al. (2004) testaram substituições parciais dos agregados naturais por borracha fragmentada e em cavacos com teores até 50% e substituição parcial de cimento por sílica ativa com teores de até 20%. Os resultados mostraram uma grande diminuição dos valores de resistência e módulo com o aumento do teor de borracha. Porém, a utilização da sílica ativa, mesmo quando feita em substituição do cimento, mostrou melhora nas propriedades mecânicas e diminuiu a taxa de perda de resistência. Os resultados também mostraram que um teor de borracha de até 25% do volume total de agregados pode ser usado para produzir concretos emborrachados com resistência à compressão entre 16 e 32 MPa.

Gupta et al. (2015), já fez a substituição parcial de agregado fino por fibras de borracha (0 até 25%) e de sílica ativa (0 até 10%) como substituição parcial do cimento testando o efeito da substituição de agregados miúdos por resíduos de borracha. Os resultados mostraram que a borracha pode ser utilizada assim como a sílica, pois elas melhoram a resistência ao impacto e aumentam a ductilidade desse concreto, respectivamente.

Pode-se observar que os métodos propostos por Guneyisi et al. (2004) e Gupta et al. (2015) quanto as substituições dos concretos tanto do agregado miúdo quanto do cimento pelo resíduo de borracha e materiais complementares, respectivamente, obtiveram resultados positivos. Entretanto, percebe-se a não realização de um método de pré-tratamento do resíduo de borracha, método abordado por pesquisadores como Kashani et al. (2017), Si et al. (2017) e Elchalakani (2015) e que obtiveram eficiência, poderiam ser utilizados em conjuntos com as substituições de agregado e cimento para contribuir com a perda de resistência.

### 3.3. Revisão bibliográfica sistemática (RBS)

A revisão bibliográfica sistemática baseia-se em uma pesquisa realizada através de literaturas publicadas para coletar, conhecer, analisar e avaliar as mesmas com o objetivo de criar um embasamento teórico-científico sobre um determinado tema de interesse (Levy e Ellis, 2006).

Conforme Sampaio e Mancini (2007), esta pesquisa nada mais é do que um estudo retrospectivo e secundário, portanto, ela depende da qualidade da fonte primária.

A RBS foi desenvolvida através do acesso remoto da PUCRS pelas seguintes base de dados online, sendo elas:

*Science Direct* – é a plataforma principal de “Elsevier” de literatura acadêmica revisada por pares. Também é conhecido por possuir sofisticadas ferramentas de busca que facilitam a descoberta de artigos de revistas e capítulos de livros mais relevantes (*SCIENCE DIRECT*, 2017).

*Scopus* – oferece a mais ampla visão geral de informações científicas interdisciplinares globais. O conteúdo vem de mais de 5.000 editores e deve ser revisado e selecionado por um conselho de seleção e consulta de conteúdo independente para continuar sendo indexado (*SCOPUS*, 2017).

Periódico Capes – disponibiliza para os pesquisadores brasileiros as melhores produções científicas internacionais, contando com mais de 45 mil títulos com texto completo (CAPES, 2018).

A utilização de palavras-chaves na língua inglês se fez para obtenção de publicações de origem em outros países. A primeira palavra utilizada foi “*Concrete with tire rubber*”, em seguida “*Concrete with treated tire rubber*” e por fim “*Concrete with treated tire rubber and mineral additions*”.

O período levado em consideração para a pesquisa bibliográfica foi fixado de 2011 até 2018. A fim de armazenar e gerenciar todos os artigos científicos coletados com maior qualidade e rapidez utilizou-se o software *Mendeley Desktop*. Desta forma, com as publicações encontradas e catalogadas pela fonte de busca no software, a seleção final teve como base analisar o título, resumo e resultados. O principal critério definiu-se através da temática do uso de resíduos de pneu em concretos e argamassas.

Tabela 2 - Resultados de todas as etapas e a seleção final da revisão bibliográfica sistemática

Base de dados	<i>Concrete with tire rubber</i>	<i>Concrete with treated tire rubber</i>	<i>Concrete with treated tire rubbers and mineral additions</i>	Seleção final
<i>Science Direct</i>	1703	721	358	87
<i>Scopus</i>	457	25	25	0
Periódico Capes	2351	590	4	0
Total	4511	1336	387	87

A partir da tabela 2 pode-se perceber o expressivo número de pesquisas com a utilização de *concrete with tire rubber*, com um total de 4.511 publicações encontradas. Analisando-se as publicações com *concrete with treated tire rubber*, percebeu-se um número inferior, porém significativo. Fatores como a não realização de algum tipo de tratamento no resíduo, podem ser considerados para esse contexto. Por fim, *concrete with treated tire rubbers and mineral additions*, onde obteve-se um menor número de pesquisas realizadas, quando comparado com os demais. Portanto, os artigos selecionados nas bases de dados para uma seleção final resultaram em 87 artigos, pois levou-se em conta a repetição dos mesmos nas fontes de busca para um critério de exclusão.

Destes 87 artigos encontrados, 6 eram artigos de revisão e 81 eram de pesquisa experimental. Para esses artigos de pesquisa, 72 eram de concretos e apenas 9 de argamassas. Para os artigos de concreto analisados, a utilização do resíduo quanto à substituição se deu na grande maioria, em 68 artigos, e apenas



em 4 artigos era de adição do resíduo. Quanto à classificação do agregado substituído, o destaque foi para substituição do agregado miúdo, realizado em 63 artigos. A substituição do agregado miúdo é realizada tanto pela relação em peso quanto pelo volume do material. Nesta revisão pode-se perceber que prevaleceu a substituição pelo volume, principalmente nos teores de 5, 10, 15, 20, 15 e 30%.

A utilização do resíduo de borracha como recebido é realizada em quase todos os artigos. Porém, tem aparecido nos artigos mais atuais a utilização de algum método de tratamento para melhorar a ligação do resíduo com a pasta de cimento. Para isso, métodos com hidróxido de sódio, a simples lavagem com água e até mesmo a exposição à luz solar pode ser realizada e foi encontrada. Contudo, o destaque vai para o tratamento com hidróxido de sódio.

Para melhorar a porosidade na zona de transição observada através da microscopia eletrônica de varredura realizada em grande parte do número de artigos analisados, foi possível observar a utilização de adições minerais como a cinza volante, a sílica ativa e o metacaulim. A utilização da sílica ativa tem destaque e vem sendo feita através de sua adição ou pela substituição de parte do cimento em relação ao seu peso. A revisão mostrou que teores baixos até 6% são testados para adição do material e como substituição eles tem destaque, variando com teores de 5, 10 e até 15%.

Os ensaios realizados nos artigos de pesquisa foram descritos e quantificados, conforme mostrado na figura 11. Observa-se que o ensaio de resistência à compressão foi realizado por quase todos os trabalhos, seguido do ensaio de resistência à tração por flexão. A microscopia eletrônica de varredura para observação da zona de ligação. O ensaio do módulo de elasticidade, absorção, trabalhabilidade, porosidade, difração de raio X, são ideais para o entendimento do comportamento do resíduo no concreto.

Figura 6 - Ensaios extraídos dos artigos da seleção final



Após toda essa revisão realizada, foi possível observar que um número significativa de artigos que mostravam-se em desacordo do conteúdo proposto, pelo fato de as aplicações de resíduos de pneu serem feitas para outras finalidades, como aplicação em concretos para pavimentos e concretos para elementos estruturais, ou então, utilizarem além da borracha, os arames provindos da recapagem dessa borracha de pneu. Em função disso, foi realizada uma nova seleção destes artigos de pesquisa, levando em consideração apenas os que tratavam de concretos com resíduos de borracha de pneu, com tratamento ou sem, com utilização de sílica ou não. A tabela 3 apresenta os artigos separados como principais nessa seleção final.

Tabela 3 - Alguns artigos com aplicações inovadoras

Artigo	Resumo	Autor
<i>A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete</i>	Substituição de 0% 10% 20% de borracha em peso (sem tratamento com NaOH) e 30% em peso (sem tratamento com NaOH)	Kashani et al. (2017)
<i>Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles</i>	Substituição em volume do agregado fino em 15% de borracha recebida e diferentes teores de borracha tratada com NaOH (15%, 25%, 35% e 50%)	Si et al. (2017)
		Thomas et al. (2016)

<i>Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber</i>	Determinar a viabilidade do uso de resíduos de borracha de pneu na produção de concreto de alta resistência e os efeitos resultantes em suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade	
<i>Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete</i>	As variáveis deste estudo foram o período de pré-tratamento das partículas de borracha utilizando solução de NaOH a 10% durante 0,0 h, 0,5 h, 1,0 h e 2,0 h; o teor de SF como substituição parcial do peso do cimento em 0%, 5%, 10% e 15%; e o teor de cimento de concreto de 300 kg / m <sup>3</sup> , 350 kg / m <sup>3</sup> e 400 kg / m <sup>3</sup>	Youssf et al. (2016)
<i>Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume</i>	Substituição parcial de agregado fino por fibras de borracha (0, 5, 10, 15, 20 e 25%) e de sílica ativa (0, 5 e 10%) como substituição parcial do cimento.	Gupta et al. (2016)
<i>Assessment of mechanical and durability properties of concrete</i>	As cinzas de borracha (0% a 20% com incremento de 5%) e fibras de borracha (0% a 25% com incremento de 5%) nas misturas foram usadas como substituição parcial de agregados finos.	Gupta et al. (2014)
<i>Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition</i>	Substituição de 10% de agregado de areia por borracha de pneu reciclado utilizando borracha convencional e borracha modificada com ativação alcalina e adição de 15% sílica ativa como modificador de superfície	Pelisser et al. (2011)
<i>Properties of rubberized concretes containing silica fume</i>	Substituição do agregado fino e grosso por borracha de pneu 2,5; 5, 10, 15, 25, 50% e substituição do cimento por 5, 10, 15, 20% sílica	Guneyisi et al. (2004)

Ao analisar o método utilizado pelos autores que realizaram o tratamento com hidróxido de sódio, percebe-se a variação no tempo de 30 à 45 minutos e concentrações que variam de 1M ou então de 10% à 20% em solução aquosa. Em todos os métodos é realizado o processo de lavagem com água da partícula após o tratamento com hidróxido de sódio. Segundo Youssf et al. (2017), a lavagem final

é essencial para remover qualquer solução de NaOH restante para evitar qualquer efeito negativo na durabilidade do concreto.

Ao final desta revisão bibliográfica sistemática, foi possível esclarecer algumas dúvidas que se tinham a respeito do desenvolvimento deste tipo de pesquisa. Ficou claro que os estudos de concretos com borracha estão crescendo com o passar dos anos e também que estão sendo realizadas técnicas diferenciadas para contribuir com a utilização deste resíduo, neste caso destaca-se o tratamento da partícula em solução de hidróxido de sódio. O período para o tratamento mais utilizado é o de 30 minutos com uma concentração de 1M.

Também foi observado que o caminho para a utilização desse resíduo de borracha deve ser feito através da substituição dos agregados miúdos naturais, com teores que não ultrapassem dos 30%. Assim, ainda é possível obter um bom resultado das resistências mecânicas e de durabilidade desse concreto.

A utilização de materiais complementares como a sílica ativa se faz interessante, uma vez que ela contribui para o preenchimento dos poros na zona de transição. Para um melhor entendimento, a realização da microscopia eletrônica de varredura se faz importante e já é bastante utilizada.

#### 4. **MATERIAIS E MÉTODOS**

O procedimento experimental desse estudo, os resultados e a discussão estão apresentados neste capítulo como forma de artigo submetido na revista *Journal of Cleaner Production*, conforme anexo A.

## **EVALUATION OF TIRE RUBBER SURFACE PRE-TREATMENT AND SILICA FUME ON PHYSICAL-MECHANICAL BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF CONCRETE**

Cauana Melo Copetti (1); Pietra Moraes Borges (2); Sérgio Roberto da Silva (3); Jairo José de Oliveira Andrade (4)

- (1) *Civil Engineer, M.Sc candidate, Graduation Program in Materials Engineering and Technology, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil (PGETEMA/PUCRS), Brazil. e-mail: cauana.copetti@acad.pucrs.br*
- (2) *Undergraduate student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil (PUCRS), Brazil. e-mail: pietra.borges@acad.pucrs.br*
- (3) *Civil Engineer, D.Sc. candidate, Graduation Program in Materials Engineering and Technology, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil (PGETEMA/PUCRS). Brazil. e-mail: sergio.roberto@acad.pucrs.br*
- (4) *Graduation Program in Materials Engineering and Technology, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PGETEMA/PUCRS), Brazil. e-mail: jairo.andrade@pucrs.br*

*PUCRS – Av. Ipiranga, 6681, Building, 30, Office 228. Porto Alegre – RS, 90619-900. Brazil*

### **HIGHLIGHTS**

1. Three content levels of fine aggregate substituted by rubber residue with three levels of additional silica fume were analyzed.
2. The results were analyzed using the analysis of variance (ANOVA).
3. Increased rubber residue content reduced the physical-mechanical properties of concrete.
4. The addition of silica fume improved the properties of the concrete with rubber residue.
5. Scanning electron microscopy and X-ray microtomography were used to investigate the microstructure of the concretes.

### **ABSTRACT**

The increasing accumulation of tire waste has become a social environmental and public health problem because rubber degradation is extremely difficult to achieve and time consuming. The use of rubber in concrete has become an alternative to assist in the disposal of this solid waste. It also contributes to reduce the use of non-renewable natural resources. Therefore, the present work evaluated the effect of a chemical pretreatment with sodium hydroxide solution (NaOH) on the physical, mechanical, and microstructural properties of a concrete with a water/binder ratio of 0.5 and different rubber residue contents (15% and 30%) as a substitution for natural fine aggregate, and the addition of silica fume (7.5% and 15%) to replace Portland cement. The statistical significance of the results were analyzed using the analysis of variance. Scanning electron microscopy and X-ray microtomography were used to investigate the influence of treatment rubber and silica fume in the microstructure of concretes. The results showed that the use of rubber in the cement matrix, regardless of the treatment (or lack thereof), decreases the physical-mechanical properties of the concrete. The rubber pretreatment did not significantly influence the concrete behavior. In contrast, the use of silica fume showed significant strength gains. These gains were confirmed by the microstructural analysis and the densification of the interfacial transition zone between the aggregates and the cement paste.

*Keywords: Tire rubber concrete, surface treatment, silica fume, physical-mechanical properties, X-Ray microtomography.*

## 1 INTRODUCTION

Sustainability principles are being applied in the construction sector because construction is the largest consumer of raw materials in the world (Medina et al., 2018). Approximately 50% of all extracted natural resources are connected to civil construction. The use of industrial by-products and construction residues in concrete would increase the use of these residues as aggregates, which would bring technical, economic, and environmental benefits upon replacement of conventional aggregates (Erdem et al., 2018). Some types of industrial wastes such as fly ash, rice husk ash, and silica fume have already been consolidated for cement production (McCarthy and Dyer, 2019). It is known that silica fume can develop a pozzolanic effect, in which the interaction with the calcium hydroxide of cement produce calcium silicate hydrate (CSH) gel. It can also produce a filler effect in which voids are filled. These reactions increase strength and improve durability of concretes, decreasing permeability of fluids (Romano et al., 2008). There are studies on the use of other wastes in mortars and concrete. For example, construction and demolition wastes (CDW) (Pacheco et al., 2019; Silva and Andrade, 2017; Xiao et al., 2018), waste from the marble and granite industry (André et al., 2014; Sharma et al., 2017; Vardhan et al., 2019), and rubber tires (Guo et al., 2017; Medina et al., 2017; Thomas and Chandra Gupta, 2016). Tire rubber residues are a by-product of the tire industry, whose global production exceeded 2.9 billion tires in 2017 (Raffoul et al., 2017). The article 16 of the CONAMA (National Council Environment) Resolution No. 416/2009 states that manufacturers and importers of new tires are required to properly dispose of tires waste. However, this resolution does not reflect what happens in reality. When the tires are no longer useful, they are dumped in clandestine landfills, which are subject to weathering and water accumulation, thus producing an ideal environment for insect proliferation (Thomas et al., 2016). When incinerated, tires emit toxic gases, which demands an extremely efficient and expensive treatment, making incineration impracticable (Gesoglu and Güneyisi, 2011).

According to Guo et al. (2017), tire wastes were used for the first time in concrete by Eldin and Senoduci in 1993. They incorporated some percentage of ground and chipped rubber as a replacement for fine and coarse aggregates, respectively. The results showed that the replacement of coarse aggregates presented worse compressive strength values (85% reduction) compared to the replacement of fine aggregates (65% reduction). Since then, there have been an increasing number of studies concerning the replacement of fine aggregates (Onuaguluchi and Panesar, 2014; Pelisser et al., 2011; Si et al., 2017). However, the biggest problem related to its use in concrete is the loss of mechanical properties. This fact does not depend only of the size of the rubber particles, and it tends to grow with increasing substitution content (Gupta et al., 2014; Rashad, 2016). According to Tiwari et al. (2016), the mechanical strength is reduced because the rubber particle has a lower toughness than natural aggregate particles. Shu and Huang (2014) reported that the smooth surface hinders the bonding of the cement paste, and this weak bond was likely related to the hydrophobic nature of the rubber waste. For Huang et al. (2013), there are no chemical bonds between rubber and cements paste due to their respective hydrophobic and hydrophilic natures.

In this context, pre-treatment techniques have been used to improve the bonding between rubber and cement paste, as a simple wash with water (Aslani et al., 2018) and exposure to ultraviolet rays (UV) (Ozbas et al., 2012; Shanmugaraj et al., 2006). The most common technique is based on the use of a sodium hydroxide (NaOH) solution (Elchalakani, 2015;

Guo et al., 2017; Kashani et al., 2017; Pelisser et al., 2011; Si et al., 2017; Youssf et al., 2016). This NaOH technique increases the roughness of the rubber and removes the zinc stearate present on its surface, both responsible for the poor adhesion with the cement paste. According to Medina et al. (2018), the increased roughness produces a larger contact surface between the paste and rubber aggregates. An infrared analysis showed that zinc stearate can be removed from the rubber surface with NaOH treatment, causing significant changes in the surface chemistry of the treated rubber, which explains the better adhesion observed between the treated rubber and the matrix cement. It is believed that dense cement hydration products will be generated around the rubber particle and contribute to a better bond between them (Chou et al., 2007; He et al., 2016; Pelisser et al., 2011). Youssf et al. (2016) evaluated the ideal treatment period for the particles, whose results showed that 0.5 h of immersion in NaOH solution was sufficient to improve the performance of the rubber concrete, and longer periods did not result in significant variations. This same pre-treatment time was observed by authors such as Kashani et al. (2017), Guo et al. (2017), and Si et al. (2017). In these investigations, the treatment was performed within 30 to 40 minutes. The concentrations presented by them ranged from 10% to 20% of the value of the solution or 1 molar. However, some facts are controversial between different authors. For example, Deshpande et al. (2014) reported that a pre-treatment of 20 minutes did not affect the compressive and tensile strengths. However, Tian et al. (2011) established that a 24-hours pre-treatment of rubbers resulted in a lower compressive strength compared to the untreated rubber concrete. Turatsinze et al. (2007) did not observe significant changes with treatment. For Li et al. (2004), the treatment for 30 minutes did not result in a statistical difference in the values found, i.e., the results of the untreated rubber concrete were the same.

To aid the possible filling in the transition zone, complementary materials such as silica fume and fly ash have been investigated due to their pozzolanic characteristics (Onuaguluchi and Panesar, 2014). Pelisser et al. (2011) replaced fine aggregates (10%) by tire rubber and used an additional 15% of silica fume. The concretes were made with conventional rubber and modified alkaline activated rubber (NaOH). A microscopic analysis showed that, in the presence of silica fume, the adhesion of the rubber/cement interface improved. Consequently, the porosity was minimized, the concrete strength improved, and the permeability was lowered. Gupta et al. (2014) evaluated a concrete with replacement of cement by 10% fly ash and 25% replacement of natural fine aggregate with untreated rubber residue. The microscopic analysis showed that there was still a separation between the rubber particles and the cement matrix. This separation indicates that the interfacial bonding is weak and the crack at the interface still occurs, leading to a concrete with reduced strength.

Considering that the literature in this subject is quite contradictory, there is a need for further investigation. Therefore, the main objective of the present study is to investigate the effects of chemical pre-treatment of tire rubber and the use of silica fume on the physical-mechanical and microstructural properties of concrete.

## **2 EXPERIMENTAL PROGRAM**

### **2.1 Materials**

The early-age Brazilian Portland cement CP V-ARI RS was used as the binder material. This chosen cement is similar to the ASTM Type III cement. It has a specific gravity of 2.94 g/cm<sup>3</sup>, bulk density of 1.02 g/cm<sup>3</sup>, and compressive strength of 54.1 MPa at 28 days. Silica



fume was also used as binder. It presented a specific gravity of  $2.23 \text{ g/cm}^3$ , and bulk density of  $0.85 \text{ g/cm}^3$ . Figure 1 shows the X-ray diffraction (XRD) of the used silica fume and cement.

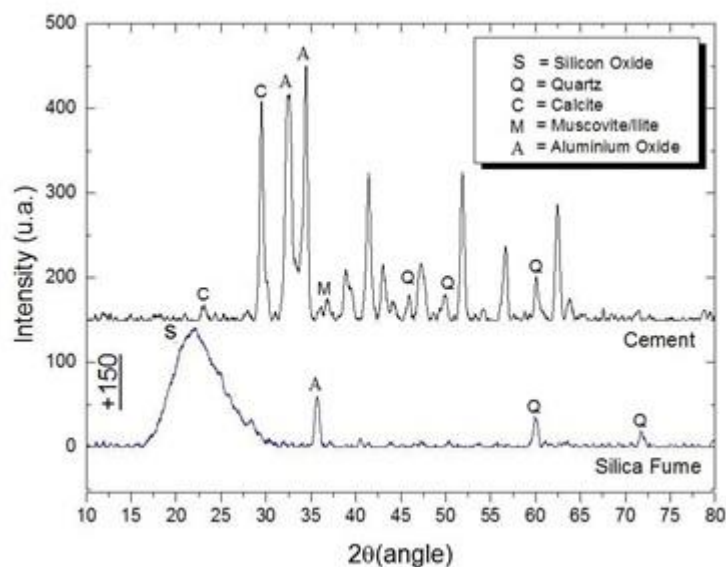


Figure 1. XRD of cement and silica fume.

The chemical composition of the binders are shown in Table 1. They were obtained through a semi-quantitative X-ray fluorescence (XRF) analysis performed on the PANalytical Axios mAX equipment.

**Table 1:** Chemical composition of cement and silica fume (in %)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>
Cement	1.26	3.13	77.02	6.55	1.26	5.28	0.17	4.47
Silica fume	49.89	3.01	18.16	8.13	10.86	1.8	2.29	3.49

The rubber waste was originated from the tire recapping process in a company located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. During this process, the magnetic separation of the steel wires and the separation of the rubber particles occur through an exhaustion process, with the disposal of metallic elements. The rubber particles presented a specific gravity of  $1.13 \text{ g/cm}^3$ , fineness modulus of 2.4, and length variations between 0.8 mm and 3.11 mm, as shown in Figure 2.



Figure 2. Rubber waste.

A chemical pre-treatment was applied to rubber particles. It was based on a method proposed by several authors, including Si et al. (2017), Guo et al. (2017), and Pelisser et al. (2011). In these studies, the best results were obtained by employing a 1M NaOH solution for approximately 40 minutes. Afterwards, all material was washed in abundant water to remove any residue of the solution. The rubber particles were left on a clean, smooth surface for drying at 27 °C. After that, they were kept in a protected container until incorporated into the concrete.

Figure 3 shows the surface appearance of untreated rubber particles (Figure 3 (a)), treated particles (Figure 3 (b)), and fine aggregates (Figure 3 (c)) through scanning electron microscopy (SEM) images. The untreated rubber presented rougher texture, whereas the rubber treated in the NaOH solution had a smoother surface texture.

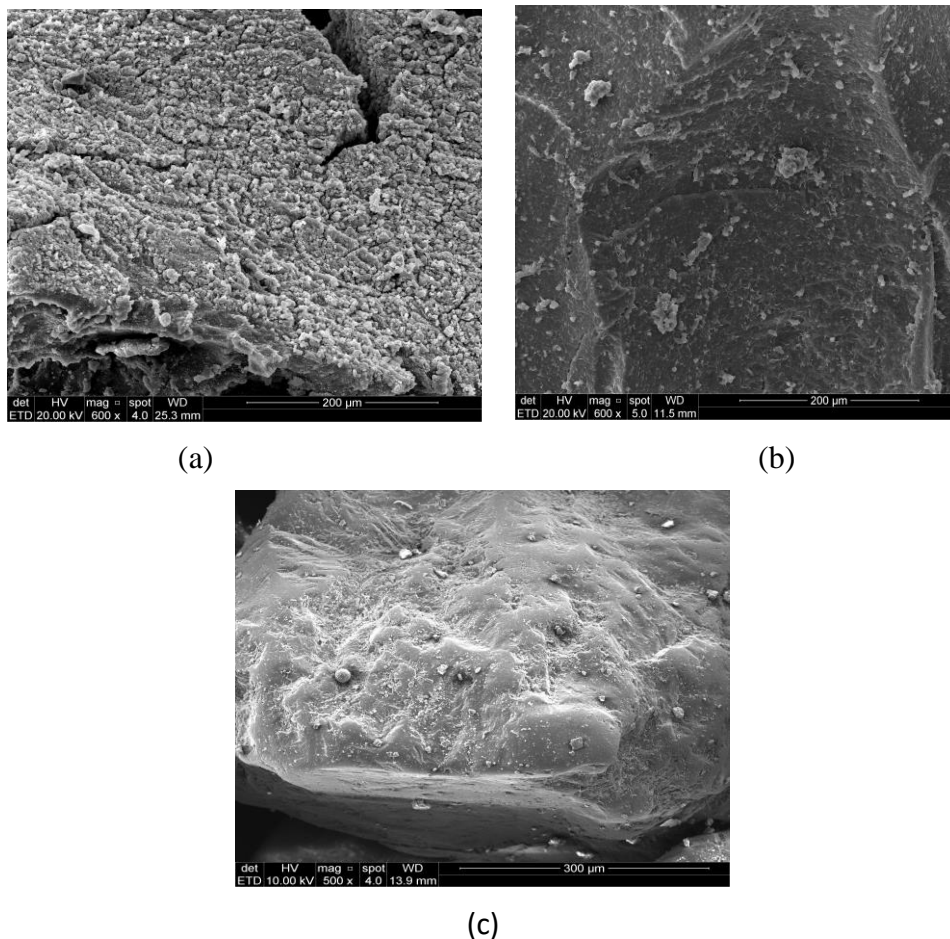


Figure 3. SEM images of rubber (a) without treatment, (b) with treatment, and (c) fine aggregate (magnification = 500×).

It is possible to observe a difference in rubber surfaces compared to sand. The sand has a rougher surface. The mainly untreated rubber surface has loose adhesives. Fact similar to Wang et al. (2017) where he attributes these restrictions as responsible for the poor adhesion between cement hydration products. When performing a NaOH treatment, Tian et al. (2011) observed the erosive effect of this acid solution on the particles, which presented improved adherence with cement particles. The most effective additive in this case is zinc stearate,

which is derived from the tire production process. Its removal makes the rubber surface rougher, resulting in an improved adherence to the paste.

The main elements in the chemical composition of the rubber waste are shown in Table 2. They were obtained by a semi-quantitative test using energy-dispersive spectroscopy (EDS) coupled with SEM. Rubble samples were analyzed without treatment (A) and with treatment (B).

**Table 2:** Chemical composition of the rubber without (A) and with (B) treatment (in %)

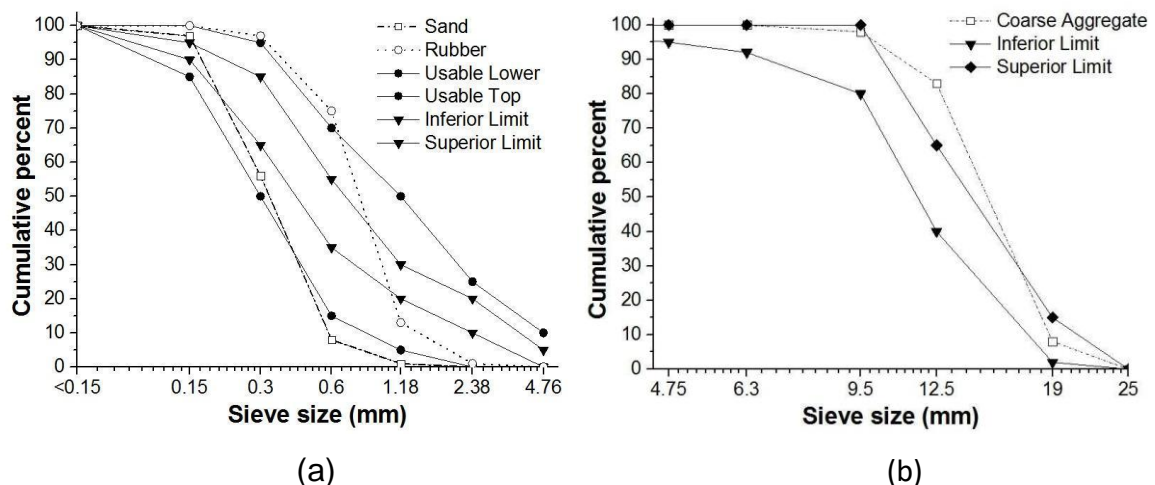
	C	Fe	Zn	O	Cu	Si	Al	S	Ca	Na	Mg
A	44.30	16.42	15.04	6.54	3.58	1.32	0.95	0.48	0.39	-	-
B	60.14	0.27	4.04	5.36	-	0.21	-	1.70	0.26	0.44	0.08
Gupta et al. (2016)	87.51	-	1.76	9.23	-	0.20	0.08	1.08	-	-	0.14

There is a significant difference between the elements of the analyzed rubbers. Some elements such as Cu, Al, Na, and Mg were identified for only one sample (A or B). Moreover, the elements of sample A were different from those identified by Gupta et al. (2016). There is a significant percentage difference in the specific peaks, especially for carbon (C). Furthermore, the number of elements identified by Gupta et al. (2016) for untreated rubber is more similar to the percentage observed for treated rubber (A). The differences between the identified element peaks and the percentage of each element can be attributed to the rubber particle production process.

Sand from the Guaíba Lake (State of Rio Grande do Sul) was used as fine natural aggregate, and crushed stone of basaltic origin was used as coarse aggregate. Their characterization is presented in Table 3, and the particle size distribution of the materials is presented in Figure 4.

**Table 3:** Materials characterization

Test	Natural sand	Brazilian Standard	Basaltic Stone	Rubber	Brazilian Standard
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	2.63	NBR NM 52 ABNT (2009b)	2.64	1.13	NBR NM 53 ABNT (2009a)
Fineness module	1.69	NBR NM 248 ABNT (2003)	6.06	2.4	NBR NM 248 ABNT (2003)
Maximum size (mm)	4.8		19	3.11	



**Figure 4.** Particle size distribution of (a) rubber and sand and (b) coarse aggregate.

## 2.2 Experimental design

Natural fine aggregates were replaced by rubber at 15% and 30% (volume). The rubber with and without the NaOH treatment was analyzed to investigate the influence of the treatment in the particles, whose similar studies were performed by other researchers (Kashani et al., 2017; Si et al., 2017; Youssf et al., 2016). The silica fume was used to replace the cement mass at 7.5% and 15% of the weight of the binder, as previously studied by Pelisser et al. (2011), Youssf et al. (2016), and Gupta et al. (2016). Based on similar studies (Kashani et al., 2017; Shorbi and Karbalaie, 2011; Youssf et al., 2016), a constant water/binder ratio of 0.5 was chosen.

To determine whether the investigated variables had a statistically significant effect on the concrete properties, an analysis of variance (ANOVA) was conducted. The F-test in the ANOVA determined whether any significant differences between the mean values of the properties existed. If the p-value of the F-test is lower than 0.05, the investigated variable has a significant effect on the analyzed property at a confidence level of 95%. Conversely, if the p-value is greater than 0.05, a change in the variable is considered to have no significant effect.

## 2.3 Concrete production

The IPT/EPUSP (Helene and Terzian, 1992) method was used for mix proportioning all concrete mixtures. The workability of all concretes was fixed at  $90 \pm 10$  mm. To achieve the desired consistency, a polycarboxylate based superplasticizer additive was employed in some mixtures. The molding and curing of the specimens were performed according to the Brazilian standard NBR 5738 (ABNT, 2016).

Due to the difference between the specific mass of the fine aggregate and the residue, it was necessary to adjust the amount of material to be used for the production of concrete using Equation 1.

$$M_{RUBBER} = M_{NA} \times \frac{\gamma_{RUBBER}}{\gamma_{NA}} \quad \text{Eq. (1)}$$

Where  $M_{RUBBER}$  is the mass of the rubber aggregate (kg),  $M_{NA}$  is the mass of the natural aggregate (NA) (kg),  $\gamma_{RUBBER}$  is the specific mass of the rubber aggregate ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ), and  $\gamma_{NA}$  is the specific mass of the natural aggregate ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ). The mixture proportions of the concretes are presented in Table 4.

**Table 4:** Mixture proportions

Mixture	Rubber (%)	Silica fume (%)	Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Silica fume ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Aggregates ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			Additive (%)	Slump (mm)
					Fine	Rubber	Coarse		
REF	0	0	379	0	825	0	1068	0	95
R15SF0	15	0	356	0	702	54	1068	3.48	85
R30SF0	30	0	337	0	578	107	1068	0	80
R0SF7.5	0	7.5	379	28.43	825	0	1068	3.31	100
R0SF15	0	15	379	56.86	825	0	1068	6.28	80
R15SF7.5	15	7.5	356	26.7	695	53	1068	1.44	80
R30SF7.5	30	7.5	337	25.28	578	106	1068	4.8	100
R15SF15	15	15	356	53.4	702	53	1068	8.39	95
R30SF15	30	15	337	50.56	578	106	1068	4.94	85

RN15SF0	15	0	356	0	705	53	1072	0	85
RN30SF0	30	0	337	0	583	107	1072	0	80

## 2.4 Tests performed

The concrete was cast using cylindrical specimens (10×15 cm) for each mix design, according to the NBR 5738 (ABNT, 2016). After 24 h, the specimens were demolded and submerged in water until they reached their age for physical-mechanical tests (Table 5). The ages were defined at 7, 28, and 63 days for the compressive strength tests, and at 28 days for the elastic modulus (five samples for each mix proportion), according to the criteria of the NBR 5739 (ABNT, 2018) and NBR 8522 (ABNT, 2017), respectively. To evaluate the microstructure of the concretes at 28 days, the transition zone and the densification effect in the interfacial transition zone (ITZ) of the samples were analyzed. Thus, the samples of the central part of the test specimen were analyzed.

**Table 5:** Characterization test used in concretes

Properties	Brazilian Standard	Specimens and dimensions	Age
Dry bulk density	NBR 9779 [51]	3 Cylinders (100 × 200 mm)	28 days
Porosity			
Water absorption by immersion			
Compressive strength	NBR 13279 [52]	Cylinders (100 × 200 mm)	7, 28, 63 days
Splitting tensile strength		Cylinders (100 × 200 mm)	28, 63 days
Elastic modulus	NBR 8522 [50]	3 Cylinders (100 × 200 mm)	28, 63 days
X-Ray microtomography	Specific procedure, not standardized	Cubes (a = 2.5 mm)	28 days
Scanning electron microscopy	Specific procedure, not standardized	Pieces (3-6 mm)	28 days

SEM analyses were performed at 28 days, mainly to verify the ITZ of the concrete samples in the Inspect F50 – FEI, at 0.3 to 30 kV and resolution point of 1.2 mm. The magnifications to identify rubber particles and their interface with the cement matrix ranged from 100× to 1000×. For that identification, a method based on previous studies was employed (Kashani et al., 2017; Pham et al., 2018; Thomas et al., 2016). The microstructural analysis was performed using dispersive energy spectroscopy (DES, Oxford Instruments), with the instrument connected to SEM.

The X-ray microtomography was performed according to the method proposed by Pelisser et al. (2011), which analyzes the microstructure of the concrete with rubber and silica fume at 28 days. All concrete samples were analyzed by the SkyScan 1173 – Bruker scanner. They were positioned as close as possible to the X-ray source to achieve a resolution of 10 μm in a section of 2.5 × 2.5 mm. The samples were scanned for 30 minutes (time = 500 ms, av = 1, step = 0) at 50 kV and 0.3 mA, collecting 1.200 X-ray projections through a rotation of 360°. The volume reconstruction of the obtained data was performed through the software Phoenix, and the data was exported as a 32-bits file. The pore volume was calculated based on the average of each plan.

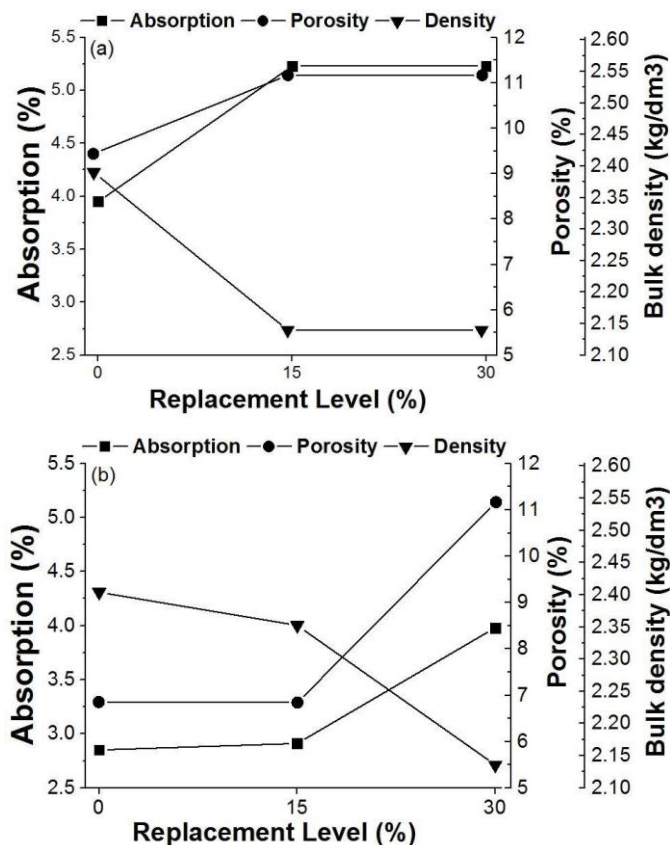
### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Physical properties

The results of concrete absorption, porosity, and specific mass tests are presented in Figure 5 for concretes without silica fume (a), with 7.5% of silica fume, (b) and with 10% of silica fume (c). The porosity of the sample with 15% rubber replacement increased by 18.32% compared to the reference. However, it remained constant for the 30% rubber replacement. Moreover, it is possible to relate the minimization of the concrete's density with the increase of rubber content. In this case, a decrease of approximately 10.46% in relation to the reference was obtained for the replacements of 15% and 30%.

For concretes molded with 7.5% silica fume (Figure 5 (b)), the porosity was 27.84% lower compared the no-rubber concrete with and without silica fume (Figure 5 (a)). Such porosity remains constant at 0 to 15% rubber contents. However, for 30% rubber, there was an increase of 28.39% on the concrete with the same silica fume percentage. On this case, the density also showed an inversely proportional behavior to absorption and porosity. By using 30% of rubber, these values decreased by 7.08% compared to ROSF7.5.

The initial porosity of the concretes with 15% of silica fume was 5.89% (Figure 5 (c)), which is 37.60% lower compared to the reference value (Figure 5 (a)). With a 30% rubber addition, the porosity increases 49.74% compared to the reference, and the density decreased almost constantly according to the increase in the replacement levels, unlike the results presented in Figure 5 (a) and (b). For 30% rubber addition, the density decreases approximately 10.04% compared to ROSF15.



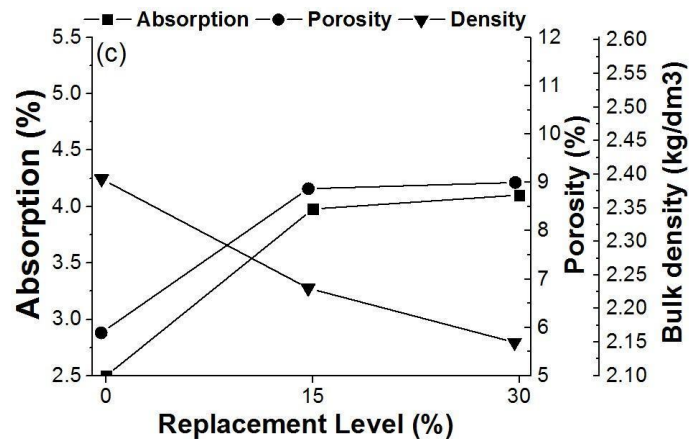


Figure 5. Absorption, porosity, and density for concretes: (a) without silica fume, (b) with 7.5% silica fume, and (c) with 15% silica fume.

It can be observed that the results are in agreement with those obtained by Gesoğlu et al. (2014) and Thomas and Chandra Gupta (2016). These authors state that porosity increases with the addition of rubber and, consequently, the concrete absorbs more water. The water absorption and porosity are low when silica fume is used and, according to Albano et al. (2005), this occurs because there is a filling in the voids. The silica fume leads to concretes with a higher density compared to those without silica. This behavior was explained by Pelisser et al. (2011), that the authors mention that the chemical treatment combined with silica fume fills the voids. Therefore, the concrete is denser and less porous, which contributes to better adhesion and reduced weaknesses, recovering part of their strength.

### 3.2 Mechanical properties

#### 3.2.1 Compressive strength ( $f_c$ )

The effect of treatment in the compressive strength is shown in Figure 6. It can be seen that a higher substitution content minimizes the compressive strength compared to the reference concrete, regardless of the treatment performed on the particles. It can also be observed that the concrete treated with rubber presents lower resistance compared to the untreated rubber concrete.



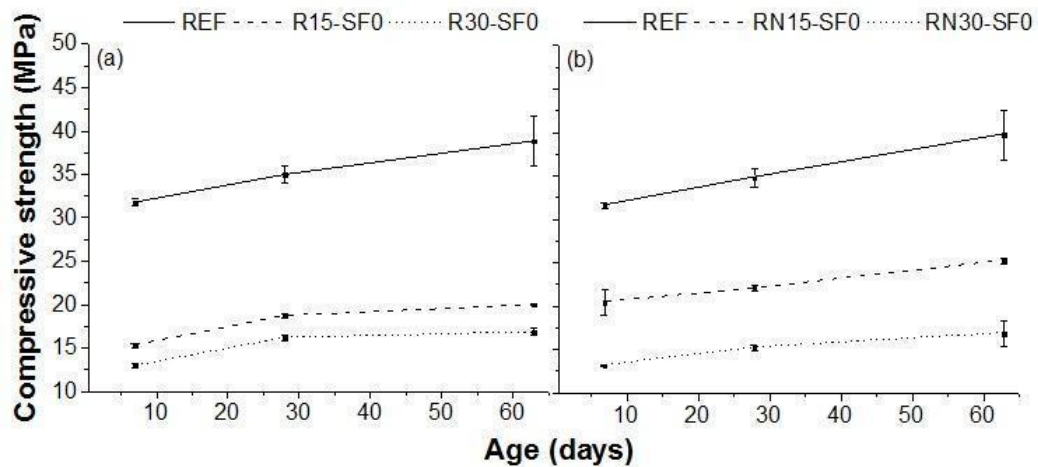


Figure 6. Compressive strength for concretes with (a) treated and (b) untreated rubber.

The obtained results are controversial in the literature. Some researchers mention that the treatment does not significantly influence the concrete properties (Albano et al., 2005; Li et al., 2004; Tian et al., 2011; Turatsinze et al., 2007; Youssf et al., 2016), while others show that the treatment results in an improvement in the mechanical properties of the material (Balaha et al., 2007; Mohammadi et al., 2016). Deshpande et al. (2014) state that, under a load, the higher tenacity of the rubber in relation to natural aggregates produces a discontinuity in the matrix, decreasing its resistance. He et al. (2016) reports that the zinc-stearate - a compound which is present in the tire manufacturing formulation - migrates and diffuses to the rubber surface, leaving it with low free energy, which leads to a weak adhesion to the paste. Such fact is directly associated with the polarity of the rubber surface, because the smaller it is, the lower the free energy, which negatively influences the adhesion. Moreover, the rubber has low hydraulic conductivity and a smooth surface, which are factors that hinder the adhesion to the cement paste (Albano et al., 2005; Mohammadi et al., 2016; Youssf et al., 2016). According to Li et al. (2004), the size of the particles influence the mechanical properties because the performance of the rubber chip composites (bigger than 76-13 mm) is lower than that of concretes with smaller rubber particles (4.75-0.425 mm). These results can be attributed to the larger surface contact between rubber and mortar.

To verify the statistical significance of the treatments and replacements of rubber in the compressive strength, an ANOVA was conducted. The results are presented in Table 6. It can be observed that main parameters investigated can influence the compressive strength of concretes. Nevertheless, the rubber replacement presents a higher influence (according to the magnitude of the F-test indicator) than the treatments.

**Table 6:** ANOVA of the compressive strength for concretes without silica fume

Source of variation	DF	SS	MS	F-test	p value	Significance
Treatment type	1	14.20	14.20	20.70	0.0007	Yes
Rubber amount	2	2281.63	1140.82	1663.42	0.0000	Yes
Age	1	15.14	15.14	22.07	0.0005	Yes
Treatment type · Rubber amount	2	25.57	12.78	18.64	0.0002	Yes
Treatment type · Age	2	0.84	0.84	1.23	0.2891	No
Rubber amount · Age	2	1.61	0.80	1.17	0.3433	No
Treatment type · Rubber amount · Age	2	0.37	0.18	0.27	0.7683	No
Error	12	8.23	0.69			

DF = degrees of freedom, SS = Sum of squares, MS = Mean square



Figure 7 shows that the increase in the silica fume content results in higher compressive strength of concretes. As previously reported, the incorporation of rubber leads to a significant decrease in strength. However, with the use of silica fume this effect tends to be minimized.

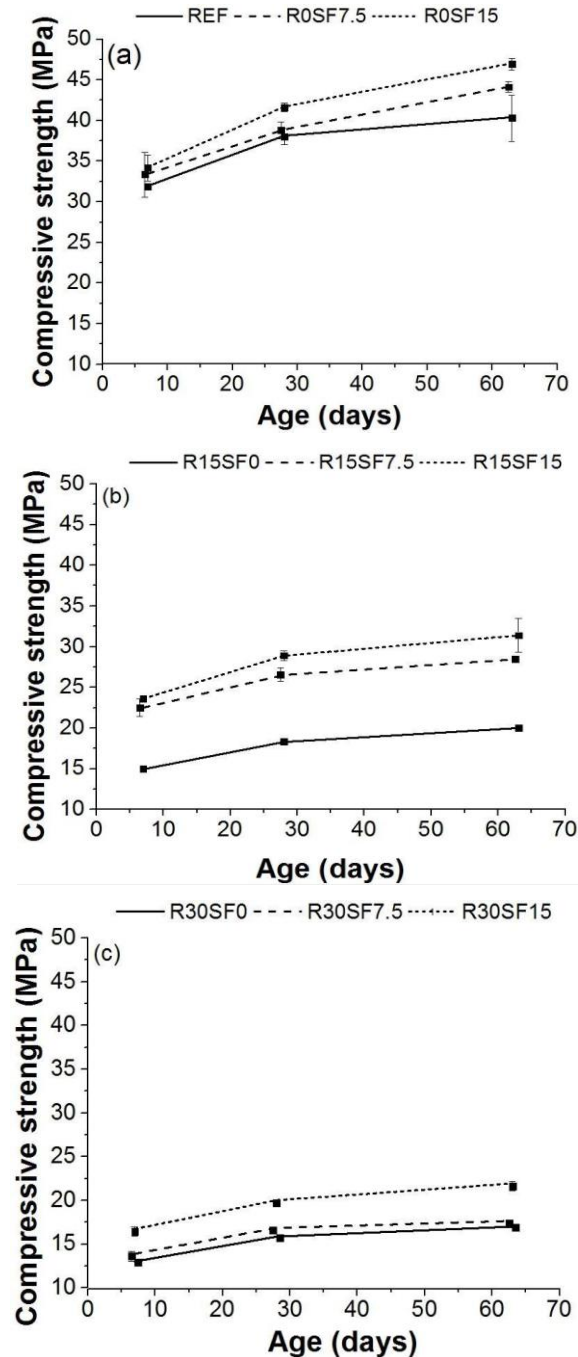


Figure 7. Compressive strength for concretes with silica fume with: (a) no rubber, (b) 15% treated rubber, and (c) 30% treated rubber.

The obtained results are similar to those obtained by Gupta et al. (2015), Güneysi et al. (2004) and Guo et al. (2017). The addition of silica fume can increase the transition zone structure by forming the CSH gel in this area during the pozzolanic reaction of the added

mineral. Güneyisi et al. (2004) comments that the beneficial effect provided by the silica fume tends to decrease with the increase of rubber particles in the concrete due to the progressive weakening of the matrix characteristics.

The influence of the investigated variables is presented in Table 7 through an ANOVA. The main parameters and all interactions are statistically significant for compressive strength. It can be seen that the amount of rubber had a higher influence than the silica fume content and the concrete age.

**Table 7:** ANOVA of compressive strength for concretes with silica fume

Source of variation	DF	SS	MS	F-test	p value	Significance
Rubber amount	2	4096.41	2048.2	2136.82	0.0000	Yes
Silica fume	2	251.3	125.65	131.09	0.0000	Yes
Age	2	354.11	177.05	184.71	0.0000	Yes
Rubber amount · Silica fume	4	117.87	29.47	30.74	0.0000	Yes
Rubber amount · Age	4	43.64	10.91	11.38	0.0000	Yes
Silica fume · Age	4	17.64	4.41	4.60	0.0058	Yes
Rubber amount · Silica fume · Age	8	22.59	2.82	2.95	0.0167	Yes
Error	27	25.88	0.96			

DF = degrees of freedom, SS = Sum of squares, MS = Mean square

### 3.2.2 Splitting tensile strength ( $f_{ct,sp}$ )

The effect of the pretreatment on the splitting tensile strength of the concretes is presented in Figure 8. Compared with the reference concrete, there is a decrease on the tensile strength, regardless of the treatment used.

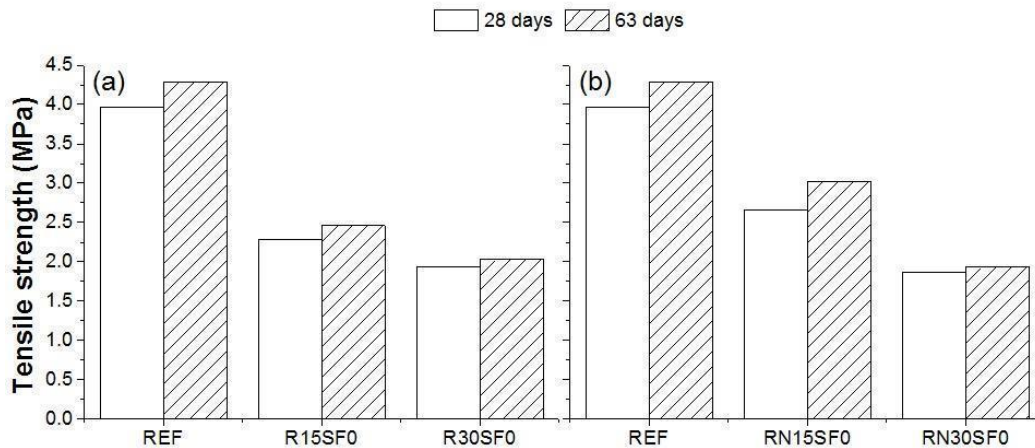


Figure 8. Splitting tensile strength of concretes (a) with and (b) without treatment.

Such behavior is consistent with the one observed by Youssf et al. (2016). They compared the reference concrete with concrete combined with untreated rubber. The authors observed a 65.85% decrease in the tensile strength. However, after the treatment of the rubber particles, was observed that the resistance was partially recovered due to the relatively slow movement of the rubber particles through the erosion effect of the surface caused by the acidic solution, thus reducing the drop on tensile strength. In contrast, the treatment in the present research resulted in an increased tensile strength reduction. For Onuaguluchi and Panesar (2014), the reduction of tensile strength is attributed to the same factors that affect the compressive

strength. These factors include porosity, which increases with the increase of rubber particles; and the weak bond of rubber with the cement paste. As a result, the concrete starts to crack upon application of loads.

Based on ANOVA, Table 8 presents the statistical influence of the treatment, rubber amount, and age on the tensile strength of the concrete. It is of note that only the rubber replacement level presents a statistically significant influence, mainly due to the fiber effect associated with the rubber dimensions.

**Table 8:** Statistical significance of parameters on the tensile strength of concretes

Source of variation	DF	SS	MS	F-test	p value	Significance
Treatment type	1	0.0805	0.0805	0.859	0.3722	No
Rubber amount	2	19.80	9.90	105.67	0.0000	Yes
Age	1	0.2795	0.2795	2.983	0.1097	No
Treatment type · Rubber amount	2	0.3984	1.992	2.126	0.1620	No
Treatment type · Age	1	0.0000	0.0000	0.000	0.9844	No
Rubber amount · Age	2	0.0463	0.0231	0.247	0.7851	No
Treatment type · Rubber amount · Age	2	0.0209	0.0105	0.112	0.8952	No
Error	12	1.1242	0.0937			

DF = degrees of freedom, SS = Sum of squares, MS = Mean square

### 3.2.3 Elastic modulus

Figure 9 present the results of the mean values observed for the elastic modulus of untreated and treated rubber concrete. The elastic modulus decreases upon incorporation of rubber. However, unlike the effect on compressive strength, the performance of treated rubber concrete was better than that of the ones with untreated rubber. For 15% of treated rubber, the elastic modulus increased by approximately 6.78% compared to the samples with untreated rubber. The rubber aggregate presented an overall low elastic modulus compared to natural aggregates for treated and untreated samples, similar to the results obtained by Gupta et al. (2014). Therefore, when added to the concrete, the rubber aggregates act as large pores in the matrix and, when subjected to external loads, do not significantly contribute to resistance due to the increased deformability of the material.

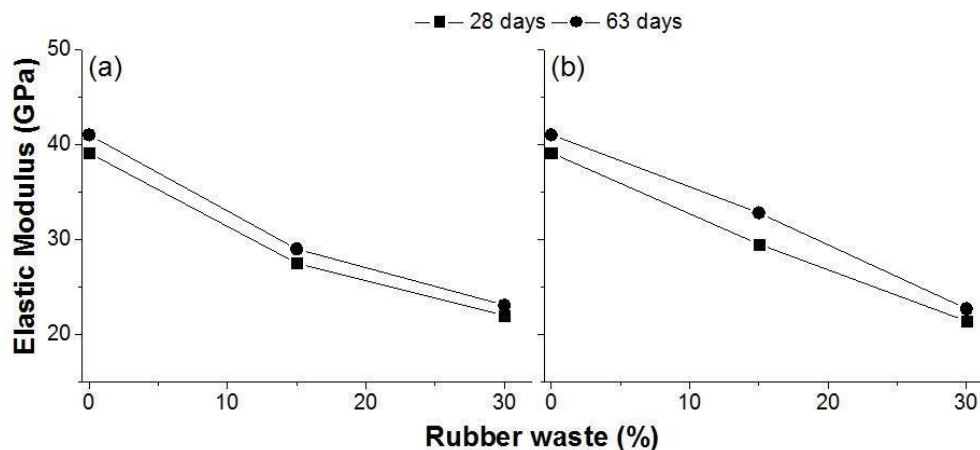


Figure 9. Elastic modulus of concretes with (a) untreated and (b) treated rubber.

Table 9 presents the ANOVA for the parameters that influence the elastic modulus. The influence of the treatment is not statistically significant for the elastic modulus, as shown in Figure 9. The biggest differences are observed for 15% of rubber content. However, the reference and the concretes with 30% of rubber presented similar values.

**Table 9:** Statistical influence of variables in concrete elastic modulus

Source of variation	DF	SS	MS	F-test	p value	Significance
Treatment type	1	1.69	1.69	1.97	0.1728	No
Rubber amount	2	1851.56	925.78	1081.38	0.0000	Yes
Age	1	28.44	28.44	33.23	0.0000	Yes
Treatment type · Rubber amount	2	10.55	5.28	6.16	0.0069	Yes
Treatment type · Age	1	3.36	3.36	3.93	0.0591	Yes
Rubber amount · Age	2	17.51	8.76	10.23	0.0006	Yes
Treatment type · Rubber amount · Age	2	8.19	4.10	4.79	0.0178	Yes
Error	24	20.55	0.86			

DF = degrees of freedom, SS = Sum of squares, MS = Mean square

Figure 10 shows the effects of silica fume on the elastic modulus, which tends to decrease as the rubber replacement content increases. When silica fume is added as a partial replacement of Portland cement, the negative rubber effect on elastic modulus decreases. The most expressive improvement (12%) in the elastic modulus was observed in concretes with 15% rubber and 7.5% silica fume (Figure 10(b)), compared to concrete with 15% rubber and without silica fume (Figure 10(a)). The other concretes (Figures 10(b) and (c)) showed approximately 2% improvements in the elastic modulus compared to concretes without silica fume (Figure 10(a)). For all concretes, the effect of the elastic modulus at different ages showed a small increase. The most significant increase was of approximately 5.4% on concretes with 15% rubber and without silica fume (Figure 10(a)). Compared to concrete with 30% rubber and 15% silica, the elastic modulus of the concrete with 30% untreated rubber and without silica fume was 9.92% higher at 63 days.

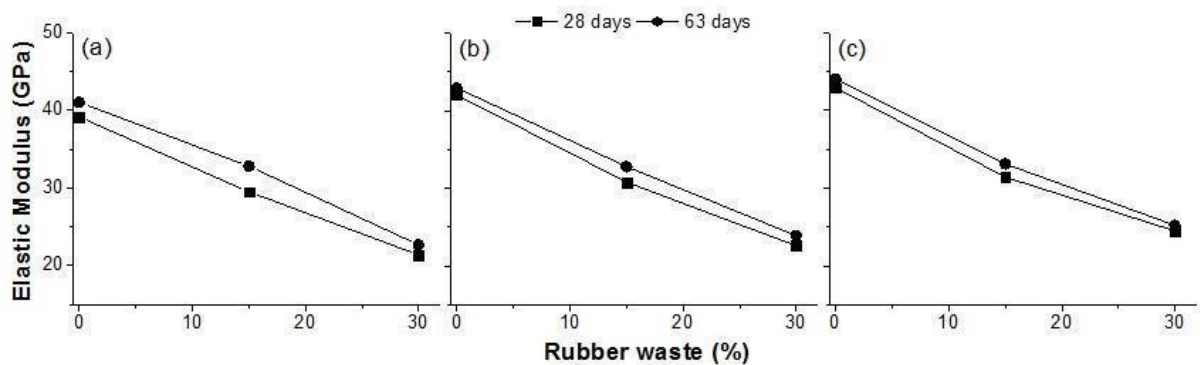


Figure 10. Elastic modulus for concretes with rubber treated with: (a) no silica fume, (b) 7.5% silica fume, and (c) 15% silica fume.

Table 10 presents the ANOVA that evaluates the statistical significance of silica fume and rubber content in the elastic modulus of concrete. The main parameters (rubber amount, silica fume replacement, and age) have significant influence on the elastic modulus. Moreover, considering the F-test, the rubber amount presented a higher influence than silica fume.

**Table 10:** Statistical influence of silica fume in elastic modulus

Source of variation	DF	SS	MS	F-test	p value	Significance
Rubber amount	2	2826.26	1413.13	1540.24	0.0000	Yes
Silica fume	2	74.46	37.23	40.58	0.0000	Yes
Age	1	16.27	16.27	17.73	0.0002	Yes
Rubber amount · Silica fume	4	14.2	3.55	3.87	0.1051	No
Rubber amount · Age	2	2.66	1.33	1.45	0.2489	No
Silica fume · Age	2	0.03	0.015	0.02	0.9839	No
Rubber amount · Silica fume · Age	4	2.96	0.74	0.81	0.5291	No
Error	35	32.11	0.92			

DF = degrees of freedom, SS = Sum of squares, MS = Mean square

This same behavior was observed by Gupta et al. (2016), when they compared the elastic modulus of rubber concrete with and without silica fume. With increased rubber content, the modulus decreased by approximately 24.45%. However, in the presence of silica, the elastic modulus increased by 24.4% in relation to concrete without silica fume. The main reason attributed by the authors was the filling of pores with silica fume between the aggregate and the cement paste. The modulus decrease has been attributed to the replacement of rigid fine aggregates by rubber particles with low elastic modulus because the elastic modulus of the concrete depends on the elastic modulus of the aggregates (Onuaguluchi and Panesar, 2014). According to Pelisser et al. (2011), the rubber elastic modulus is considerably smaller than the elastic modulus of the natural aggregate, thus making rubber concrete more deformable. Another reason could be possible cracks around the rubbers (observed through particle microscopy), which can affect resistance owing to the poor adhesion of the rubber with the paste (Mohammed et al., 2012).

In Figure 11, it is possible to see a correlation between the compressive strength and elastic modulus of the concrete for different rubber and silica fume contents. The compressive strength and elastic modulus tend to decrease as the rubber is incorporated. In contrast, these properties increase with the incorporation of silica fume, mainly due to the microstructural densification in transition zone owing to the pozzolanic effect (Mohammed et al., 2012; Onuaguluchi and Panesar, 2014; Pelisser et al., 2011; Youssf et al., 2016).

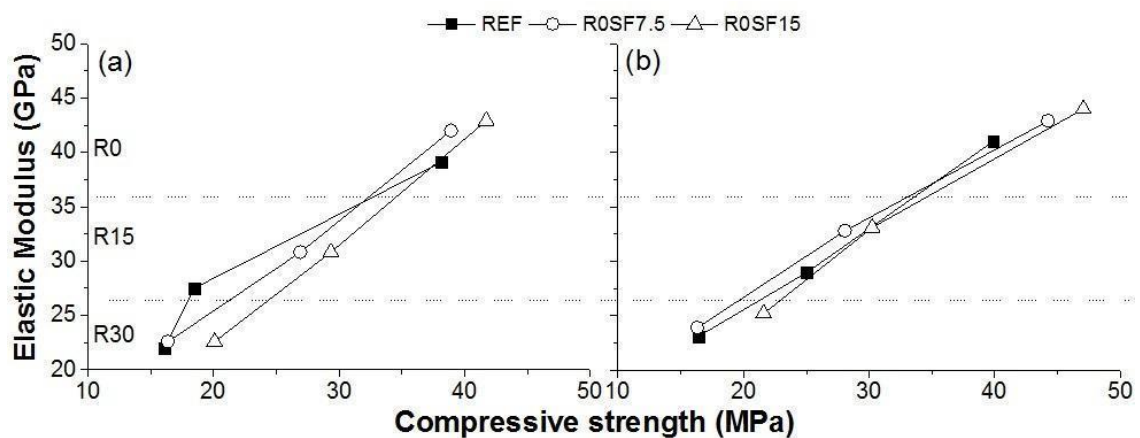


Figure 11. Correlation between compressive strength and elastic modulus for (a) 28 days and (b) 63 days.

### 3.3 Microstructural analysis

#### 3.3.1 X-ray microtomography

The X-ray microtomography was used to verify the rubber distribution and the void content of the concretes. The dimension of all samples were  $25 \times 25 \times 40$  mm, taken from the center of the cylindrical specimen and 1200 slices were analyzed. Pores, rubber particles, and cement paste were observed. Visually, pores have a very characteristic appearance, with a rounded and darker color. In contrast, rubber particles have a more irregular shape and a grey color. The cement paste presents a color classified like light grey. On Figure 12, a sample of concrete without silica fume and with different rubber contents (15% and 30%) can be observed.

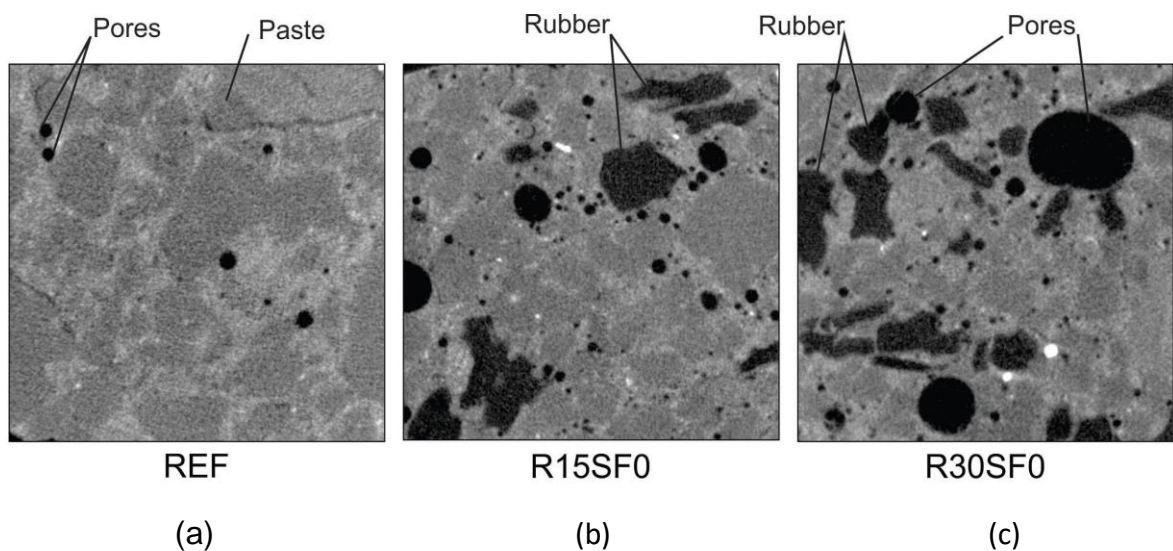


Figure 12. X-ray microtomography of concretes samples: (a) reference, (b) R15SF0, (c) R30SF0.

There was an increase in the amount of pores with the incorporation of rubber on the concrete matrix. Similar results were obtained by Kashani et al. (2017) and Onuaguluchi and Panesar (2014), who employed up to 30% rubber and observed a high variability on pore distribution based on tomography analysis.

The microtomography determined the voids volume on the selected cubic region of the concrete. The mechanical resistance and immersion water absorption of the reference specimen, and the 15 and 30% rubber concrete are shown in Figure 13. It was verified, through a comparative analysis, that the concretes with higher compressive strength values present the lowest water absorption and voids volume. Similar results were obtained by Pacheco et al. (2018). They used X-ray microtomography and pore size distribution to investigate the influence of water/cement (w/c) ratio, cement consumption, and environmental aggressiveness in the durability of a concrete mix (proportions according to the European concrete standard EN 206).



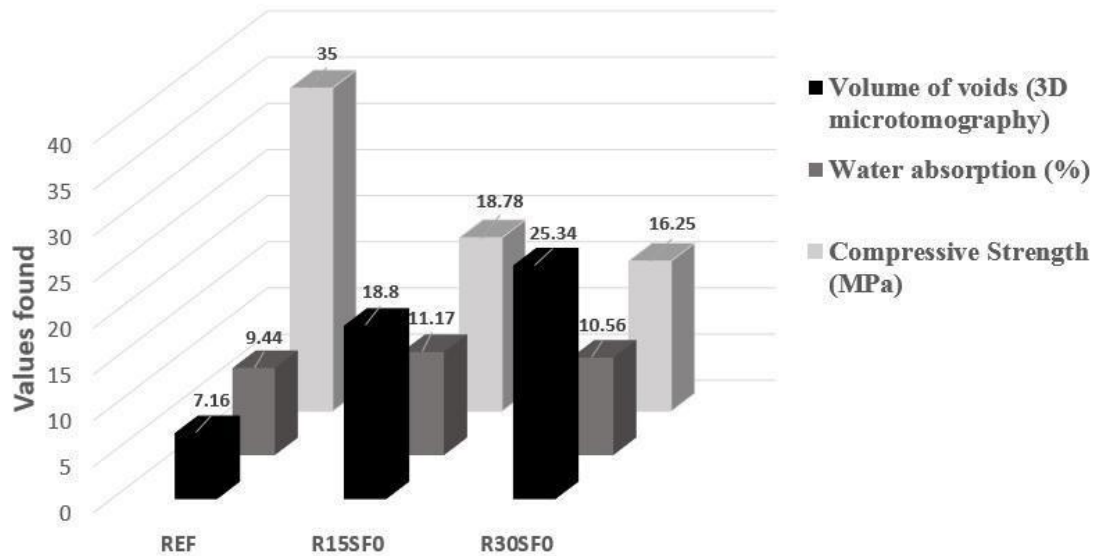


Figure 13. Comparative analysis of parameters investigated for concretes with rubber.

Figure 14 shows the images of concretes without rubber and with different silica fume levels. The volume of voids decreased with the increased level of silica fume. This result can be explained by the silica pozzolanic effect. The silica fume reacts with calcium hydroxide, produced through calcium silicate hydration, to form the CSH. As a result, the voids are filled, increasing the mechanical properties of the concrete (Andrade and Buják, 2013; Schumacher and Juniper, 2013).

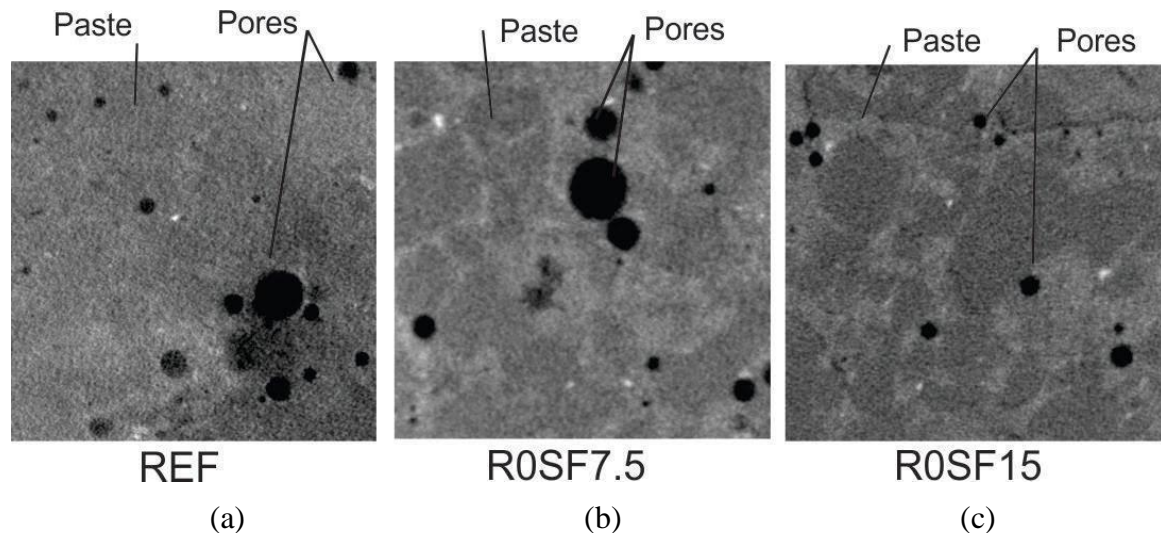


Figure 14. X-ray microtomography of concretes: (a) reference, (b) R0SF7.5, (c) R0SF15.

Figure 15 presents the volume of voids obtained through microtomography, the absorption of water obtained by immersion, and the compressive strength at 28 days for concretes with silica fume. Absorption and volume of voids tend to decrease with increasing compressive strength. These results are similar to those obtained by Nežerka et al. (2019), Siddique (2011) and Poon et al. (2006).

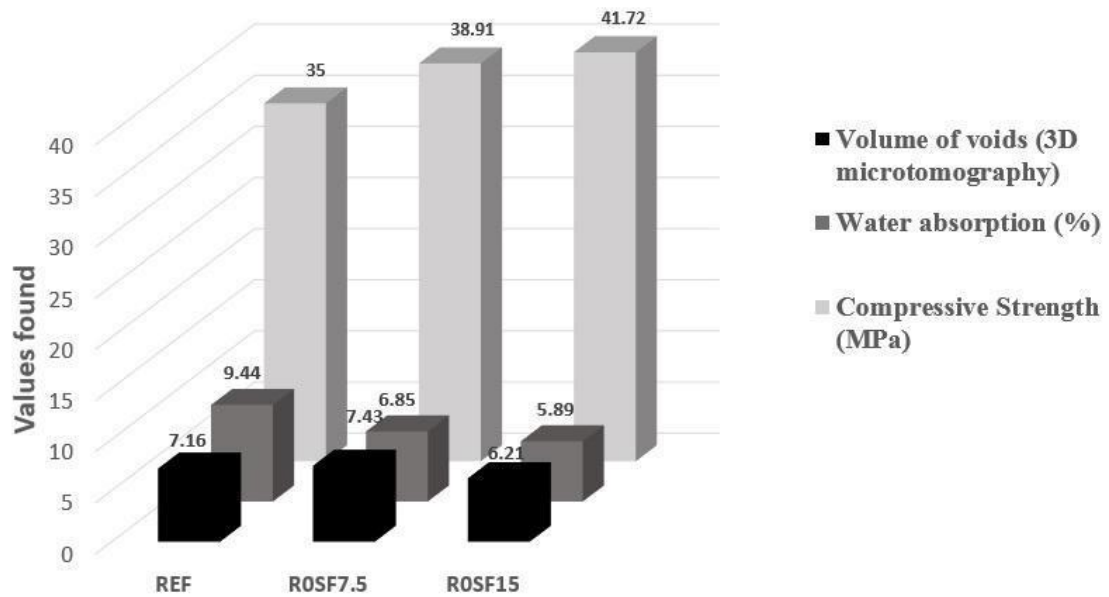


Figure 15. Comparative analysis of parameters investigated for concretes with silica fume

With the help of a reconstruction software, 3D images of the concrete samples were obtained. The pores and rubber are presented as circular and irregular shapes, respectively, whereas the cement matrix is presented in light-gray color. The reconstructed images of the reference concrete, the concrete with 30% rubber, and with 15% silica fume are presented on Figures 16, 17, and 18, respectively.

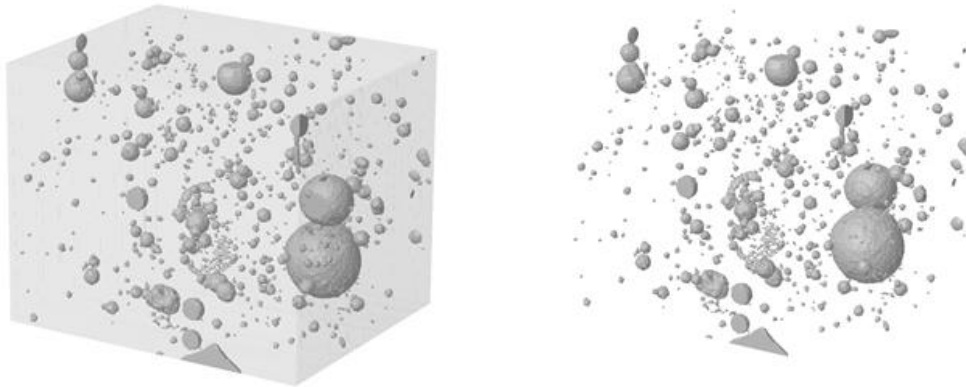


Figure 16. Reconstructed image of reference concrete.



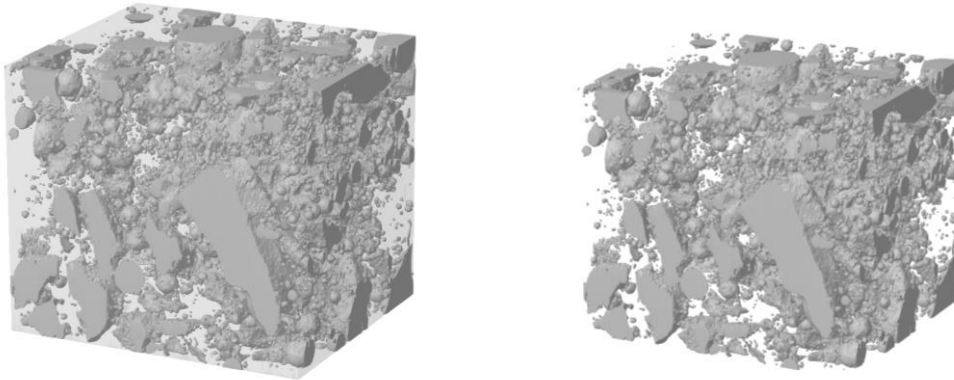


Figure 17. Reconstructed image of concrete with 30% of rubber and without silica fume (R30SF0).

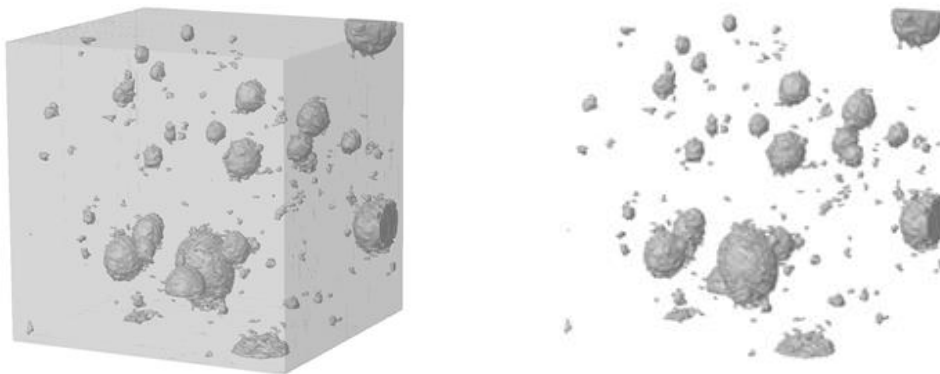


Figure 18. Reconstructed image of concrete without rubber and with 15% of silica fume (R0SF15).

Comparing Figures 16 and 17, it is possible to observe the high quantity of rubber particles and voids on the matrix. This behavior was also identified by Onuaguluchi and Panesar (2014). In addition, the incorporation of silica fume into the concrete matrix led to a porosity decrease from 13.7-15% to 9.1-9.8% (Figures 16 and 18). This decrease can be associated with the pozzolanic reaction which results in CSH. In turn, CSH fills the transition zone, which becomes more stable and stronger.

### 3.3.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Due to the size of the rubber particles, it was possible to observe in a macroscopic scale the distribution of materials in the concrete matrix. Figures 19 (a), (b), and (c) show the reference concrete, and the concrete with 15% and 30% replacement of sand by rubber, respectively.

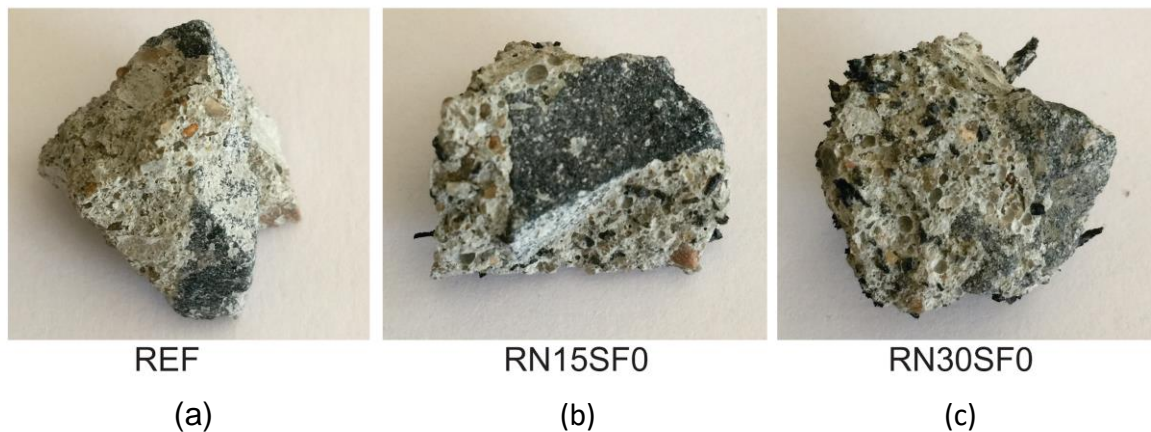


Figure 19. Images of concretes: (a) reference, (b) RN15SF0, (c) RN30SF0.

By microscopically analyzing the concretes with 30% treated and untreated rubber (Figures 20 (a) and (b)), it is possible to observe that no significant changes were identified in the transition zone after the NaOH treatment. Microcracks can be verified in both cases. This analysis confirms that, when subjected to compressive strength, untreated rubber concrete obtained better results than treated rubber concrete. Similar results were obtained by Mohammed et al. (2012). They observed that concrete with treated rubber, despite its rougher particle surface, did not show significant improvements, considering the adhesion of rubber with concrete in the all treatment methods used (variation of 20 minutes to 7 days).

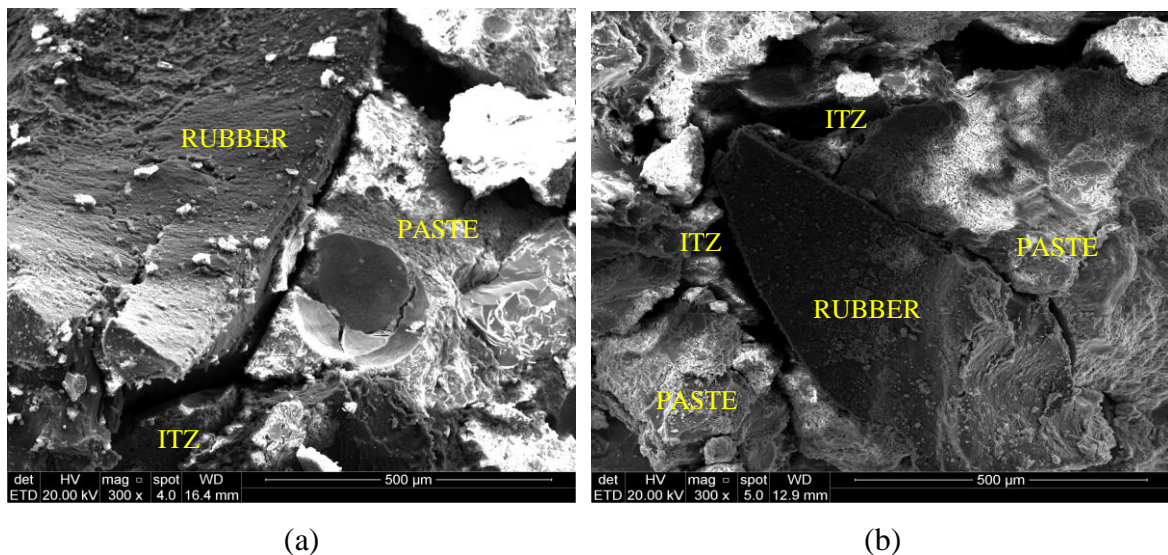
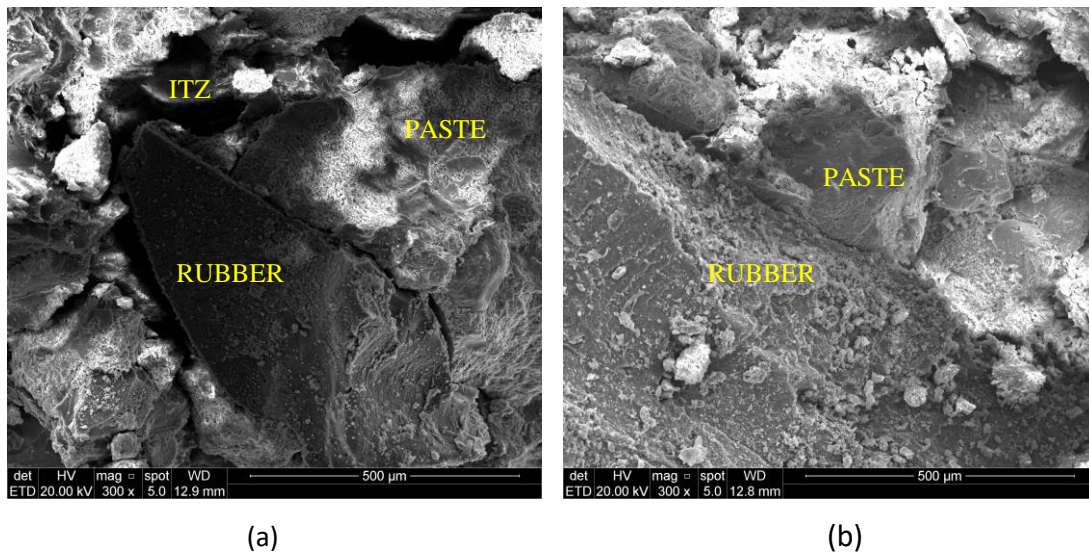


Figure 20. SEM images of concretes: (a) RN30SF0, (b) R30SF0.

A densification of ITZ was observed upon incorporation of silica fume in the concretes, as observed in Figures 21(a) and (b). Rubber particles were better adhered to the cement paste, similar to the behavior observed by Pelisser et al. (2011) and Gupta et al. (2014). The silica fume acts as a nucleation point for CSH gel formation at early ages, and the hydrated products precipitates on the rubber surface, changing its morphology. The ITZ improvement and the densification of concrete increase the mechanical properties of concretes with silica fume, as shown in Figure 21.



(a)

(b)

Figure 21. SEM images of concretes: (a) R30SF0, (b) R30SF15.

#### 4 FINAL CONSIDERATIONS

This research investigated the influence of chemical pretreatment of tire rubber and silica fume on the physical-mechanical properties of their concrete matrix. Based on the obtained results, the following considerations can be made:

- The replacement of natural fine aggregates by tire rubber residues increased porosity by 15.93% over reference concrete. The water absorption in this case is directly proportional to the porosity and inversely proportional to the specific mass, which obtained a drop of 10.42%.
- The mechanical properties of concrete will always tend to decrease with the use of rubber particles, regardless of whether or not the treatment is performed. Concrete with 15% untreated rubber showed a 20.03% higher compressive strength at 63 days when compared to the same trace of treated rubber.
- It was found that performing the proposed method of chemical pretreatment with NaOH did not result in significant gains in the evaluated physical-mechanical properties - as presented by the ANOVA results - and therefore a better understanding of chemistry and surface would be required. morphology of the treated particles and their connection with the cement paste.
- The use of active silica in concrete contributed to the filling of pores caused by the increase of rubber particles and thus made the structure of this concrete 17.18% less porous when compared to a trace of 30% of rubber without silica and the same 30% of rubber with 15% silica. The compressive strength results for these had increased by 22.25% at 63 days. That is, mechanical strength also improves with the use of silica fume.
- The best rubber content would be 15% as a substitute for fine aggregate and the best silica fume content would be 15% as a replacement for Portland cement, because together they obtained the best results in this research.

Finally, it is seen that the no need for tire rubber treatment makes its use more effective, faster and easier. It can be used as a substitute for part of fine aggregate in no structural concrete.

Also, the use of sílica fume as a cement substitute helps to reduce the high environmental impact generated by the cement production process. Thus, both materials used for this research end up contributing in a sustainable way to the construction industry.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Hoff Company for the donation of the rubber material and the Supermix Concreto company for the donation of silica fume for the preparation of concrete. The authors would also like to thank F. A. Santos (technical manager of the LAPA/PUCRS); A. H. Augustin from the IPR/PUCRS; Professor C. P. Bergmann from Laboratory of Ceramic Materials at UFRGS; D. T. Rodeghiero and J. E. Cruz from the Construction Materials Laboratory; and the undergraduate students V. S. Bocchese, F. Cimadon, and J. P. Possebon.

## REFERENCES

- ABNT, 2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, p. 6.
- ABNT, 2009a. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, p. 8.
- ABNT, 2009b. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, p. 6.
- ABNT, 2016. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro.
- ABNT, 2017. Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, p. 16.
- ABNT, 2018. Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, p. 9.
- Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J.L., Hernández, M., 2005. Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures* 71(3), 439-446.
- Andrade, C., Buják, R., 2013. Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Research* 53, 59-67.
- André, A., de Brito, J., Rosa, A., Pedro, D., 2014. Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. *Journal of Cleaner Production* 65, 389-396.
- Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D.L., Tran Le, V.X., 2018. Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production* 172, 1835-1847.
- Balaha, M.M., Badawy, A.A.M., Hashish, M., 2007. Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* 14, 427-435.
- Chou, L.H., Lu, C.-K., Chang, J.-R., Lee, M.T., 2007. Use of waste rubber as concrete additive. *Waste Management & Research* 25(1), 68-76.
- Deshpande, N., Kulkarni, S.S., Pawar, T., Gunde, V., 2014. Experimental investigation on strength characteristics of concrete using tyre rubber as aggregates in concrete. *International Journal of Applied Engineering Research and Development* 4(2), 97-108.
- Elchalakani, M., 2015. High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures* 1, 20-38.
- Erdem, S., Gürbüz, E., Uysal, M., 2018. Micro-mechanical analysis and X-ray computed tomography quantification of damage in concrete with industrial by-products and construction waste. *Journal of Cleaner Production* 189, 933-940.

- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., 2011. Permeability properties of self-compacting rubberized concretes. *Construction and Building Materials* 25(8), 3319-3326.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., İpek, S., 2014. Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials* 73, 19-24.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Özturan, T., 2004. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research* 34(12), 2309-2317.
- Guo, S., Dai, Q., Si, R., Sun, X., Lu, C., 2017. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. *Journal of Cleaner Production* 148, 681-689.
- Gupta, T., Chaudhary, S., Sharma, R.K., 2014. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials* 73, 562-574.
- Gupta, T., Chaudhary, S., Sharma, R.K., 2016. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of Cleaner Production* 112, 702-711.
- Gupta, T., Sharma, R.K., Chaudhary, S., 2015. Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. *International Journal of Impact Engineering* 83, 76-87.
- He, L., Ma, Y., Liu, Q., Mu, Y., 2016. Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete. *Construction and Building Materials* 120, 403-407.
- Helene, P.R.L., Terzian, P., 1992. *Manual de dosagem e controle do concreto*. PINI, São Paulo.
- Huang, B., Shu, X., Cao, J., 2013. A two-staged surface treatment to improve properties of rubber modified cement composites. *Construction and Building Materials* 40, 270-274.
- Kashani, A., Ngo, T.D., Mendis, P., Black, J.R., Hajimohammadi, A., 2017. A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete. *Journal of Cleaner Production* 149, 925-935.
- Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B., 2004. Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research* 34(12), 2283-2289.
- McCarthy, M.J., Dyer, T.D., 2019. 9 - Pozzolanas and Pozzolanic Materials, in: Hewlett, P.C., Liska, M. (Eds.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fifth Edition)*. Butterworth-Heinemann, pp. 363-467.
- Medina, N.F., Garcia, R., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., Raffoul, S., 2018. Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction. *Construction and Building Materials* 188, 884-897.
- Medina, N.F., Medina, D.F., Hernández-Olivares, F., Navacerrada, M.A., 2017. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. *Construction and Building Materials* 144, 563-573.
- Mohammadi, I., Khabbaz, H., Vessalas, K., 2016. Enhancing mechanical performance of rubberised concrete pavements with sodium hydroxide treatment. *Materials and Structures* 49(3), 813-827.
- Mohammed, B.S., Anwar Hossain, K.M., Eng Swee, J.T., Wong, G., Abdullahi, M., 2012. Properties of crumb rubber hollow concrete block. *Journal of Cleaner Production* 23(1), 57-67.
- Nežerka, V., Bílý, P., Hrbek, V., Fládr, J., 2019. Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete. *Cement and Concrete Composites* 103, 252-262.
- Onuaguluchi, O., Panesar, D.K., 2014. Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production* 82, 125-131.
- Ozbas, B., Toki, S., Hsiao, B.S., Chu, B., Register, R.A., Aksay, I.A., Prud'homme, R.K., Adamson, D.H., 2012. Strain-induced crystallization and mechanical properties of functionalized graphene sheet-filled natural rubber. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 50(10), 718-723.
- Pacheco, F., de Souza, R.P., Christ, R., Rocha, C.A., Silva, L., Tutikian, B., 2018. Determination of volume and distribution of pores of concretes according to different exposure classes through 3D microtomography and mercury intrusion porosimetry. *Structural Concrete* 19(5), 1419-1427.
- Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C., Evangelista, L., 2019. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 201, 110-120.
- Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T.A., Bernardin, A.M., 2011. Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production* 19(6), 757-763.
- Pham, N.P., Toumi, A., Turatsinze, A., 2018. Rubber aggregate-cement matrix bond enhancement: Microstructural analysis, effect on transfer properties and on mechanical behaviours of the composite. *Cement and Concrete Composites* 94, 1-12.
- Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L., 2006. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials* 20(10), 858-865.
- Raffoul, S., Garcia, R., Escolano-Margarit, D., Guadagnini, M., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., 2017. Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression. *Construction and Building Materials* 147, 388-397.



- Rashad, A.M., 2016. A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials. *International Journal of Sustainable Built Environment* 5(1), 46-82.
- Romano, R.C.O., Schreurs, H., John, V.M., Pileggi, R.G., 2008. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. *Cerâmica* 54, 456-461.
- Schumacher, G., Juniper, L., 2013. Index, in: Osborne, D. (Ed.) *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. Woodhead Publishing, pp. 731-755.
- Shanmugaraj, A.M., Kim, J.K., Ryu, S.H., 2006. Modification of rubber surface by UV surface grafting. *Applied Surface Science* 252(16), 5714-5722.
- Sharma, N.K., Kumar, P., Kumar, S., Thomas, B.S., Gupta, R.C., 2017. Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials* 151, 158-163.
- Shorbi, M.R., Karbalaie, M., 2011. An experimental study on compressive strength of concrete containing crumb rubber. *Int. J. Civ. Environ* 11(3), 24-28.
- Shu, X., Huang, B., 2014. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials* 67, 217-224.
- Si, R., Guo, S., Dai, Q., 2017. Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. *Construction and Building Materials* 153, 496-505.
- Siddique, R., 2011. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling* 55(11), 923-932.
- Silva, S.R., Andrade, J.J.O., 2017. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. *Construction and Building Materials* 153, 704-715.
- Thomas, B.S., Chandra Gupta, R., 2016. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal of Cleaner Production* 113, 86-92.
- Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J., 2016. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production* 112, 504-513.
- Tian, S., Zhang, T., Li, Y., 2011. Research on Modifier and Modified Process for Rubber-Particle Used in Rubberized Concrete for Road. *Advanced Materials Research* 243-249, 4125-4130.
- Tiwari, A., Singh, S., Nagar, R., 2016. Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: a review *Journal of Cleaner Production* 135(C), 490-507.
- Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J.L., 2007. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: Improvement in cracking shrinkage resistance. *Construction and Building Materials* 21(1), 176-181.
- Vardhan, K., Siddique, R., Goyal, S., 2019. Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble. *Construction and Building Materials* 203, 45-55.
- Wang, X., Xia, J., Nanayakkara, O., Li, Y., 2017. Properties of high-performance cementitious composites containing recycled rubber crumb. *Construction and Building Materials* 156, 1127-1136.
- Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A., Duan, Z., 2018. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production* 188, 720-731.
- Youssif, O., Mills, J.E., Hassanli, R., 2016. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials* 125, 175-183.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram estudados a influência do pré-tratamento químico da borracha do pneu e a adição de sílica ativa nas propriedades físico-mecânicas do concreto. A partir da metodologia empregada e dos resultados obtidos algumas considerações podem ser feitas.

- A substituição de agregado miúdo natural pelo resíduo de borracha de pneus fez com que a porosidade aumentasse 15,93% em relação ao concreto referência. A absorção d'água neste caso é diretamente proporcional à porosidade e inversamente proporcional à massa específica, a qual obteve uma queda de 10,42%.
- As propriedades mecânicas do concreto sempre vão tender a reduzir com o uso de partículas de borracha, independentemente da realização ou não do tratamento. O concreto com 15% borracha não tratada mostrou uma resistência à compressão 20,03% maior aos 63 dias quando comparado ao mesmo traço de borracha tratada.
- Verificou-se que a realização do método proposto de pré-tratamento químico com NaOH não resultou em ganhos significativos nas propriedades físico-mecânicas avaliadas - como apresentado pelos resultados da ANOVA - e, portanto, seria necessária uma melhor compreensão da química e da superfície morfológica das partículas tratadas e a sua conexão com a pasta de cimento.
- O uso de sílica ativa no concreto contribuiu para o preenchimento dos poros causados pelo aumento das partículas de borracha e, assim, tornou a estrutura deste concreto 17,18% menos porosa quando comparado um traço de 30% de borracha sem sílica e o mesmo com

15% de sílica. Os resultados de resistência à compressão para estes tiveram aumento de 22,25% aos 63 dias. Ou seja, a resistência mecânica também melhora com a utilização da sílica ativa.

- O melhor teor de borracha seria o de 15% em substituição ao agregado miúdo e o melhor teor de sílica ativa seria o de 15% em substituição ao cimento Portland, pois juntos obtiveram os melhores resultados nesta pesquisa.

Por fim, é visto que a não necessidade de um tratamento na borracha de pneu faz com que sua utilização seja mais eficaz, rápida e fácil. Podendo ser utilizada como substituto de parte do agregado miúdo em nenhum concreto estrutural. Também, o uso de sílica ativa como substituto do cimento ajuda a reduzir o alto impacto ambiental gerado pelo processo de produção do mesmo. Desta forma, ambos materiais utilizados para a realização desta pesquisa acabam contribuindo de forma sustentável para a indústria da construção civil.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto. Ensaio de Compressão de Corpo-de-Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: Projeto e estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR 8522: Concreto. Determinação dos Módulos Estáticos de Elasticidade e de Deformação à Compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 04/01/2019.

C. ANDRADE, R. BUJÁK. Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Research*, v. 53, p. 59-67, 2013.

A. ANDRÉ, J. DE BRITO, A. ROSA, D. PEDRO. Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 65, p. 389-396, 2014.

ARAUJO; RODRIGUES; FREITAS. *Materiais de Construção: concreto de cimento Portland*. [S.l.]. [20-?].

F. ASLANI, G. MA, D. L.Y. WAN, V.X.T. LE. Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 1835-1847, 2018.

J.E. AUBERT, P. SEGUIA, B. HUSSON, M. MEASSON. A method developed to quantify lime and gypsum consumed by mineral additions. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, i. 7, p. 874-880, 2012.

L.A.F BAUER. Preparo, transporte, lançamento, adensamento e cura. In: BAUER, L. A. F. *Materiais de construção*. Rio de Janeiro. V. 1, p 241-266, 2001.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. Resolução 307, de 5 de julho de 2002: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Publicada no D.O.U. Diário Oficial da União em 17 julho 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 04 jan. 2019.

BRASIL. Lei 12305, de 2 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)

L.L. BRASILEIRO, J.M.E. MATOS. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, v. 61, p. 178-189, 2015.

S.E. CHIDIAC, D.K. PANESAR. Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days. *Cement and Concrete Composites*, p. 63-71, 2008.

S.R. DA SILVA, J.J.O. ANDRADE. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 153, p. 704-715, 2017.

W. DEBOUCHA, N. LEKLOU, A. KHELIDJ, M.N. OUDJIT. Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration. *Construction and Building Materials*, v. 146, p. 687-701, 2017.

J.B.M. DO CARMO. Análise Comparativa Do Desempenho De Concretos Compostos Com Sílica Ativa E Metacaulim Face À Resistência Mecânica E À Viabilidade Econômica. Dissertação de Mestrado. Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

Q. DONG, B. HUANG, X. SHU. Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 116-123, 2013.

X. DURAN, H. LENIHAN, B. O'REGAN. A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling—the case of Ireland. *Resources, Conservation and Recycling*, v.64, n.3, p.302-320, 2006.

M. ELCHALAKANI. High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures*, v. 1, p. 20-38, 2015.

N.N. ELDIN, A.B.SENOUCI. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 5, p. 478-496, 1993.

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

S. GUO, Q.D.R. SI, X. SUN, C. LU. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, P. 681-689, 2017.

E. GÜNEYISI, M. GESOGLU, T. ÖZTURAN. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 12, p. 2309-2317, 2004.

T. GUPTA, S. CHAUDHARY, R.K. SHARMA. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 702-711, 2016.

T. GUPTA, S. CHAUDHARY, R.K. SHARMA. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 562-574, 2014.

T. GUPTA, R. K. SHARMA, S. CHAUDHARY. Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. *Journal of Impact Engineering*, v. 83, p.76-87, 2015.

B. HUANG, G. LI, S.-S. PANG, J. EGGERS. Investigation into waste tire rubber-filled concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 16, p. 187 – 194, 2004.

B. HUANG, X. SHU, J. CAO. A two-staged surface treatment to improve properties of rubber modified cement composites. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 270-274, 2013.

FONSECA, G. S. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. Programa de pós-graduação em construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

IBAMA, 2017. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório de pneumáticos: Resolução Conama nº 416/09: 2017 (ano base 2016) / Diretoria de Qualidade Ambiental. – Brasília: Ibama, 2017.

IPCC, 2019. Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5°C. Disponível em: < [https://www.ipcc.ch/sr15/graphics/#cid\\_603](https://www.ipcc.ch/sr15/graphics/#cid_603)>. Acesso em: 24/03/2019.

G.C. ISAIA. Evolução do Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, p.1-55, 2011.

C. ISHEE. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, p.114-135, 2008.

A. KARPINSKI, A. PANDOLFO, R. REINEHR, JU. KUREK, L. PANDOLFO, J. GUIMARÃES. Gestão diferenciada de resíduos da construção civil uma abordagem ambiental. EDIPUCRS, 2009.

A. KASHANI, T.D. NGO, P. MENDIS, J.R. BLACK, A. HAJIMOHAMMADI. A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 149, p. 925-935, 2017.

N.K. SHARMA, P. KUMAR, S. KUMAR, B.S. THOMAS, R.C. GUPTA. Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. V. 151, P. 158-163, 2017.

Y. LEVY, T.J. ELLIS. A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review. *Support of Information Systems Research. Informing Science Journal*, v.9, 2006.

H. LI, H-G. XIAO, J. YUAN, J. OU. Microstructure of cement mortar with nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, v. 35, i. 2, p. 185-189, 2004.

J.P. LOPES, T. RUDNICK, C.H. MARTINS. Utilização de resíduos industriais para produção de concreto sustentável. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 14, n.2, p. 216-228, 2018.

P.S. LOVATO, E. POSSAN, D.C.C.D. MOLIN, A.B. MASUERO, J.L.D. RIBEIRO. Modelling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 26, p. 437-447, 2012.

V.M. MALHOTRA, P.K. MEHTA. Pozzolanic and cementitious materials. *Advances in Concrete Technology*, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

J.F. MARTIRENA, K.L. SCRIVENER. Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba. *Advances in cement research*, p.323-329, 2015.

P.K. MEHTA, P.J.M. MONTEIRO. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 2ª edição, São Paulo/SP, Editora PINI, 1994.

P.K. METHA, P.J.M. MONTEIRO. Concreto microestrutura, propriedades e materiais. IBRACON, São Paulo, 2008.

N.F. MEDINA, D.F. MEDINA, F. HERNÁNDEZ-OLIVARES, M. A. NAVACERRADA. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. Construction and Building Materials, v. 144, p. 563-573, 2017.

M. MENEGAKI, D. DAMIGOS. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, v. 13, p. 8-15, 2018.

J.H.P. MONTEIRO. Gestão integrada de resíduos sólidos: manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ: IBAM, 2001. p.31. Disponível em: <[http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/01-girs\\_md1\\_1.pdf](http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/01-girs_md1_1.pdf)>. Acesso em: 22/11/2018.

A. NAGALLI. Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. São Paulo: Oficina dos textos, 2014.

D. NAGROCKIENĖ, G. GIRSKAS, G. SKRIPKIŪNAS. Properties of concrete modified with mineral additives. Construction and Building Materials, v. 135, p. 37-42, 2017.

A.M. NEVILLE. Tecnologia do concreto. 2ª edição. Porto Alegre/RS: Bookman. 2013.

A.M. NEVILLE. Propriedades do Concreto. Ed.: PINI. Português, p. 828. 1998.

O. ONUAGULUCHI, D.K. PANESAR. Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. Journal of Cleaner Production, v. 82, p. 125-131, 2014.

ONU. A ONU e o meio ambiente, 2019. Disponível em: <  
<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>>. Acesso em: 09/09/2019.

H.M. OLIVEIRA. Propriedades do concreto endurecido. In: BAUER, L. A. F. Materiais de construção. Rio de Janeiro. V. 1, p. 284-313, 2001.

J. PACHECO, J. DE BRITO, C. CHASTRE, L. EVANGELISTA. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. v. 201, p.110-120, 2019.

J. PARK, R. TUCKER. Overcoming barriers to the reuse of construction waste material in Australia: a review of the literature. International Journal of Construction Management, v. 17, p. 228-237, 2016.

G.D. PEDROZO. Avaliação do uso de agregado miúdo obtido através da Reciclagem De Entulhos em Concreto de Cimento Portland. 70p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2014.

E.G.R. PETRUCCI. Concreto de cimento Portland. São Paulo: Globo. 1998.

F. PELISSER, N. ZAVARISE, T.A. LONGO, A.M. BERNARDIN. Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition. Journal of Cleaner Production, v. 19, p. 757-763, 2011.



C.E. PIERCE, M.C. BLACKWELL. Potential of scrap of tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill. *Waste Management*, v. 23, p. 197-208, 2003.

T.P. PINTO. *Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: A experiência do SindusCon-SP*. São Paulo: Obra Limpa; Sinduscon-SP; I&T, 2005. 48 p. Disponível em:

<[http://www.gerenciamento.ufba.br/Downloads/Manual\\_Residuos\\_Solidos.pdf](http://www.gerenciamento.ufba.br/Downloads/Manual_Residuos_Solidos.pdf)>.

Acesso em: 04/01/2019.

V. RADONJANIN, M. MALEŠEV, S. MARINKOVIĆ, A. E. S. A. MALTYA. Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 47, pp. 1503-1511, 2013.

A.M. RASHAD. A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials. *Journal of Sustainable Built Environment*, v. 5, p. 46-82, 2016.

R.C.O. ROMANO, H. SCHREURS, V.M. JOHN, R. G. PILEGGI. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. *Cerâmica*, v. 54, p.456-461, 2008.

D.M. ROY, G.M. IDORN. Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cement, mortars, and concrete. *Am. Concr. Inst. J.*, 79 , p. 444-457, 1982.

J.C.E. SALAZAR. Diseño de un concreto de alto desempeño para su exposición en un ambiente ácido, predicción de su vida útil y análisis del costo de su ciclo de vida. 1999. Dissertação (mestrado). Especialidad en Ingeniería Civil, acentuación en Ingeniería y Administración de la Construcción)-Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

R.F. SAMPAIO, M.C. MANCINI. Systematic review studies: a guide for careful synthesis of the scientific evidence. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, vo.11, n.1, 2007.

E.A. SANTOS, E.V. BORJA. Investigação experimental de traços para blocos de concreto para alvenaria de vedação com adição de resíduos de pneus reciclados. Artigo científico. 2005. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/57>>. Acesso em: 22/11/2018.

SCIENCE DIRECT. <http://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 22/11/2018.

SCOPUS. <https://www.scopus.com/home.uri>. Acesso em: 22/11/2018.

SCHUMACHER e JUNIPER, 2013. G. Schumacher, L. Juniper, in *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation*, 2013.

N. SEGRE, I. JOEKES. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 1421-1425, 2000.

M.S. SGANDERLA. (Re)aproveitamento dos resíduos classe A da construção civil na substituição parcial do agregado miúdo do concreto. 77p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2015.

R. SI, S. GUO, Q. DAI. Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. *Construction and Building Materials*, v. 153, p. 496-505, 2017.

M. R. SOHRABI, M. KARBALAIE. An Experimental Study on Compressive Strength of Concrete Containing Crumb Rubber. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, v. 11 n.3, 2011.

B.S. THOMAS, R.C. GUPTA, V.J. PANICKER. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, Part 1, p. 504-513, 2016.

B.S. THOMAS, R.C. GUPTA, V.J. PANICKER. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 504-513, 2015.

B.S. THOMAS, R.C. GUPTA, P. MEHRA, S. KUMAR. Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment. *Construction and Building Materials*, v. 83, p. 320-326, 2015.

B.S. THOMAS, R.C. GUPTA. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 86-92, 2016.

A. TIWARI, S. SINGH, R. NAGAR. Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 490-507, 2016.

K. VARDHAN, R. SIDDIQUE, S. GOYAL. Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble. *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 45-55, 2019.

J. XIAO, Z. MA, T. SUI, A. AKBARNEZHAD, Z. DUAN. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 188, p. 720-731, 2018.

J. YING, J. XIAO, V.W.Y. TAM. On the variability of chloride diffusion in modelled recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 732-741, 2013.

O. YOUSSEF, J.E. MILLS, R. HASSANLI. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, v. 125, p.175-183, 2016.

X. WANG, J. XIA, O. NANAYAKKARA, Y. LI. Properties of high-performance cementitious composites containing recycled rubber crumb. *Construction and Building Materials*, v. 156, n. 15, p. 1127-1136, 2017.

H. ZHU, B. RONG, R. XIE, Z. YANG. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, v. 164, p. 644-654, 2018.

## ANEXO A – SUBMISSÃO DO ARTIGO

**De:** JCLP [eesserver@eesmail.elsevier.com]  
**Assunto:** Thank you for your submission to Journal of Cleaner Production  
**Data:** 23 de agosto de 2019 01:34  
**Para:** jairo.andrade@puccs.br, jairo.oliveira.andrade@gmail.com

\*\*\*Automated email sent by the system\*\*\*

Dear Professor Andrade,

Thank you for sending your manuscript: Evaluation of tire rubber surface pre-treatment and silica fume on physical-mechanical behavior and microstructural properties of concrete for consideration to Journal of Cleaner Production. Please accept this message as confirmation of your submission.

When should I expect to receive the Editor's decision?

For Journal of Cleaner Production, the average editorial time (in weeks) from submission to first decision is: 9.73 and from submission to final decision is: 20.35.

What happens next?

Here are the steps that you can expect as your manuscript progresses through the editorial process in the Elsevier Editorial System (EES).

1. First, your manuscript will be assigned to an Editor and you will be sent a unique reference number that you can use to track it throughout the process. During this stage, the status in EES will be "With Editor".
2. If your manuscript matches the scope and satisfies the criteria of Journal of Cleaner Production, the Editor will identify and contact reviewers who are acknowledged experts in the field. Since peer-review is a voluntary service, it can take some time but please be assured that the Editor will regularly remind reviewers if they do not reply in a timely manner. During this stage, the status will appear as "Under Review".

Once the Editor has received the minimum number of expert reviews, the status will change to "Required Reviews Complete".

3. It is also possible that the Editor may decide that your manuscript does not meet the journal criteria or scope and that it should not be considered further. In this case, the Editor will immediately notify you that the manuscript has been rejected and may recommend a more suitable journal.

For a more detailed description of the editorial process, please see Paper Lifecycle from Submission to Publication:  
[http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a\\_id/160/p/8045/](http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/160/p/8045/)

How can I track the progress of my submission?

You can track the status of your submission at any time at <http://ees.elsevier.com/JCLEPRO>

Once there, simply:

1. Enter your username. Your username is: [jairo.andrade@puccs.br](mailto:jairo.andrade@puccs.br)

If you need to retrieve password details, please go to: [http://ees.elsevier.com/JCLEPRO/automail\\_query.asp](http://ees.elsevier.com/JCLEPRO/automail_query.asp)

2. Click on [Author Login]. This will take you to the Author Main Menu
3. Click on [Submissions Being Processed]

Many thanks again for your interest in Journal of Cleaner Production.

Kind regards,  
 Elsevier Editorial System  
 Journal of Cleaner Production

If you require further assistance, you are welcome to contact our Researcher Support team 24/7 by live chat and email or 24/5 by phone: <http://support.elsevier.com>



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria de Graduação  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar  
Porto Alegre - RS - Brasil  
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564  
E-mail: [prograd@pucrs.br](mailto:prograd@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)