

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANGELA VIEIRA NOGUEIRA**

**DANIEL DE OLIVEIRA LOPES**

**ESTUDO DA ANÁLISE DE COMPARAÇÃO DE SÍLICA  
ATIVA E METACAULIM NO TRATAMENTO DE  
AGREGADO GRAÚDO DE CONCRETO RECICLADO –  
PARA REGIÃO DE ANÁPOLIS**

**ANÁPOLIS / GO**

**2021**

**ANGELA VIEIRA NOGUEIRA  
DANIEL DE OLIVEIRA LOPES**

**ESTUDO DA ANÁLISE DE COMPARAÇÃO DE SÍLICA  
ATIVA E METACAULIM NO TRATAMENTO DE  
AGREGADO GRAÚDO DE CONCRETO RECICLADO –  
PARA REGIÃO DE ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADORA: KÍRIA NERY ALVES DO ESPÍRITO  
SANTOS GOMES**

**ANÁPOLIS / GO: 2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

NOGUEIRA, ANGELA VIEIRA/LOPES, DANIEL DE OLIVEIRA.

**Estudo da análise de comparação da sílica ativa e metacaulim no tratamento de agregado graúdo de concreto reciclado** – Para região de Anápolis.

70P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

TCC - UniEVANGÉLICA

Curso de Engenharia Civil.

- |                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| 1. Tratamento                | 2. Sílica ativa |
| 3. Agregado graúdo reciclado | 4. Metacaulim   |
| I. ENC/UNI                   | II. Bacharel    |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NOGUEIRA, Angela Vieira; LOPES, Daniel de Oliveira. **Estudo da análise de comparação da sílica ativa e metacaulim no tratamento de agregado graúdo de concreto reciclado** – Para região de Anápolis. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 70p. 2021.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Angela Vieira Nogueira

Daniel de Oliveira Lopes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Estudo da análise de comparação da sílica ativa e metacaulim no tratamento de agregado graúdo de concreto reciclado – Para região de Anápolis

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2021

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Angela Vieira Nogueira

E-mail: angela.nogueira@hotmail.com



Daniel De Oliveira Lopes

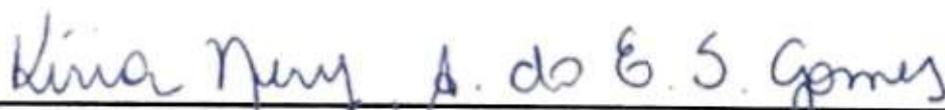
E-mail: Doliv99@outlook.com

**ANGELA VIEIRA NOGUEIRA  
DANIEL DE OLIVEIRA LOPES**

**ESTUDO DA ANÁLISE DE COMPARAÇÃO DE SÍLICA  
ATIVA E METACAULIM NO TRATAMENTO DE  
AGREGADO GRAÚDO DE CONCRETO RECICLADO –  
PARA REGIÃO DE ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

**APROVADO POR:**



**KÍRIA NERY ALVES DO ESPÍRITO SANTOS GOMES, Mestra  
(UniEVANGÉLICA)  
(ORIENTADORA)**



**AURELIO CAETANO FELICIANO, Especialista (UniEVANGÉLICA)  
(EXAMINADOR INTERNO)**



**ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UniEVANGÉLICA)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 27 de Maio de 2021.**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, por ter nos abençoado grandemente com sabedoria e paciência, que fez com que os nossos objetivos fossem alcançados ao longo dos anos de estudo desta graduação, agradeço a Ele por esta glória concedida de mais uma etapa essencial das nossas vidas concluídas.

Aos nossos pais por serem os nossos alicerces, por nunca terem medido esforços para proporcionar um ensino de qualidade, por todo apoio, por cada palavra e gesto de incentivo.

Aos nossos irmãos e familiares pelo apoio e cumplicidade em estarem presentes em todos momentos delicados e felizes de nossas vidas.

Em especial a nossa orientadora Kíria Nery Alves Do Espírito Santo, que não mediu esforços em nos ajudar com mais este aprendizado, e ter desempenhado a sua função com dedicação, carinho e amizade.

A todos da empresa RNV RESÍDUOS, pelo o fornecimento do material reciclado que foram fundamentais para elaboração deste trabalho científico.

## RESUMO

A reciclagem para a produção de agregados vem sendo uma solução econômica, ecológica e cientificamente viável, na tentativa de minimizar os impactos negativos gerados para a natureza e para a sociedade. Os agregados reciclados de concreto possuem características mecânicas e físicas diferentes dos agregados naturais. Para amenizar esses efeitos diversos estudos são realizados de modo que tragam melhorias físicas e mecânicas. O tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto por impregnação de pozolana, com sua facilidade de execução e bons resultados, vem se destacando nos trabalhos científicos. Este trabalho tem o objetivo de realizar um estudo experimental de concreto, produzido através de agregado graúdo de concreto reciclado tratado por impregnação com sílica ativa e metacaulim. Estudando os aspectos de comparação entre eles e avaliando a suas características físicas e mecânicas. Foram produzidos corpos de prova de concreto usando o agregado graúdo reciclado de concreto sem tratamento, agregado graúdo reciclado de concreto com tratamento de sílica ativa, e agregado graúdo reciclado de concreto com tratamento de metacaulim. Os resultados obtidos mostram a comparação entre os três traços de concreto produzidos sendo eles, o traço de concreto de agregado graúdo de concreto sem tratamento, o traço de concreto de agregado graúdo de concreto com tratamento de sílica ativa e com metacaulim. O que obteve melhor resultado quanto a sua resistência mecânica à compressão axial foi o traço de concreto de agregado graúdo de concreto reciclado com tratamento de sílica ativa. A massa específica para os traços de concreto com os tratamentos de sílica ativa e metacaulim, foi inferior em relação ao traço de concreto sem tratamento. Para o ensaio de absorção de água e índice de vazios o traço de concreto de agregado graúdo reciclado de concreto com o tratamento da sílica ativa apresentou uma absorção maior em relação ao traço de concreto com tratamento de metacaulim e sem tratamento. Logo foi analisado que o traço de concreto de agregado graúdo de concreto reciclado com o tratamento de sílica ativa apresentou o melhor desempenho, em relação aos outros traços produzidos. Porém o traço de concreto tratado com metacaulim obteve ótimos resultados. Portanto o tratamento por impregnação do agregado graúdo reciclado de concreto demonstra grande potencial a ser empregado na construção civil.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Metacaulim. Sílica ativa. Agregado graúdo reciclado de concreto. Características físicas. Resistência à compressão axial. Concreto.

## **ABSTRACT**

Recycling for the production of aggregates has been an economical, ecological and scientifically viable solution, in an attempt to minimize the negative impacts generated for nature and society. Recycled concrete aggregates have different mechanical and physical characteristics from natural aggregates. To mitigate these effects several studies are carried out in such a way that they bring physical and mechanical improvements. The treatment of the recycled aggregate of concrete by impregnation of pozzolan, with its ease of execution and good results, has been highlighted in scientific works. This work aims to carry out an experimental study of concrete, produced through a high aggregate of recycled concrete treated by impregnation with active silica and metemolin. Studying the aspects of comparison between them and evaluating their physical and mechanical characteristics. Concrete specimens were produced using the recycled aggregate of untreated concrete, recycled aggregate of concrete with active silica treatment, and recycled aggregate of concrete with metemolim treatment. The results obtained show the comparison between the three concrete traces produced being them, the concrete trace of a single aggregate of untreated concrete, the concrete trace of a concrete aggregate with active silica treatment and metbemtem. The best result of its mechanical strength to axial compression was the concrete trace of a high aggregate of recycled concrete with active silica treatment. The specific mass for concrete traces with the treatments of active silica and metholim, was lower in relation to the untreated concrete trace. For the water absorption and void index assay, the concrete trace of recycled large aggregate concrete with the treatment of active silica showed a higher absorption in relation to the concrete trace with metbepine treatment and without treatment. It was soon analyzed that the concrete trace of a high aggregate of recycled concrete with the treatment of active silica presented the best performance, in relation to the other traits produced. However, the trace of concrete treated with metholim obtained excellent results. Therefore, the impregnation treatment of the recycled large aggregate of concrete demonstrates great potential to be used in civil construction.

### **EYWORDS:**

Metacaulim, silica fume, Coarse recycled concrete aggregate, Physical characteristics, Resistance to axial compression. Concrete

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resistência à compressão com adições minerais .....	27
Figura 2 – Sílica ativa natural, solução aquosa e densificada .....	29
Figura 3 - Média coletada de RCD e RSU no Brasil.....	32
Figura 4 - Tratamento do AGCR por impregnação.....	40
Figura 5 - Agregado graúdo AGCR sem tratamento.....	40
Figura 6 - Agregado graúdo AGCR com tratamento de metacaulim .....	41
Figura 7 - Agregado graúdo AGCR com tratamento usando sílica ativa.....	41
Figura 8 - Peneirador mecânico.....	42
Figura 9 - Materiais utilizados na granulometria de agregado miúdo.....	43
Figura 10 - Equipamentos utilizados no ensaio de massa unitária dos agregados .....	44
Figura 11 - Materiais utilizado na massa específica do AGCR.....	45
Figura 12 - Materiais utilizado no ensaio de massa específica do agregado miúdo.....	46
Figura 13 - Corpo e prova de concreto .....	48
Figura 14 - Corpos de prova submerso na câmara úmida .....	48
Figura 15 - Equipamento do Abatimento tronco de cone.....	49
Figura 16 - Equipamento de resistência à compressão axial .....	50
Figura 17 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural .....	52
Figura 18 - Curva de granulométrica do AGCR.....	53
Figura 19 - Abatimento do concreto sem tratamento .....	54
Figura 20 - Abatimento do concreto com tratamento com sílica ativa.....	54
Figura 21 - Abatimento do concreto com tratamento com metacaulim. ....	55
Figura 22 - Massa específica seca da amostra. ....	56
Figura 23 - Massa específica saturada da amostra. ....	56
Figura 24 - Absorção de água imersa em água.....	57
Figura 25 - Prensa hidráulica universal ensaio de resistência à compressão axial.....	59
Figura 26 - Médias das resistências à compressão axial aos 7 dias.....	61
Figura 27 - Médias das resistências à compressão axial aos 28 dias.....	61

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland .....	18
Quadro 2 - Composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	18
Quadro 3 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características dos agregados .....	21
Quadro 4 - Ensaio característico para agregado miúdo.....	21
Quadro 5 - Ensaio característico para agregado graúdo.....	22
Quadro 6 - Características dos tipos de aditivos.....	23
Quadro 7 - Formas de sílica.....	30
Quadro 8 - Classificação dos resíduos RCD .....	33
Quadro 9 - Uso de agregados reciclados devido a classe .....	34
Quadro 10 - Consumo de materiais em kg/m <sup>3</sup> .....	47

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Dados anuais dos panoramas.....	31
Tabela 2 - Composição do RCD em diversas cidades brasileiras .....	33
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de absorção e massa específica para diferentes agregados	37
Tabela 4 - Resultados dos ensaios da NBR 9778 (ABNT,2009). .....	57
Tabela 5 - Resultados das médias dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios. ....	58
Tabela 6 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova com e sem tratamento .....	60

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA**

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AGCR	Agregado Graúdo De Concreto Reciclado
ARC	Agregado Reciclado De Concreto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RCD	Resíduos de construção e demolição

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS .....	14
<b>1.2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
1.3 METODOLOGIA .....	14
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 CONCRETO .....	17
<b>2.1.1 Cimento .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2 Agregados.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3 Aditivos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.4 Pozolana .....</b>	<b>23</b>
2.1.4.1 Metacaulim .....	25
2.1.4.2 Sílica ativa .....	27
<b>2.1.5 Agregado reciclado de concreto (ARC).....</b>	<b>30</b>
2.1.5.1 Histórico .....	30
2.1.5.2 Definição e potencial produtivo de ARC no Brasil.....	31
<b>2.1.6 Comparativo com agregado natural.....</b>	<b>32</b>
2.1.6.1 Taxa de absorção de água, massa específica seca e índice de vazios.....	36
2.1.6.2 Trabalhabilidade .....	37
2.1.6.3 Resistência à compressão axial.....	37
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS .....	39
3.2 TRATAMENTO POR IMPREGNAÇÃO DE SÍLICA ATIVA E METACAU LIM NO AGCR.....	39
3.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	41
<b>3.3.1 Procedimento experimental.....</b>	<b>42</b>
3.3.1.1 Composição granulométrica dos agregados .....	42
3.3.1.2 Massa unitária dos agregados .....	43
3.3.1.3 Massa específica agregado graúdo. ....	44

3.3.1.4	Massa específica agregado miúdo .....	45
3.4	<b>PRODUÇÃO E MOLDAGEM DO CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO .....</b>	<b>47</b>
3.4.1	<b>Produção dos corpos de prova .....</b>	<b>47</b>
3.4.2	<b>Moldagem dos corpos de prova.....</b>	<b>47</b>
3.5	<b>APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS DO CONCRETO NO SEU ESTADO FRESCO E ENDURECIDO .....</b>	<b>49</b>
3.5.1	<b>Procedimento executivo experimental.....</b>	<b>49</b>
3.5.1.1	Abatimento tronco de cone “slump test.” .....	49
3.5.1.2	Resistência à compressão axial.....	50
3.5.1.3	Massa específica, absorção de água e índice de vazios .....	51
4	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>52</b>
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS. ....	52
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	53
4.2.1	Massa específica, absorção de água e índice de vazios.....	55
4.2.2	Resistência à compressão axial.....	58
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais movimentam a economia no país representando 6,2% do PIB (SEBRAE-SC, 2019). Ações como na geração de empregos, aplicações imobiliárias e construções de mais frentes de trabalhos em outras áreas essenciais da vida. Em contrapartida é o que mais produz lixo, resíduos, gerando o impacto ambiental em toda nossa sociedade. Em 2018 o Brasil produziu 216.629 (toneladas/dia) de resíduos sólidos urbanos (RSU) enquanto a quantidade diária de resíduos de construção e demolição (RCD) foi de 122.012 (toneladas/dia) (ABRELPE, 2019) representando 56,32% da produção diária de resíduos urbanos. Visando amenizar os problemas ambientais, reduzir o consumo de recursos naturais não renováveis, e os custos. Ao longo dos anos os estudos científicos vêm se consolidando como um fator importante na busca de alternativas e soluções. A prática de reutilização e reciclagem dos materiais de construção civil, a renovação da tecnologia construtiva vem amenizando dia após dia, os impactos ambientais gerados pela construção civil. Proporcionando assim uma vida ecologicamente mais sustentável e viável.

A resolução N° 307 do CONAMA (2002) institui parâmetros e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, onde é caracterizado, classificado e determinado o método de manejo. Sendo classificados como “classe A”, os resíduos de construção e demolição oriundos de obras comerciais, residenciais, pavimentação, terraplenagem, fabricação de pré-moldados, blocos cerâmicos e ou cimentícios inclusive também outras obras de infraestrutura, para serem utilizados na produção de agregados graúdos e miúdos (CONAMA, 2002). O não cumprimento correto para o gerenciamento dos resíduos sólidos, que é instituído por meio da Resolução n° 488 do CONAMA (CONAMA, 2012), leva a severa penalidade e multas.

Na intenção de minimizar o impacto ambiental, o resíduo de construção e demolição (RCD) é um material mais nobre a ser reutilizado, podendo ser utilizado na produção de agregados. Porém, o concreto produzido com agregado reciclado de concreto (ARC), possuem propriedades, como o alto teor de porosidade e absorção, que reduz sua aplicabilidade em relação ao concreto produzido com agregado natural. Visando corrigir esse ônus do ARC, devem ser tratados antes de ser reutilizado.

Diversos estudos buscam alternativas para minimizar a absorção de água, entre eles destaca-se o tratamento com pozolana (KATZ, 2004; TAM & TAM, 2008; *apud* KURDA, BRITO & SILVESTRE, 2017). Na tecnologia do concreto a pozolana já é conhecida pelos benefícios que apresentam quando adicionadas no concreto como adição ou substituição parcial do cimento.

Uma das pozolanas mais utilizadas na tecnologia do concreto é a sílica ativa. Decorrente do processo metalúrgico do silício metálico ou ferro silício, é uma das adições minerais mais utilizadas nos concretos, proporcionando a alta reatividade nas primeiras idades, conseqüentemente aumentando sua resistência mecânica iniciais e finais. Além disso busca também diminuir a porosidade e a permeabilidade, melhorando e aumentando a durabilidade do material. A sílica ativa pode agir de duas maneiras: através da ação química com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , resultante da hidratação do cimento, produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), isso faz com que a resistência mecânica do concreto aumente, e, pela ação física pelo efeito *filler*, auxiliando na redução de vazios e aumentando a resistência ao ataque de agente agressivo (HERMANN, 2016, *apud* SANTANA, 2018).

Há também o metacaulim, uma pozolana de alta reatividade, que igual a sílica ativa confere alta resistência mecânica. O metacaulim é constituído basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , gerado durante a hidratação do cimento Portland, formando produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação direta do clínquer Portland. Esta pozolana acelera o processo de hidratação do cimento, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (MEDINA, 2011).

Conforme a norma brasileira NBR 15116 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), no Brasil o uso de agregado reciclado de concreto (ARC) pode ser empenhado na construção civil sem função estrutural. No entanto é de suma importância a realização de pesquisas que contribuam para o reaproveitamento desses agregados, para que atendam as propriedades mecânicas e físicas necessárias.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto é o material mais utilizado na construção civil devido a sua composição. O concreto comum contém de 10 a 15% de cimento e 60 a 80% de agregados por volume, o mundo produz 11 bilhões de metros cúbicos de concreto, que torna o concreto o maior responsável por consumir recursos naturais (ALNAHHAN, 2018, *apud*, NOGUEIRA; LIMA; GOMES, 2020).

Em 2018, no Brasil, a quantidade per capita de RCD foi 0,585 kg/hab./dia (ABRELPE, 2019). A construção civil possui alta demanda de matéria prima de qualidade, e devido ao alto consumo tende a escassez. A construção civil também produz grande quantidade de resíduos, que se descartados de forma errônea podem ser garantia de impacto ambiental. Unindo demanda

por matéria prima, e necessidade de descarte de resíduos de construção civil com menor impacto socioeconômico ambiental possível, a reciclagem para produção de agregados mostra ser uma alternativa eficaz. Sendo necessário buscar meios de produzir concreto de agregado reciclado com características físicas, mecânicas e durabilidade igual ou superior ao produzido com agregado natural.

Atualmente com a evolução dos materiais, com as amplas pesquisas aplicadas na tecnologia do concreto para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade (HELENE & ANDRADE, 2010) abre a possibilidade do reaproveitamento dos RCD em novas dosagens e usos de aditivos em busca da melhoria e adequar as novas tecnologias.

O estudo em questão utilizou-se o método de Katz (2004), tendo como principal justificativa a facilidade de emprego deste método, viabilizando este tipo de tratamento posteriormente na construção civil.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 **Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto, por impregnação de sílica ativa e de metacaulim, no comportamento de produção de novos concretos.

### 1.2.2 **Objetivos específicos**

O objetivo específico deste trabalho visa avaliar e comparar a influência do tratamento com a sílica ativa e do metacaulim, no concreto quanto:

- Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto;
- Trabalhabilidade;
- Resistência à compressão axial.

## 1.3 METODOLOGIA

Para elaboração deste estudo teórico foi realizada uma pesquisa literária em artigos, e monografias, acerca dos tratamentos utilizando materiais pozolânicos, propriamente como a sílica ativa e metacaulim.

A parte experimental do trabalho foi realizada no laboratório de materiais, estruturas e solos da UniEVANGÉLICA. O agregado graúdo de concreto reciclado foi coletado na empresa RNV Resíduos na região de Aparecida de Goiânia- GO. O estudo em questão utilizou o método de Katz (2004), por meio do método de impregnação, onde o AGCR (agregado graúdo de concreto reciclado) foi tratado por meio de impregnação por sílica ativa e metacaulim. Foi realizado traço de concreto com tratamento e sem tratamento. Para a realização do traço foram submetidos aos ensaios de caracterização de cada material utilizado conforme as normas vigentes da ABNT. No concreto no estado fresco foi realizado o ensaio de consistência do concreto como o ensaio de abatimento (slump test.), no estado endurecido os ensaios de resistência à compressão axial, massa específica, absorção de água e índice de vazios.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é desenvolvido em cinco capítulos.

O primeiro capítulo se encontra a introdução onde expõe a motivação para realização deste trabalho, a justificativa, os objetivos, e por fim, a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica, dos assuntos pertinentes ao tema do trabalho, dividida em três partes. Na primeira parte é tratado os constituintes do concreto como as características e os tipos. Na segunda parte da revisão bibliográfica é abordado sobre os materiais pozolânicos, e aprofundado teoricamente o principal tópico dessa pesquisa o metacaulim e sílica ativa. E por fim na terceira parte define-se agregado reciclado de concreto e suas propriedades físicas e mecânicas.

No terceiro capítulo é abordado o programa experimental da pesquisa, de modo a explicar os procedimentos que foram feitos para o tratamento do agregado graúdo de concreto reciclado, a caracterização dos materiais, e os ensaios do concreto em seu estado fresco e endurecidos.

O capítulo quatro é feito uma análise dos resultados obtidos no programa experimental de caracterização física dos agregados e dos ensaios do concreto no estado fresco e endurecidos, através de gráficos, imagens e explicações.

No quinto e último capítulo são apresentadas as comparações dos resultados e a conclusão com base no objetivo da pesquisa e são sugeridos possíveis estudos futuro sobre o tema.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 CONCRETO**

O concreto é caracterizado por ser um material composto constituído de agregados cimento e água podendo conter aditivos (WEIDMANN, 2008; HELENE & ANDRADE, 2010) de grande importância do ponto de vista econômico os agregados ocupam cerca de 80% do concreto e custam por unidade de massa cerca de 20 vezes menos que o cimento.

No processo de formação do concreto a mistura entre aglomerante e água forma a pasta que preenche a maioria dos vazios entre os agregados a mistura enrijece formando um sólido que quando executado adequadamente possui alta estabilidade, contém como característica a capacidade de ganhar resistência com tempo (ANDOLFATO, 2002).

#### **2.1.1 Cimento**

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) cimento Portland é um ligante hidráulico, obtido através da moagem de clínquer Portland, durante a sua fabricação se faz necessária a adição sulfatos de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos na normativa.

O cimento Portland é um material pulverulento, composto por silicatos e aluminatos de cálcio, na presença de água é hidratado e forma o composto com propriedades cimentícias, aumentando assim a resistência mecânica. É constituído principalmente por cal, sílica ativa, óxido de ferro e a alumina, compõem entre 95 a 96% do total da análise de óxidos. O magnésio está nas proporções de 2 a 3% podendo alcançar o máximo de 5%, no Brasil pode chegar até 6,4%, os outros óxidos menores chegam no máximo 1 e em alguns casos 2% (BAUER, 2011; *apud* BETERQUINI; MACHI; DONÁ, 2019).

Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018) os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais identificados por suas siglas, classe de resistência, e podendo conter sufixo RS ou BC, quando for aplicáveis, conforme o Quadro 1, mostra a designação normalizada pela NBR 16697 (ABNT, 2018), sigla e classe do cimento Portland.

**Quadro 1 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland**

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> Ou BC <sup>b</sup>
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland Composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material Pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland Pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI <sup>d</sup>	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	
	Não estrutural	CPB		

Fonte: NBR 16697, ABNT, 2018.

O Quadro 2 estabelece os limites mínimos e máximos admissíveis na composição de cada tipo de cimento.

**Quadro 2 - Composição do cimento Portland (porcentagem de massa)**

(continua)

Designação normalizada	Siglas	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS Ou BC	95 – 100	0 – 5	0 – 5	0 – 5
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10

Quadro 2 - Composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

(continua)

Designação normalizada	Siglas	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material carbonático
<b>Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno</b>	CP II-E	<b>25, 32</b> ou 40	<b>RS</b> <b>Ou</b> BC	51 – 94	6 – 34	<b>0</b>	0 – 15
<b>Cimento Portland composto com material Pozolânico</b>	CP II-Z			71 – 94	0	<b>6 – 14</b>	0 – 15
<b>Cimento Portland composto com material carbonático</b>	CP II-F			75 – 89	0	<b>0</b>	11 – 25
<b>Cimento Portland de alto forno</b>	CP III	<b>25, 32</b> ou 40		25 – 65	35 – 75	<b>0</b>	0 – 10
<b>Cimento Portland Pozolânico</b>	CP IV		<b>RS</b> <b>Ou</b> BC	45 – 85	0	<b>15 – 50</b>	0 – 10
<b>Cimento Portland de alta resistência inicial</b>	CP V <sup>a</sup>	ARI		90 – 100	0	<b>0</b>	0 – 10

**Quadro 2 - Composição do cimento Portland (porcentagem de massa)**

(conclusão)

Designação normalizada		Siglas	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40		75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural		-		50 – 74	-	-	26 – 50

Fonte: NBR 16697 ABNT, 2018

### 2.1.2 Agregados

Agregados são partículas minerais utilizadas para agregar e adicionar volume a mistura podendo ser classificados quanto ao diâmetro, em agregados graúdos ou miúdos (PINHEIRO, 2007). São materiais inertes que constituem de 60 a 80 % da massa total do concreto, sua utilização apresenta grande sentido econômico visto que os agregados custam menos que a pasta (ANDOLFATO, 2002).

Os agregados são regulamentados pela NBR 7211 (ABNT 2009) que define como agregado miúdo, aquele cujo grão passa pela peneira de 4,75 mm, e fica retido na peneira de 150 µm. O agregado graúdo é aquele que passa pela peneira de 75 mm, e fica retido na peneira de 4,75 mm. Ao utilizar os agregados, é essencial observar suas características, quanto ao impacto que as propriedades dos agregados graúdos, e, miúdos têm sobre o concreto. A relação entre características dos concretos, e agregados seguem listadas no Quadro 3.

Segundo a NBR 7211 (ABNT 2009) os agregados podem ser naturais, isto é, extraídos da natureza sendo provenientes da britagem de rochas que são beneficiados, e distribuídos em graúdos e miúdos, ou a junção de agregados britados com areia natural ou britada.

Tem - se a possibilidade do uso de agregado reciclado, isto é, de origem atribuída a material de reciclagem. Os agregados reciclados são regulamentados pela NBR 15115 (ABNT, 2004) que os define como material obtido da britagem de resíduos da construção civil e classificado como resíduos “classe A” pela resolução CONAMA n° 307/2002.

**Quadro 3 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características dos agregados**

<b>Propriedade do concreto</b>	<b>Características dos agregados</b>
Resistência mecânica	Resistência mecânica e sanidade Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Granulometria Módulo de elasticidade Coeficiente de Poisson
Resistência à derrapagem	Tendência ao polimento (abrasão) Textura superficial
Economia	Forma dos grãos Textura superficial Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

Fonte: SBRIGHI NETO, 2000 *apud* WEIDMANN, 2008 (Adaptado).

Os limites da composição granulométrica dos agregados graúdos, e da distribuição granulométrica dos agregados miúdos, são definidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Define o módulo de finura e dimensão máxima característica para uso em concreto. Outras importantes características dos agregados são encontradas nos ensaios para agregado miúdo e graúdo, respectivamente listados no Quadro 4 e no Quadro 5, fornecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

**Quadro 4 - Ensaios característicos para agregado miúdo**

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Método</b>
Massa específica	ABNT NBR NM 52
Massa unitária	ABNT NBR 7251
Absorção de água	ABNT NBR NM 30
Inchamento	ABNT NBR 6467
Teor de partículas leves	ABNT NBR 9936
Umidade superficial	ABNT NBR 9775

Fonte: ABNT, 2009

**Quadro 5 - Ensaios característicos para agregado graúdo**

<b>Determinação</b>		<b>Método</b>
<b>Propriedades físicas</b>	Massa específica absoluta e aparente e absorção de água	ABNT NBR NM 53
	Ciclagem natural	ABNT NBR 12695
	Ciclagem artificial água – estufa	ABNT NBR 12696
	Ciclagem com etileno glicol	ABNT NBR 12697
	Teor de partículas leves	ABNT NBR 9936
<b>Propriedades físicas</b>	Umidade total	ABNT NBR 9939
<b>Propriedades mecânicas</b>	Módulo de deformação estático e coeficiente de Poisson de rochas	ABNT NBR 10341
	Resistência ao esmagamento	ABNT NBR 9938
	Desgaste por abrasão	ABNT NBR 12042
	Resistência à compressão da rocha	ABNT NBR 6953

Fonte: ABNT, 2009.

### 2.1.3 Aditivos

Aditivos são substâncias capazes de modificar as características dos concretos e argamassas quando adicionadas a mistura de aglomerantes e agregados. Seu uso tem como objetivo aprimorar características dos aglomerantes e da mistura (CORRÊA, 2010). Os aditivos são regulamentados pelas NBR 11768, partes 1, 2 e 3 (ABNT, 2019) e por ela divididos nos tipos:

- a) tipo P - aditivo plastificante;
- b) tipo R - aditivo retardador;
- c) tipo A - aditivo acelerador;
- d) tipo PR - aditivo plastificante retardador;
- e) tipo PA - aditivo plastificante acelerador;
- f) tipo IAR - aditivo incorporador de ar;
- g) tipo SP - aditivo superplastificante;
- h) tipo SPR - aditivo superplastificante retardador;
- i) tipo SPA - aditivo superplastificante acelerador.

Os efeitos dos aditivos sobre o concreto variam devido ao tipo de aditivo, sendo eles os aditivos plastificantes, superplastificante e hiper plastificantes redutores de água. Os aditivos retardadores e aceleradores de pega são modificadores de pega (FERREIRA, 2020). Conforme o Quadro 6, apresenta o tipo e efeito de cada aditivo.

**Quadro 6 - Características dos tipos de aditivos**

<b>Tipos</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Plastificante</b>	Aumento do índice de consistência Redução do consumo de água ( $\geq 5\%$ )	Maior trabalhabilidade	Quantidades excessivas retardam o tempo de pega e podem causar segregação.
<b>Superplastificante</b>	Grande aumento índice de consistência Redução do consumo de água ( $\geq 12\%$ )	Maior resistência e trabalhabilidade; melhor lançamento adensamento e acabamento; menor retração e maior durabilidade.	Risco de segregação efeito do fluidificante se dá em tempo menor que o plastificante pode elevar a perda de consistência.
<b>Incorporador de ar</b>	Incorpora pequenas bolhas de ar	Maior durabilidade ao congelamento Menor teor de água menor permeabilidade	Controle cuidadoso do teor de ar incorporado (%) e do tempo de mistura.
<b>Acelerador de pega</b>	Pega mais rápida maior resistência inicial	Maior resistência em baixas temperaturas menor tempo de desenforma	Risco de fissuração térmica e corrosão de armaduras.
<b>Retardador de pega</b>	Maior tempo de início de pega	Maior temperatura, retarda a elevação do calor de hidratação e maior tempo de aplicação.	Risco de exsudação, maior retração plástica.
<b>Plastificante e retardador</b>	Efeito combinado (plastificante + retardador)	Menor perda de consistência em climas quentes e úmidos.	Maior exsudação e retração plástica, risco de segregação.
<b>Plastificante e acelerador</b>	Efeito combinado (plastificante + acelerador)	Menor quantidade de água, ganho mais rápido de resistência.	Risco de corrosão de armaduras.

Fonte: Ferreira, 2020.

#### 2.1.4 Pozolana

É uma adição mineral com propriedade pozolânica, que pode ser adicionada no concreto como substituição parcial do cimento ou como adição em teores que variam conforme a massa de cimento (SILVEIRA, 1996, *apud* SANTOS, 2006).

São definidos como material silicoso ou silicoaluminoso que, quando finamente dividida em contato com a água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. NBR 12653 (ABNT, 2015).

Segundo Fusco (2008) os materiais classificados como pozolanas apresentam sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em sua composição, a qual, quando moída e em contato com a cal, atua como ligante hidráulico. Para que reajam nas misturas, é preciso que sejam moídas com finura na ordem de  $6000\text{cm}^2/\text{g}$ .

As pozolanas são divididas entre naturais e artificiais NBR 12653 (ABNT, 2015).

Naturais – Provenientes de rochas ou minerais vulcânicos, que passam por diversos processos até chegar ao produto final. As erupções vulcânicas sofrem um resfriamento bruto quando na atmosfera, formando, uma substância com alto teor caráter vítreo ou amorfo. Para tornar-se pozolana, o material é britado, moído, classificado e, na maioria das vezes, ser termicamente ativado. (CORDEIRO,2009).

Artificiais – são definidas como materiais sem destinação final e subprodutos de indústrias agrícolas, de diversas origens, equiparando-se por possuir atividade pozolânica (TASHIMA,2006). São exemplos as escórias de alto forno, as cinzas volantes provenientes de centrais termoelétricas, sílica ativa e cinza da casca de arroz.

Em meados da década de 60, algumas adições minerais passaram a ser utilizadas com o objetivo de se obter concretos de alto desempenho. Esta aplicação, além do bom resultado relacionado à durabilidade, também proporcionou às estruturas elevados valores de resistência, fazendo com que se começasse a utilizar estes materiais com o intuito de se obter concretos de alta resistência (METHA & MONTEIRO, 2014, *apud*, NOGUEIRA; LIMA; GOMES, 2020).

O contato do cimento com a água provoca o processo de hidratação dos seus componentes, notadamente o silicato de tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), em que liberam hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em elevada quantidade, equivalendo a 25% dos compostos hidratados (METHA & MONTEIRO, 2014, *apud*, NOGUEIRA; LIMA; GOMES, 2020).

A sílica amorfa ( $\text{SiO}_2$ ) das pozolanas reage com os hidróxidos de cálcio, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). A essa reação, chama-se de reação pozolânica (METHA & MONTEIRO, 2014, *apud*, NOGUEIRA; LIMA; GOMES, 2020).

Pozolana + hidróxido de cálcio + água  $\rightarrow$  C-S-H.

Segundo Andrade (2017) o excelente resultado na atividade pozolânica desses materiais fez com que fossem denominadas adições minerais altamente reativas. Atualmente, como principais pozolanas altamente reativas em uso no concreto ou em materiais cimentícios,

têm-se a sílica ativa, o metacaulim e a cinza da casca de arroz com queima controlada. Para serem classificados como pozolana de alta reatividade deve combinar dois fatores: elevado teor de  $\text{SiO}_2$ , sendo essencialmente não-cristalina, e uma elevada área superficial específica.

#### 2.1.4.1 Metacaulim

É uma pozolana altamente reativa de origem mineral, obtido por processo industrial através da ativação térmica entre  $600^\circ\text{C}$  e  $850^\circ\text{C}$  do caulim. É um material amorfo, ou seja, de estrutura cristalina desordenada (ROCHA *et al.*, 2017).

No Brasil a utilização de argilas calcinadas para fins pozolânicos foi à construção da barragem Jupuíá, finalizada em 1974. A pozolana produzida nesta barragem, inicialmente era seca ao sol e depositadas em áreas cobertas. Posteriormente o material era homogeneizado, e, com o auxílio dos gases de exaustão do forno, sofria uma pré-calcinação à temperatura de  $200^\circ\text{C}$ . Posteriormente o material era então encaminhado ao forno rotativo com temperatura de queima de  $750^\circ\text{C}$  e rotação de 4 a 4,5 rotação por minuto. Após a calcinação o produto era resfriado bruscamente para evitar a recristalização do material e manter a máxima reatividade da pozolana. Finalmente, o produto era moído até a finura de  $8500 \text{ cm}^2/\text{g}$ , sendo a produção da ordem de 240 ton./dia. (ANDRIOLO, 1975 *apud*, MEDINA, 2011).

A adoção do metacaulim utilizado na usina de Jupuíá serviu de referencial para que fosse empregada na construção de outras importantes barragens (Ilha solteira, Capivara, Água Vermelha). Nessas obras a pozolana substituíu entre 20% do volume do cimento nos concretos estruturais.

Segundo Saad *et al* (1982 *apud* MEDINA, 2011) os benefícios advindos dessa prática, podem ser resumidos nos seguintes itens:

- Redução efetiva da expansão devido à reação álcali-agregado.
- Os concretos contendo 10%, 30% e 50% dessa pozolana apresentaram os mesmos valores de resistência à compressão aos três meses. Após um ano de hidratação, os cimentos com 50% de adição superaram as resistências dos cimentos puros (sem adição de pozolana).
- Ocorreram melhorias na plasticidade e no controle da exsudação do concreto.

O metacaulim é constituído basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gerado durante a hidratação do cimento Portland, formando produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação direta

do clínquer Portland. Esta pozolana acelera o processo de hidratação do cimento, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (MEDINA, 2011).

Em concretos com metacaulim ocorrem, os efeitos filler e de densificação da zona da transição, devido à elevada finura deste material. Além disso, pode substituir parte do cimento Portland, de acordo com a sua reatividade.

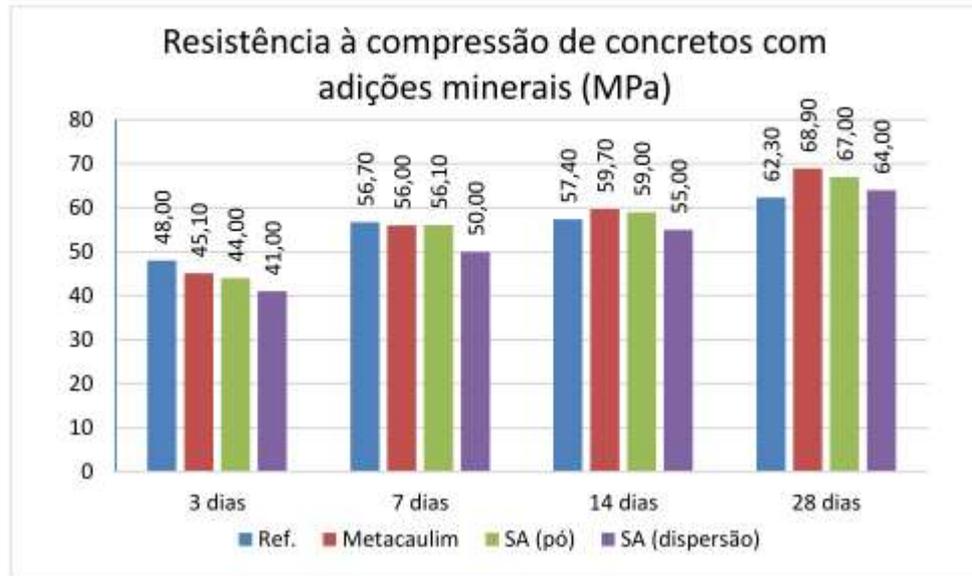
Essas contribuições conferem propriedades especiais relacionadas tais como: aumento da resistência mecânica à compressão e à flexão, redução da porosidade, da permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos, aumento da resistência à de fusibilidade de íons de cloreto, mitigação da reação álcali agregado, redução da ocorrência de eflorescências, aumento da resistividade elétrica (DETWILER *et al.*, 1996, *apud* SIDDIQUE & KLAUS, 2009).

Atualmente a produção no Brasil, em escala industrial, segue o processo adotado na produção de pozolana para a Barragem de Jupia, com a calcinação em fornos rotativos, e moagem após o resfriamento.

Em 2010 entrou em vigor a norma NBR 15894 Metacaulim para usos com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta (ABNT, 2010), visando estabelecer diretrizes sobre especificação e métodos de ensaios, com o objetivo de definir requisitos físico-químicos e os critérios de conformidade para uso do metacaulim e garantir que atenda aos requisitos e seja uma pozolana de alta reatividade. Assim, sua interação física e química com o cimento Portland modifica a reologia do concreto, argamassa ou pasta, no estado fresco e confere propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido (MEDINA, 2011).

Andrade *et al.* (2010) em sua pesquisa estudaram a substituição de sílica ativa em pó, sílica ativa em dispersão aquosa e metacaulim em substituição a parte do cimento por 8%. O uso dessas adições proporcionou aumento da resistência à compressão e trabalhabilidade em relação ao concreto sem a adição mineral. O concreto com metacaulim é o que apresentou melhor desempenho quanto a resistência à compressão aos 28 dias, como mostra a Figura 1

**Figura 1 - Resistência à compressão com adições minerais**



Fonte: ANDRADE, 2010.

#### 2.1.4.2 Sílica ativa

Ligas compostas por silício são produzidas em fornos de arco elétrico (LINTZ, 1997), a sílica ativa também conhecida como sílica fume ou micro sílica. Sendo um subproduto da produção de ligas de ferrosilício e do silício metálico, possui alta área superficial (NITA; JOHN, 2007). Onde a redução do quartzo silício produz vapores de (SiO), que se oxidam em contato com o ar e condensam na zona de baixa temperatura do forno em partículas esféricas minúsculas, formando o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), que são removidas através de filtragem dos gases expelidos, por filtros mangas e embalados para venda e utilização, pode apresentar cor do cinza ao escuro devido aos teores carbono (DAL MOLIN, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008 *apud* BIANCHINI, 2010).

É composta por sílica amorfa SiO<sub>2</sub> cujo teor varia entre 85 e 90 %, tem como efeitos sobre concreto a redução do Ph, aumentando a relação água cimento que se revela como uma grande desvantagem, porém tem também efeitos positivos sendo eles o aumento da resistência entre 10 e 40 %. A sílica ativa pode ser encontrada com cores variando entre tons de branco, cinza e dependendo dos teores de ferro e carbono marrom (FERREIRA, 2020).

Segundo Moraes e Lopes (2010), a sílica ativa possui partículas esféricas, com diâmetro médio de 0,1  $\mu\text{m}$ , massa específica entre 15 e 25 m<sup>2</sup>/ Kg. Sua área específica é de 13 a 20 vezes maior do que a área específica de outros materiais pozzolânicos, sendo que numa substituição de 15% de cimento por sílica ativa, existem cerca de 2.000.000 partículas de sílica

ativa para cada grão de cimento (COSTA FILHO, 2005). Em comparação a granulometria do cimento pode chegar a ser cem vezes menor, por ser um material de partículas muito fina consegue preencher todos os vazios existentes entre as partículas maiores de cimento, produzindo assim uma microestrutura mais densa, e com menor índice de vazios no concreto. Podem ser utilizadas em teores de 5% 10% a 15% sobre a massa de cimento, nessas proporções a sílica ativa pode trazer melhorias na trabalhabilidade da mistura de concreto no estado fresco, portanto as proporções superiores a 15% aumentam o consumo de água, podendo ocorrer o efeito afastamento, onde as partículas maiores afastam as menores, resultando o aumento do volume de vazios (HERMANN *et al*, 2016 *apud* SANTANA, 2018).

O primeiro registro do uso da sílica ativa adicionado ao cimento Portland foi em 1952, porém o uso era limitado até a década de 1970, devido se tratar de um material pulverulento, grande parte era disperso na atmosfera em meio a fumaça (GAPINSKI; SCANLON, 2006).

De acordo com Gapinski e Scanlon (2006), em 1970 leis ambientais rígidas obrigaram as fábricas a regulamentarem o descarte de resíduos, e com isso os resíduos de alto forno, e as pozolanas, passaram a ser retidas em maiores quantidades e seus descartes não podem ser no meio ambiente. Com isso o uso e as pesquisas com pozolanas cresceu.

Os primeiros indícios do uso da sílica ativa para a melhoria das propriedades do concreto foram nos meados de 1980, as razões convergem na necessidade da produção de concreto mais impermeável, protegidos contra a ação de cloretos. Sendo utilizados em ambientes marítimos como pontes, viabilizando grandes construções e estruturas de edifícios com concretos mais resistentes. (MORAES, LOPES, 1996 *apud* KUENNEN, 2010)

As pozolanas de alta reatividade têm como efeito a queda dos índices de carbonatação (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2018). Porém é necessária a precaução quanto ao uso da sílica ativa em concreto armado ou protendido, devido a possibilidade de aumento na carbonatação, apresentado no estudo de Possan (2004).

Segundo a Tecnosil (2020), a sílica ativa confere maior resistência a intempéries, segundo a Diprotec (2020) maior resistência mecânica e química. A Novakem (2020) afirma que a sílica ativa melhora as propriedades do estado endurecido do concreto.

Çakır e Sofyanlı (2014) constataram, a partir da adição de sílica ativa no concreto produzido com agregado reciclado, que para as quantidades ensaiadas com adição de sílica para 5 e 10%, o ganho de resistência se comparado ao concreto sem tratamento, foi respectivamente de 17 e 19% para o ensaio de resistência mecânica na idade de 28 dias.

A sílica ativa incorporada ao concreto tem a capacidade de reduzir os vazios através de reação química e também do efeito microfiller, essas propriedades conferem ao concreto alta resistência a agressivos externos (HERMANN *et al.*, 2016).

O efeito microfiller é causado pela grande finura do material que produz um melhor empacotamento dos sólidos, preenchendo os vazios entre os grãos de cimento. Contribuindo também para o crescimento de hidratação do cimento, o crescimento dos cristais ocorre a partir dos grãos de cimento e dos grãos de sílica ativa. A segunda deve-se a reação da sílica com o hidróxido de cálcio (C - H) produzido pela reação do cimento, que gera silicato de cálcio hidratado (C - S - H) (BIANCHINI, 1997 *apud* NEVILLE, 2010).

A sílica ativa é acessível no âmbito comercial nas formas natural tradicional, em forma de lama solução aquosa, densificada, pré-misturada ao cimento (FERREIRA, 2020) e pelotizada, segundo Sugamoto (2007). Segundo AECweb (2020) a sílica ativa em seu estado tradicional em pó confere quando utilizada em adição ao concreto, maior resistência à compressão, durabilidade, e maior coesão nos produtos aplicados. Em solução aquosa, além dos benefícios já citados conferidos pela sílica em pó, proporciona produção de alto desempenho, maior impermeabilidade, redução da exsudação e da segregação, elevado aumento das resistências mecânicas iniciais e finais, e maior coesão nos produtos aplicados. Os tipos de sílica encontrados conforme a Figura 2 em suas características apresentadas na Figura 3

**Figura 2 – Sílica ativa natural, solução aquosa e densificada**



Fonte: FERREIRA, 2020.

Quadro 7 - Formas de sílica

(continua)

Formas de sílica encontradas e características e descrição			
Tipo de sílica ativa	Descrição	Vantagens	Desvantagens
<b>Natural</b>	Pó muito fino baixa massa específica (192 a 300 Kg/m <sup>3</sup> )	Muita facilidade de dispersão na mistura da pasta de concreto	Difícil transporte e manuseio devido ao baixo peso pode se dispersar com vento

Quadro 7 - Formas de sílica

(continua)

Formas de sílica encontradas e características e descrição			
Tipo de sílica ativa	Descrição	Vantagens	Desvantagens
<b>Densificada</b>	A sílica ativa natural é compactada para galho de densidade (500 a 700 Kg/m <sup>3</sup> )	Facilidade de transporte e manuseio em relação a natural	Menor facilidade de dispersão na mistura da pasta de concreto em relação a natural
<b>Forma de lama</b>	A sílica ativa pré-misturada em água com teores de 40 a 60% da massa, massa específica aparente de 1300 kg/m <sup>3</sup> a 1400 kg/m <sup>3</sup> .	Elimina a dispersão da sílica no ar fácil manuseio	Difícil controle da relação sólido e água
<b>Pelotizada</b>	Similar à sílica ativa densificada, porém é obtida com a adição de pequena quantidade de água suficiente para produzir micro pelotas com massa específica aparente em torno de 700 kg/m <sup>3</sup> .	Facilidade de transporte e manuseio em relação a natural	Muita dificuldade no uso devido a dureza e dimensões das pelotas formadas perde muito em trabalhabilidade s
<b>Pré-misturadas ao cimento</b>	Mistura de 6,5 a 8 % de sílica ativa (natural, densificada ou pelotizada) ao cimento	Fácil controle de dosagem	*

Fonte: SUGAMOSTO, 2007.

## 2.1.5 Agregado reciclado de concreto (ARC)

### 2.1.5.1 Histórico

As gerações de resíduos de construção existem desde primeiras construções registradas, em meados do Império Romano. Porém em 1928 foram realizados os primeiros estudos sobre as propriedades qualitativas dos agregados provenientes de resíduos reciclados, e a primeira grande utilização registrada ocorreu na reconstrução das cidades no pós-guerra em 1946. Apesar dos estudos sobre o assunto, o uso e produção de ARC ainda não são largamente empregados (LEVY, 2000).

#### 2.1.5.2 Definição e potencial produtivo de ARC no Brasil

Agregados oriundos da reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) entulhos, restos de obras industriais, residenciais e de infraestrutura, o reuso e reciclagem é regulamentada pela resolução N° 307 do CONAMA (2002) e pelas NBR 15115 (ABNT, 2004) NBR 15116 (ABNT, 2004).

O RCD é o responsável por 60% do total de Resíduos Sólidos Urbanos RSU, e de seu total é possível reaproveitar 70% (ABRECON, 2011). A quantidade de RCD também pode ser estimada a partir das atividades construtivas sendo 0,15 toneladas por metro quadrado ou ainda adquirido por informações fornecidas pelos órgãos institucionais e empresas coletoras (PINTO, 1999). A partir dos panoramas da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) que foram compilados na Tabela 1, nota-se que a relação RCD/RSU compreende-se entre 53 e 63%, em média 60,42 %.

**Tabela 1 - Dados anuais dos panoramas**

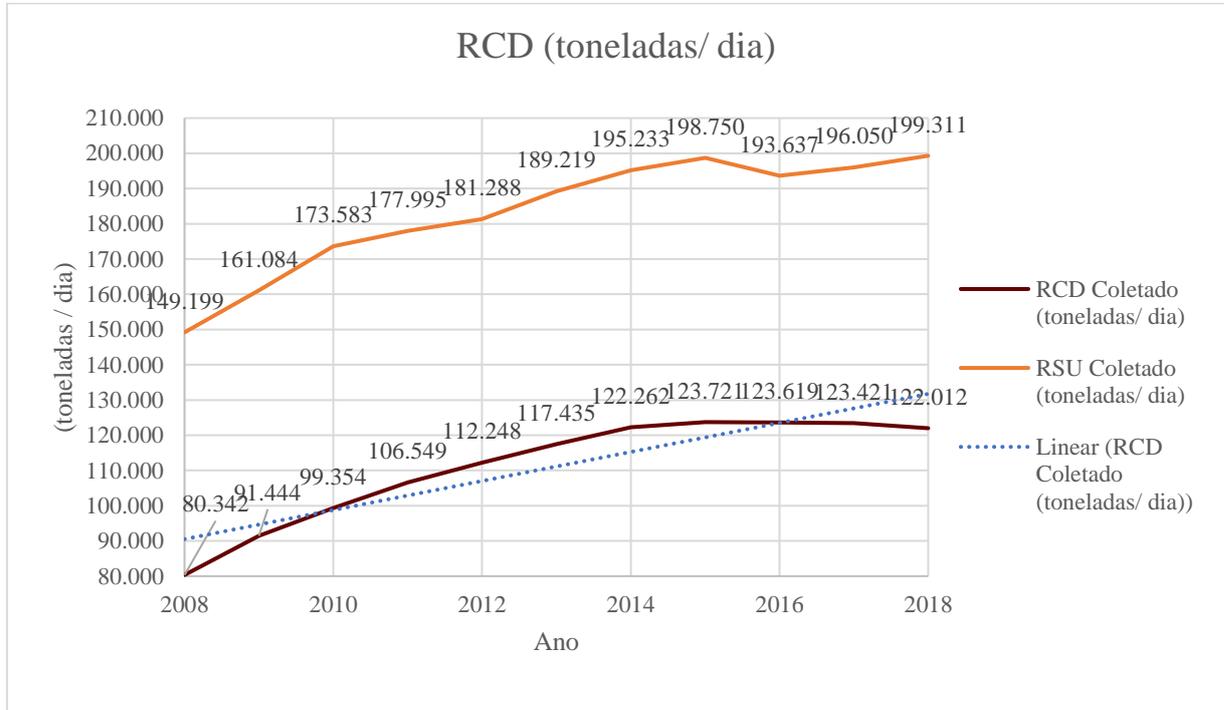
<b>COLETA RCD NO BRASIL DE 2008 A 2018</b>											
<b>ANO</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
<b>RSU</b>											
Coletado (toneladas/dia)	149.199	161.084	173.583	177.995	181.288	189.219	195.233	198.750	193.637	196.050	199.311
<b>RCD</b>											
Coletado (toneladas/dia)	80.342	91.444	99.354	106.549	112.248	117.435	122.262	123.721	123.619	123.421	122.012
coleta per capita kg/hab./dia	0,512	0,576	0,618	0,656	0,686	0,584	0,603	0,605	0,600	0,594	0,585
relação RCD/RSU %	53,85%	56,77%	57,24%	59,86%	61,92%	62,06%	62,62%	62,25%	63,84%	62,95%	61,22%

Fonte: ABRELPE, 2008 a 2018.

Foi identificada tendência de aumento na quantidade de RSU e RCD representada através de gráfico na Figura 3. Considerando a tendência de aumento, e a média de produção

dos anos de 2008 a 2018 no valor 111.121 toneladas/dia, a necessidade de destinação adequada dos RCD e disponibilidade de recursos para produção de ARC mostraram-se evidenciadas.

**Figura 3 - Média coletada de RCD e RSU no Brasil**



Fonte: ABRELPE, 2008-2018.

### 2.1.6 Comparativo com agregado natural

Quanto a produção em geral, o maquinário necessário para produção do agregado reciclado de concreto é praticamente o mesmo utilizado para produção de agregado natural, por meio de britagem (LIMA, 1999).

Para concretos de mesma resistência, o concreto de agregado reciclado apresenta maior taxa de absorção de água, fluência, retração do concreto, menor massa específica e módulo de elasticidade. (GONÇALVES, 2001), características que podem justificar-se pela maior porosidade do agregado reciclado em comparação com agregado natural.

Quanto aos diâmetros máximos característicos, enquanto agregados miúdos reciclados apresentaram dimensões maiores que os naturais, agregados graúdos reciclados possuem em média diâmetros menores que seus equivalentes de origem natural (GONÇALVES, 2001).

Os agregados reciclados têm características físicas e químicas que variam com sua composição. Cabral (2007) fez um levantamento das composições de agregados reciclados em cidades brasileiras apresentadas em estudos anteriores conforme a Tabela 2.

**Tabela 2 - Composição do RCD em diversas cidades brasileiras**

Constituintes	são Carlos/SP (a)	São Paulo/SP (b)	Porto Alegre/RS (C)	Ribeirão Preto/SP (d)	Salvador/BA (e)	Campina Grande/PB (f)	Maceió/AL (g)
Argamassa	63,67%	25,2%	44,2%	37,4%		28%	27,82%
Concreto	4,38%	8,2%	0,18,3	21,1%	53,0%	10%	18,65%
Material cerâmico	29,09%	29,6%	35,6%	20,8%	9,0%	34%	48,15%
Cerâmica polida	0,39%	-	0,1%	2,5%	5,0%	1%	3,06%
Rochas, solos	0,13%	32%	1,8%	17,7%	27,0%	9%	-
Outros	2,34%	5%	-	0,5%	6,00%	18,00%	2,32%

(a) PINTO, 1986 (b) BRITO FILHO, 1999 (c) LOVATO, 2007

( d) ZORDAN,1997 (e) QUADROS e OLIVEIRA, 2001

(f) NÓBREGA, 2002 (g) VIEIRA, 2003.

Fonte: CABRAL, 2007.

A importância da caracterização e conhecimento da composição dos RCD na geração do ARC foi exemplificada por Souza; Assis; Souto (2013), que compararam os resultados de Cabral (2007), que obteve perda de resistência no concreto produzido com ARC. Em comparação concreto de material convencional, com os de Hansen (1992, *apud* SOUZA; ASSIS; SOUTO, 2013) que obteve ganho de resistência quando usado o ARC como substituição ao agregado natural.

Conforme Lima (1999), a classificação de um agregado reciclado de concreto é de acordo com a classificação do RCD de origem. A divisão dos RCD pode ser estabelecida em 6 classes, sendo elas apresentadas no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Quadro 8, e os potenciais usos por classe no Quadro 9.

**Quadro 8 - Classificação dos resíduos RCD**

(continua)

Classe		Descrição
<b>Classe 1</b>	Resíduo de concretos sem impurezas	Composto exclusivamente de concreto
<b>Classe 2</b>	Resíduo de alvenaria sem impurezas	Composto por todos os materiais inertes do RCD presentes na cerâmica, alvenaria e concreto.

<b>Classe 3</b>	Resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas	Alternativa à classe 2, porém o agregado reciclado possui qualidade um pouco melhor para produção de concretos e pré-moldados de concreto.
-----------------	--	--

**Quadro 8 - Classificação dos resíduos RCD**

(conclusão)

Classe		Descrição
<b>Classe 4</b>	Resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação	O agregado produzido a partir deste não confere alta resistência porém pode ser empregado em pavimentação.
<b>Classe 5</b>	Resíduo composto de terra e vegetação	Não produz agregado pode ser usado para aterros.
<b>Classe 6</b>	Resíduo com predominância de material asfáltico	Composto por resíduos de pavimentação e pode ser utilizado para pavimentação.

Fonte: LIMA, 1999.

**Quadro 9 - Uso de agregados reciclados devido a classe**

(continua)

<b>Adequação de agregados reciclados (a partir de resíduos das classes propostas) a alguns usos potenciais</b>					
Uso	Classe				
	1	2	3	4	6
Concreto estrutural armado	P	NI	NI	V	V
Concreto simples de baixo consumo	P	P	P	V	V
Chapisco	P	P/FI	P/FI	V	V
Emboço interno ou externo	P	P	P	V	V
Reboco interno ou externo	P	P/FI	P/FI	V	V
Assentamento de componentes de alvenaria estrutural	P	P/FI	P/FI	V	V
Assentamento de componentes (alvenaria de vedação)	P	P	P	V	V
Assentamento de revestimentos cerâmicos	P	P/FI	P/FI	V	V
Revestimento de pisos com argamassa	P	P/FI	P/FI	V	V
Fabricação de pequenos componentes para alvenaria de vedação	P	P	P	V	V
Fabricação de pequenos componentes para alvenaria estrutural	P	P/FI	P/FI	V	V

Fabricação de briquetes para pavimentação	P	P	P	V	V
Fabricação de tubos e outros componentes para infraestrutura	P	P	P	V	V
Gabião	P	P/FI	P/FI	V	NI

**Quadro 9 - Uso de agregados reciclados devido a classe**

(conclusão)

<b>Adequação de agregados reciclados (a partir de resíduos das classes propostas) a alguns usos potenciais</b>					
<b>Uso</b>	<b>Classe</b>				
Camadas drenantes	P	P	P	V	V
Cobertura de aterros	P/AE	P/AE	P/AE	P	NI
Rip-rap	P/AE	P/AE	P/AE	P	NI
Sub-base para pavimentação	P/AE	P/AE	P/AE	P	P
Cobertura primária de vias	P/AE	P/AE	P/AE	P	P
NI = não indicado P = possível P/AE = possível, mas antieconômico.	P/FI = possível, mas falta informação V = vetado.				

Fonte: LIMA, 1999.

#### 2.1.6.1 Taxa de absorção de água, massa específica seca e índice de vazios.

Constata-se maior porosidade e índice de vazios nos concretos produzidos com agregados reciclados, através da taxa de absorção de água que é maior para agregados reciclados e pode variar com a composição do agregado reciclado e com o grau de moagem podendo ter variação na absorção em torno de 5% para AGCR (Agregados Graúdos de Concreto Reciclado) e por volta de 12% para agregados miúdos reciclados (QUEBAUD; BUYLE-1999 *apud* ANGULO, 2000). A massa específica dos agregados reciclados foi menor que as dos agregados naturais, da mesma maneira os concretos com agregado graúdo reciclado também apresentam menores valores de massa específica, como constatado por Gonçalves (2001).

Bazuco (1999) infere que a massa específica dos concretos produzidos com utilização de agregados reciclados é intermediária, sendo maiores que as do concreto leve, e inferiores as apresentadas por concretos convencionais. Carrijo (2005) constatou que a variação de massa específica e da taxa de absorção dos agregados reciclados se relaciona principalmente com os intervalos de separação, e não com a natureza dos materiais mineral do agregado. Os estudos foram realizados com agregados cinza de origem cimentícia e vermelhos constituídos principalmente de cerâmica vermelha os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de absorção e massa específica para diferentes agregados

TIPO DE AGREGADO	DENSIDADES	CARACTERIZAÇÃO MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	ABSORÇÃO (%)	
Graúdo	d < 1,9	Vermelho	1,74	15,32	
		Cinza	1,78	14,65	
	1,9 < d < 2,2	Vermelho	2,02	9,01	
		Cinza	2,11	8,05	
	2,2 < d < 2,5	Vermelho	2,49	2,84	
		Cinza	2,53	2,03	
	d > 2,5	Vermelho	2,62	1,40	
		Cinza	2,60	1,51	
		Natural		2,68	0
	Miúdo	Areia natural		2,65	0

Fonte: CARRIJO, 2005.

#### 2.1.6.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade que consiste na facilidade de manuseio do concreto. É dependente da coesão e da consistência do concreto, que podem ser aferidas pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (UNICAMP, 2020). Quando comparados concretos produzidos com agregados reciclado de concreto ARC com os produzidos com agregados naturais Cabral (2007) encontrou perda de trabalhabilidade que justificou com a maior taxa de absorção apresentada pelos agregados reciclados. Bazuco (1999) infere com a geometria mais lamelar dos agregados reciclados é determinante para justificar a menor trabalhabilidade. Essa característica geométrica dos agregados reciclados amplia a necessidade de consumo de água para garantir trabalhabilidade e resistência aos concretos.

#### 2.1.6.3 Resistência à compressão axial

Para os agregados reciclados de concreto não é possível estabelecer relação direta entre resistência e porosidade (Angulo, 2005). De acordo com Lima (1999) pode-se observar relação direta, entre a origem e composição do RCD de origem do agregado com a resistência final do agregado produzido. Bazuco (1999) constata que a resistência do agregado reciclado de maneira geral será menor que a resistência do concreto de origem, pois o processo de produção diminui

a resistência do agregado comparado ao agregado de origem. Troian (2010) constatou que o Agregado Graúdo Reciclado de Concreto AGCR teve maior taxa de penetração de íons de cloreto devido a sua porosidade, o que o torna vulnerável a agentes agressivos que pode ser corrigido com adição de cinza volante ao concreto. A resistência do concreto produzido com agregado reciclado sempre será inferior a produzida com agregado natural, porém o desempenho do concreto com ARC pode ser melhorado com ajustes na relação água e cimento da dosagem, porém haverá maior impacto no que se refere a emissões de CO<sub>2</sub> (ANGULO; FIGUEIREDO, 2020). Outra maneira de melhorar as características do concreto produzido com ARC é o tratamento de agregados como realizado no estudo de (Çakır, Sofyanlı, 2014) em que ocorre o uso da pozolana sílica para atender à necessidade apresentada.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em 5 etapas:

- 1- Seleção dos materiais;
- 2- Tratamento por impregnação da sílica ativa e metacaulim no AGCR;
- 3- Apresentação da caracterização física dos materiais;
- 4- Produção e moldagem dos corpos de prova dos traços com AGCR com e sem tratamento;
- 5- Apresentação dos ensaios do concreto no estado fresco e endurecido.

#### 3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Para a produção dos corpos de prova de concreto foram utilizados os seguintes materiais: agregado graúdo reciclado de concreto (AGCR) coletado na cidade de Aparecida de Goiânia- GO, onde foi triturado e selecionado por uma usina de resíduos; agregado miúdo natural de origem quartzosa extraída da região de Abadiânia-GO; cimento Portland CII F – 40 por não possuir nenhuma adição de pozolana para que não venha interferir nos resultados; e água proveniente da cidade de Anápolis-GO.

#### 3.2 TRATAMENTO POR IMPREGNAÇÃO DE SÍLICA ATIVA E METACAILIM NO AGCR

A realização do tratamento por impregnação de sílica ativa e metacaulim foi baseado no método de Katz (2004), onde o agregado reciclado foi primeiramente seco em estufa por 24 horas, a 100°C, a fim de retirar toda umidade, depois foi resfriado em temperatura ambiente a 23°C. Logo após o agregado reciclado foi dividido em duas amostras, onde uma amostra foi submetida a uma solução de 10 litros de água, para 1 kg de metacaulim e 1% de aditivo superplastificante, sobre o peso do metacaulim. A adição do agregado graúdo de concreto reciclado na solução foi feita através de uma caixa de polietileno de 500 ml, com tampa para vedação, foram depositado o material AGCR, junto à solução produzida posteriormente. E a outra amostra foi submetida em outro recipiente de polietileno de 500 ml, com tampa para vedação com a solução de 10 litros de água, 1 kg sílica ativa e 1% de aditivo superplastificante, sobre o peso da sílica ativa para assegurar a dispersão das partículas, por um período de 24

horas. Após o tempo decorrido as misturas foram derramadas em peneiras, de modo que os agregados ficaram retidos, e o excesso da solução foi previamente descartado. Posteriormente, as amostras foram secas em estufas por um período de 24 horas a 100°C, retirando totalmente a umidade do AGCR tratado.

Este tratamento de impregnação, Figura 4, tem como o objetivo adicionar uma fina camada de metacaulim na superfície do AGCR, fazendo que, possa reagir com o hidróxido de cálcio a partir da hidratação do cimento para formar uma camada que cobre toda sua superfície do agregado, aumentando a sua zona de transição entre o agregado graúdo de concreto reciclado e a argamassa do concreto. Já na sílica ativa propõe que se forme uma camada envolvendo todo o material de AGCR, produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado, auxiliando na redução dos vazios com seu efeito filler, visando aumentar sua resistência e diminuir a absorção de água. Para este estudo foram utilizados AGRC sem tratamento (Figura 5), AGRC com o tratamento de metacaulim (Figura 6), e AGRC com o tratamento de sílica ativa (Figura 7).

**Figura 4 - Tratamento do AGCR por impregnação**



Fonte: AUTORES, 2020.

**Figura 5 - Agregado graúdo AGCR sem tratamento**



Fonte: AUTORES, 2020.

**Figura 6 - Agregado graúdo AGCR com tratamento de metacaulim**



Fonte: AUTORES, 2020.

**Figura 7 - Agregado graúdo AGCR com tratamento usando sílica ativa**



Fonte: AUTORES, 2020.

### 3.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização dos materiais.

Agregados Graúdos:

- Composição Granulométrica NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Massa Unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Massa específica e absorção de água NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Agregados Miúdos

- Composição Granulométrica NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Massa Unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006);

- Massa específica NBR NM 52 (ABNT, 2009).

### 3.3.1 Procedimento experimental

#### 3.3.1.1 Composição granulométrica dos agregados

A composição granulométrica do agregado graúdo e miúdo foi baseado na normativa NBR NM 248 (ABNT,2003), tem como método de análise a classificação das partículas da amostra pelos seus respectivos tamanhos correspondentes a cada abertura da malha nominal de série ou intermediária. O objetivo deste ensaio é encontrar a curva granulométrica, dimensão máxima característica e o módulo de finura. A curva granulométrica é representada graficamente pela a porcentagem de massa retida acumulada em cada peneira em relação a sua abertura da malha, a dimensão máxima característica corresponde a abertura nominal em milímetros da malha da peneira, no qual o agregado apresentar uma porcentagem retida acumulada, igual ou inferior a 5%, o módulo de finura é composto pela somatória das porcentagens retidas acumuladas em massa de agregado dividida por cem.

**Figura 8 - Peneirador mecânico**



Fonte: AUTORES,2020.

Iniciou-se o experimento com uma amostra de 5 kg de agregado graúdo de concreto reciclado. A amostra foi previamente seca em estufa por 24 horas afim de se retirar toda umidade do material, logo após dispôs dessa amostra em um peneirador mecânico com as

seguintes peneiras 19 mm, 12,5 mm, 9,5mm, 4,75mm e 2,36 mm (Figura 8). O peneiramento ocorreu mecanicamente, com todo o conjunto de peneiras por um período de 5 minutos, depois foi realizada a pesagem de cada material retido em suas respectivas malhas.

Para o agregado miúdo usou-se uma amostra de 500 g, que foi previamente seca em estufa pelo período de 24 horas eliminando toda umidade do agregado, utilizou-se as peneiras de abertura de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18mm, 600mm, 300mm e 150mm. (Figura 9o peneiramento foi feito individualmente e manualmente a agitação ocorreu por 2 minutos em cada peneira, registrando a massa retida nela, a massa passante foi despejada para a próxima série de peneira assim sucessivamente até o registro de todas as massas retidas.

**Figura 9 - Materiais utilizados na granulometria de agregado miúdo**



Fonte: AUTORES,2020.

### 3.3.1.2 Massa unitária dos agregados

A massa unitária do agregado graúdo reciclado de concreto e o agregado miúdo foi baseada de acordo com a normativa NBR NM 45 (ABNT, 2006) que tem como objetivo determinar a densidade e o volume de vazios dos agregados miúdo e graúdo no seu estado solto ou compactado. Esse ensaio foi realizado através de um recipiente metálico com a capacidade de 0,0106 m<sup>3</sup>, haste metálica e uma colher tipo concha (Figura 10).

**Figura 10 - Equipamentos utilizados no ensaio de massa unitária dos agregados**



Fonte: AUTORES,2020.

A amostra do agregado graúdo reciclado de concreto e o agregado miúdo foi inicialmente seca em estufa por 24 horas, utilizou-se como método do ensaio o “C”, onde foi registrado a massa do recipiente metálico vazio. Com a ajuda da colher tipo concha o recipiente foi preenchido até sua borda, soltando o agregado de uma altura mais ou menos de 50mm. A camada superior foi nivelada com a haste metálica e registrada sua massa. Esse ensaio foi realizado três vezes para ser obtido a média dos resultados individuais, dividindo a massa do agregado, pelo volume do recipiente metálico.

### 3.3.1.3 Massa específica agregado graúdo.

A massa específica do agregado graúdo de concreto reciclado foi encontrada através da NBR 53 (ABNT, 2009), onde estabelece a massa específica, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo, destinando a característica para o traço de concreto. Foi utilizado para o ensaio balança hidrostática, cesto de arame de 4 dm<sup>3</sup> a 7 dm<sup>3</sup>, balde plástico, bandeja plástica e concha (Figura 11).

**Figura 11 - Materiais utilizado na massa específica do AGCR**



Fonte: AUTORES, 2020.

A amostra do agregado graúdo foi passada pela peneira de 4,75mm de modo a eliminar todo o material passante. Lavou-se em água corrente o agregado graúdo de concreto reciclado de modo que eliminasse todo pó, ou qualquer outro material de outra origem. A amostra foi seca em estufa até a sua massa constante, após ser resfriada em temperatura ambiente. Separou-se 3 kg do agregado graúdo e submergiu-a em água, através de uma bandeja plástica pelo período de 24 horas. Após este período a amostra foi retirada da água e envolta em um pano seco. Foi eliminada toda água visível, imediatamente após serem enxugadas. Registrou-se sua massa e a amostra de agregado graúdo reciclada de concreto foi transferida para o cesto metálico, submerso em água e registrado a sua massa na balança hidrostática. Posteriormente a amostra foi seca em estufa até a massa constante. Após ser resfriado em temperatura ambiente foi registrado novamente sua massa.

#### 3.3.1.4 Massa específica agregado miúdo

A massa específica do agregado miúdo foi realizada através da normativa NBR 52 (ABNT, 2002), que também tem como o objetivo encontrar massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Foi utilizado uma balança, frasco de picnômetro, molde tronco de cônico, haste compactação de socamento, bandeja, espátula. (Figura 12).

**Figura 12 - Materiais utilizado no ensaio de massa específica do agregado miúdo**



Fonte: AUTORES,2020.

Separou-se 1 kg da amostra de agregado miúdo, posteriormente submergiu-a em água pelo período de 24 horas. Após este período foi retirada a amostra da água e espalhada sobre uma bancada com ação de corrente de ar, mexendo a amostra para assegurar uma secagem uniforme. Após o agregado ficar totalmente seco e solto entre si, colocou-se o agregado miúdo no molde compactando sua superfície com a haste de socamento em 25 golpes, de modo a encontrar o agregado miúdo em sua condição saturado superfície seca. Após essa preparação foi registrado a massa do frasco de picnômetro e adicionou-se 500g dessa amostra de agregado miúdo, e preencheu-se o frasco até a marca de 500 ml, sempre movendo afim de eliminar todas as bolhas de ar. O frasco de picnômetro permaneceu em banho maria pelo período de 1 hora, após foi retirado o agregado do frasco de picnômetro, transferido para uma bandeja e levado a estufa para a secagem até a massa constante. Resfriou a amostra em dessecador a temperatura ambiente e registrou-se sua massa.

### 3.4 PRODUÇÃO E MOLDAGEM DO CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO

#### 3.4.1 Produção dos corpos de prova

O método escolhido para a dosagem do concreto foi o ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland),  $f_{ck}$  de 25 MPa, e abatimento de 80 a 100 mm. Obteve-se o seguinte traço unitário 1: 1,62: 2,13 para a relação de água/ cimento 0,51.

As misturas deste experimento para a produção do concreto de agregado graúdo de concreto reciclado foram produzidas nas seguintes sequências AGCR, ½ da água, cimento Portland CP II F- 40, agregado miúdo, 1/2 da água. O Quadro 10 mostra o traço utilizado em  $kg/m^3$ .

**Quadro 10 - Consumo de materiais em  $kg/m^3$**

<b>Consumo (<math>kg/m^3</math>)</b>			
<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>AGCR</b>	<b>Água</b>
436	710	931	222

Fonte: AUTORES, 2020.

#### 3.4.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizadas três dosagens do traço de concreto, do qual uma delas utilizou apenas o AGRC sem tratamento, outra apenas com AGRC com tratamento por metacaulim, e a última dosagem com o AGRC com o tratamento por sílica ativa.

Foram utilizados moldes metálicos, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm. Ao todo foram moldados 33 corpos de prova sendo 11 produzidos através do agregado graúdo de concreto reciclado com o tratamento de metacaulim, outros 11 com AGCR tratado com a sílica ativa e os outros 11 sem nenhum tipo de tratamento. A Figura 13 mostra alguns dos corpos de prova moldados nesta fase do experimento.

De acordo com o procedimento descrito na NBR 5738 (ABNT, 2016), a moldagem dos corpos de prova se caracteriza pela disposição da amostra de concreto em duas camadas compactadas com 12 golpes dentro de recipiente de formato cilíndrico metálico. Os corpos de prova foram mantidos nas primeiras 24 horas no mesmo local sem qualquer tipo de

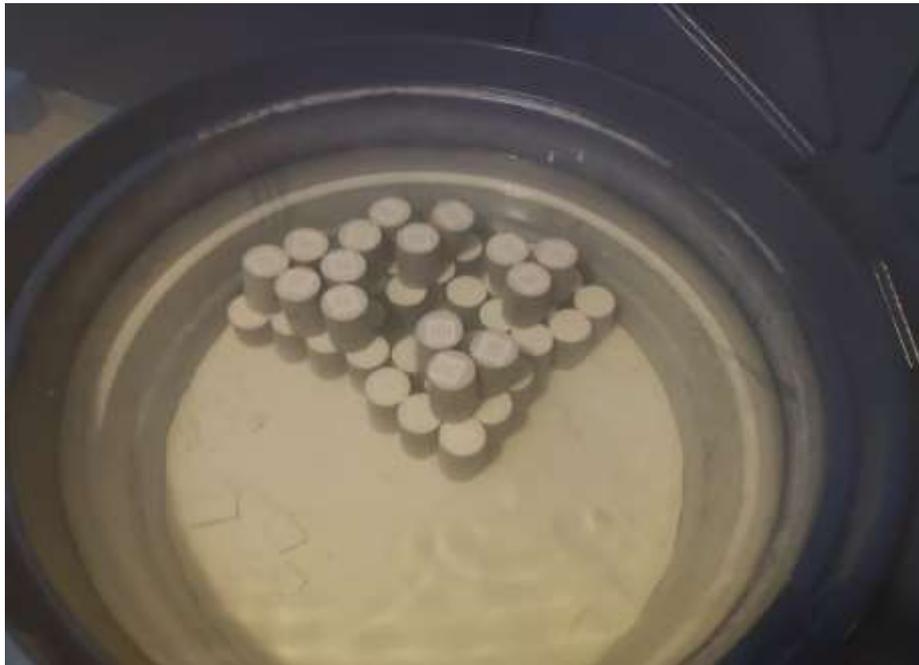
movimentação. Após as primeiras 24 horas foram transferidas para câmara úmida onde ficaram submersos à temperatura de 22,7 °. (Figura 14).

**Figura 13 - Corpo e prova de concreto**



Fonte: AUTORES, 2020.

**Figura 14 - Corpos de prova submerso na câmara úmida**



Fonte: AUTORES, 2020.

### 3.5 APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS DO CONCRETO NO SEU ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

#### 3.5.1 Procedimento executivo experimental

##### 3.5.1.1 Abatimento tronco de cone “slump test.”

A NBR NM 16889 (ABNT, 2020), descreve o método de determinar a consistência do concreto fresco através da medida de assentamento. A aparelhagem usada para este ensaio foi molde tronco de cone oco, com as dimensões de diâmetro da base inferior 200mm, base superior 100mm e altura de 300mm, haste de compactação, placa de base, colher tipo concha e trena metálica. (Figura 15).

**Figura 15 - Equipamento do Abatimento tronco de cone**



Fonte: AUTORES,2020.

Iniciou-se o ensaio com a separação da amostra de concreto no seu estado ainda fresco, umedeceu-se o conjunto da placa de base, molde e haste metálica, com os pés sob a placa de

base firmando o molde de tronco. Preencheu-se rapidamente três camadas de concreto, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde, compactou-se cada camada com 25 golpes. No final de todo preenchimento e da compactação fez-se o rasamento da superfície do concreto com a haste e retirou-se o molde troco de cone levantando cuidadosamente em 10 segundos, com movimentos constantes. Após retirar o molde mediu-se com a trena metálica o abatimento de concreto determinado pela diferença entre a altura do molde e a altura do corpo de prova de concreto.

### 3.5.1.2 Resistência à compressão axial

Em conformidade do método descritivo da NBR 5739 (ABNT, 2018), os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, através da prensa hidráulica universal, conforme a Figura 16, aos 7 e 28 dias de hidratação do concreto. A resistência à compressão axial apresentada pelo AGCR, geralmente é inferior quando comparado ao concreto convencional, devido à baixa resistência do material de agregado graúdo de concreto reciclado.

**Figura 16 - Equipamento de resistência à compressão axial**



Fonte: AUTORES,2020.

### 3.5.1.3 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica NBR NM 9778 (ABNT, 2009). As amostras foram moldadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Para realização do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos, balança hidrostática, estufa, fogão e baldes plásticos.

As amostras com idades de 28 dias foram levadas para a estufa pelo período de 72 horas, onde foram submetidas a pesagem das massas das amostras. Depois foram imergidas as amostras em água a temperatura ambiente pelo período de 72 horas. Após a saturação das amostras, iniciou-se o processo de fervura pelo período de 5 horas, imediatamente após seu resfriamento, registrou-se sua massa em balança hidrostática, feito isso as amostras foram enxugadas até que toda água visível fosse eliminada e submetidas novamente a pesagem das massas das amostras.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

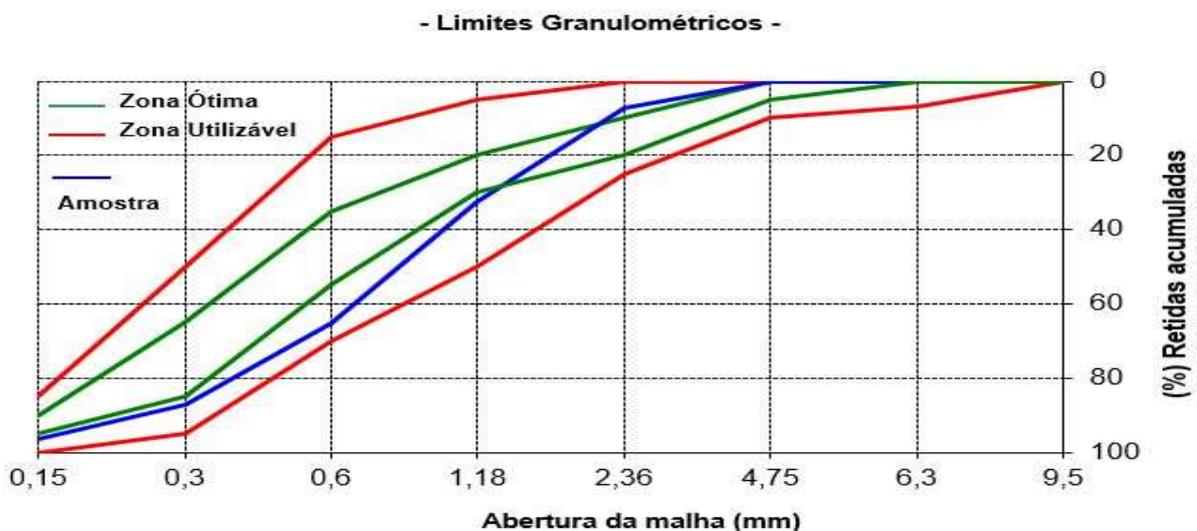
### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS.

Os materiais utilizados na produção do traço de concreto foram submetidos aos ensaios de caracterização física. De acordo com a normativa NBR 248 (ABNT, 2003), o agregado miúdo natural apresentou o módulo de finura de 2,89 mm. A Figura 17 mostra a curva granulométrica deste agregado miúdo. O AGCR apresentou o diâmetro máximo característico de 12,5 mm com módulo de finura de 6,33 mm. A Figura 18 mostra a curva com a granulométrica deste agregado.

Conforme a NBR 52 (ABNT, 2002) a massa específica do agregado miúdo natural no seu estado superfície seca foi de 2.470 kg/ m<sup>3</sup>, e em conformidade com a NBR 53 (ABNT, 2009) a massa específica do AGCR foi de 2.688 kg /m<sup>3</sup>, com a absorção de 8,2%.

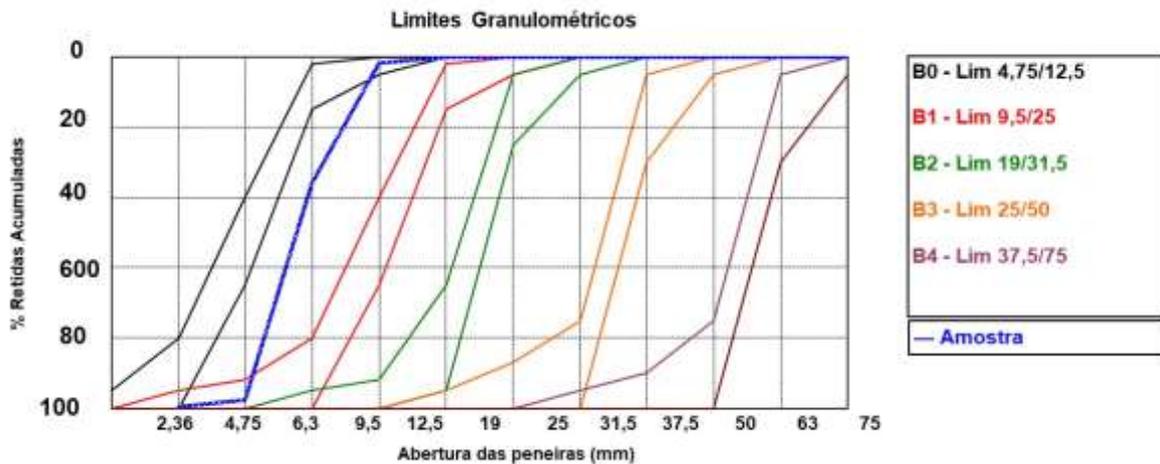
De acordo com o método descrito na NBR 45 (ANBT, 2006), a massa unitária do agregado miúdo natural no seu estado seco foi de 1.656 kg/m<sup>3</sup>. O AGCR (agregado graúdo de concreto reciclado) no seu estado seco apresentou massa unitária de 1.316 kg/m<sup>3</sup>.

Figura 17 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: AUTORES, 2020.

Figura 18 - Curva de granulométrica do AGCR



Fonte: AUTORES, 2020.

#### 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Durante a produção do concreto foi realizada a consistência do concreto em seu estado fresco *slump test*, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020). Com o objetivo de avaliar a perda de trabalhabilidade devido à absorção de água do AGCR. Visto que para a dosagem do concreto foi determinado o abatimento de 80 a 100 mm, não foi utilizado nenhum tipo de aditivo plastificante, ou estabilizador de hidratação.

O abatimento apresentado pelo concreto de AGCR sem tratamento foi de 35 mm, conforme apresentado na Figura 19.

O abatimento apresentado pelo concreto de AGCR com tratamento de sílica ativa (Figura 20) foi de 35 mm, o mesmo abatimento obtido pelo concreto de AGCR sem tratamento.

O abatimento apresentado pelo concreto de AGCR com tratamento de metacaulim foi de 40 mm, conforme mostra a Figura 21.

O traço foi calculado para o abatimento entre 80 a 100 mm conforme a ABCP, foram baseados em agregados naturais como fonte de referência, nos três traços produzidos observou uma perda de trabalhabilidade devido à absorção de água do agregado graúdo de concreto reciclado.

**Figura 19 - Abatimento do concreto sem tratamento**



Fonte AUTORES 2020.

**Figura 20 - Abatimento do concreto com tratamento com sílica ativa**



Fonte: AUTORES 2020.

**Figura 21 - Abatimento do concreto com tratamento com metacaulim.**



Fonte: AUTORES 2020.

#### **4.2.1 Massa específica, absorção de água e índice de vazios**

Para os ensaios estabelecidos na normativa NBR 9778 (ABNT, 2009) - Massa específica, absorção de água e índice de vazios foram ensaiados no total a quantidade de 9 corpos de prova, sendo 3 corpos para cada um dos tratamentos estudados e 3 sem qualquer tratamento. Os corpos de prova com tratamento e sem tratamento foram submetidos aos ensaios de massa específica da amostra seca, através das pesagens das amostras secas (Figura 22). Ensaio de massa específica saturada em água, por meio das pesagens das amostras saturadas (Figura 23). E absorção por imersão em água, através das pesagens das amostras por balança hidrostática (Figura 24). Os resultados obtidos através dos ensaios encontram-se mostrados na (Tabela 4).

**Figura 22 - Massa específica seca da amostra.**



Fonte: AUTORES 2020.

**Figura 23 - Massa específica saturada da amostra.**



Fonte: AUTORES 2020.

**Figura 24 - Absorção de água imersa em água.**

Fonte: AUTORES 2020.

**Tabela 4 - Resultados dos ensaios da NBR 9778 (ABNT,2009).**

(continua)

<b>Resultados das massas específicas, índices de vazios e taxa de absorção.</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Corpo de prova com tratamento</b>		
	<b>Com sílica ativa</b>	<b>Com metacaulim</b>	<b>Sem tratamento</b>
Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )	2042	2034	2054
	2044	2030	2057
	2040	2035	2059
Massa específica saturada (kg/m <sup>3</sup> )	2210	2184	2203
	2214	2179	2201
	2216	2183	2205

Tabela 4 - Resultados dos ensaios da NBR 9778 (ABNT,2009).

(conclusão)

<b>Resultados das massas específicas, índices de vazios e taxa de absorção.</b>			
<b>Corpo de prova com tratamento</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Com sílica ativa</b>	<b>Com metacaulim</b>	<b>Sem tratamento</b>
Absorção de água (%)	8,36	7,30	7,16
	8,38	7,33	7,14
	8,39	7,38	7,17
Índice de vazios (%)	17,02	14,89	14,69
	17,06	14,93	14,72
	17,04	14,88	14,71

Fonte: AUTORES,2020.

Foi calculado a média dos resultados, dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios, e o resultado da média encontra-se no (Tabela 5).

Tabela 5 - Resultados das médias dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios.

<b>Ensaio</b>	<b>Massa específica seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica saturada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>
<b>Com sílica ativa</b>	2042	2213	8,34	17,04
<b>Com metacaulim</b>	2033	2182	7,33	14,9
<b>Sem tratamento</b>	2056	2203	7,14	14,7

Fonte: AUTORES, 2020.

#### 4.2.2 Resistência à compressão axial

De acordo com o método descrito na NBR 5739 (ABNT, 2018), os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão, através da prensa hidráulica universal, conforme a Figura 25, aos 7 e 28 dias. As resistências individuais dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 6.

Foi calculada a média entre as resistências dos traços de concreto de agregado graúdo de concreto reciclado sem tratamento e com os tratamentos de sílica ativa e metacaulim. No gráfico apresentado na Figura 26, demonstra a média das resistências à compressão axial aos 7

dias de idade, e no gráfico da Figura 27, o resultado da média da resistência à compressão axial das amostras com a idade aos 28 dias.

**Figura 25 - Prensa hidráulica universal ensaio de resistência à compressão axial.**

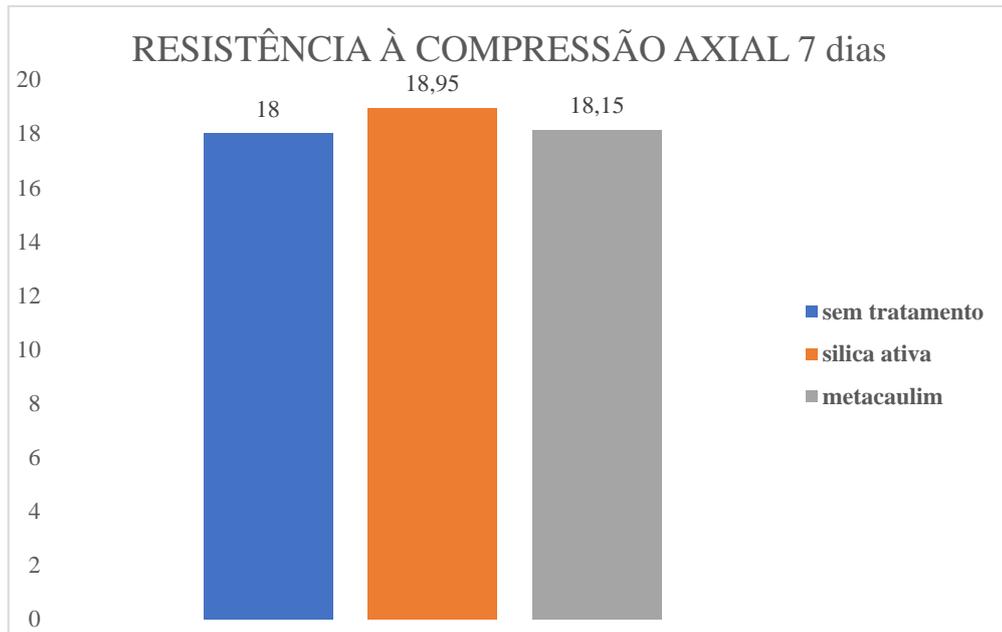


Fonte: AUTORES, 2020.

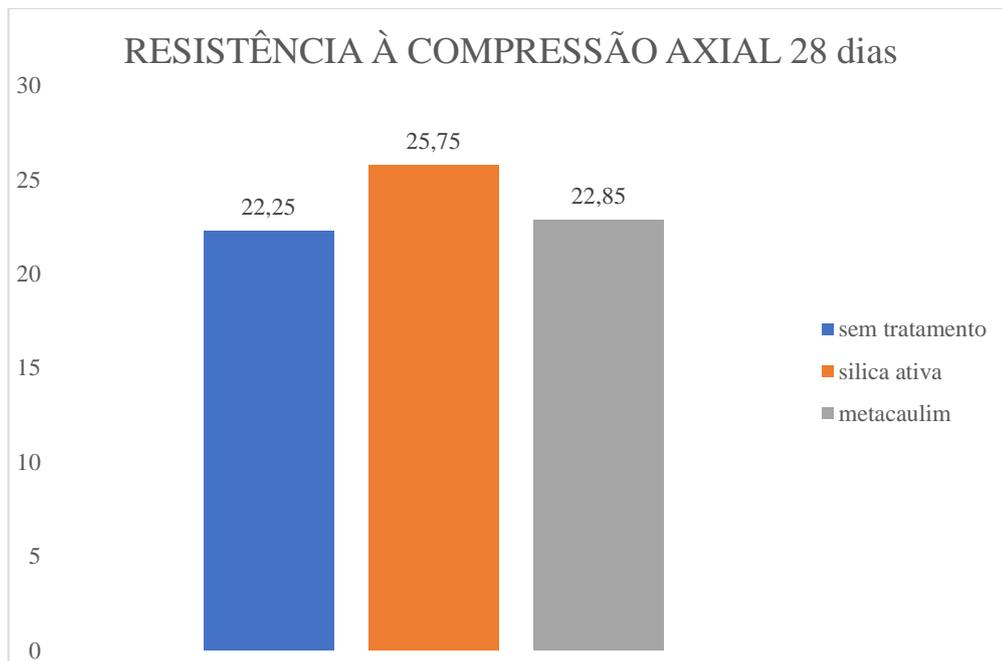
Tabela 6 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova com e sem tratamento

Corpo de prova		Idade (dias)	Tensão (MPa)	Carga(kgf)
Corpo de prova	Tipo de tratamento			
1	Sem tratamento	7	18,3	14.640
2		7	17,7	14.180
3		7	16,2	13.000
4		7	18,8	15.060
5	Sem tratamento	28	22,3	17.860
6		28	22,2	17.760
7		28	21,5	17.190
8		28	23,5	18.810
9	Sílica ativa	7	17,0	13.590
10		7	18,7	15.010
11		7	20,3	16.290
12		7	19,2	15.390
13	Sílica ativa	28	25,8	20.680
14		28	24,7	19.750
15		28	26,9	21.530
16		28	25,7	20.600
17	Metacaulim	7	17,4	13.920
18		7	18,9	15.110
19		7	17,7	14.160
20		7	18,6	14.880
21	Metacaulim	28	25,2	20.200
22		28	23,0	18.440
23		28	22,7	18.210
24		28	22,6	18.100

Fonte: AUTORES, 2020.

**Figura 26 - Médias das resistências à compressão axial aos 7 dias**

Fonte: AUTORES, 2020.

**Figura 27 - Médias das resistências à compressão axial aos 28 dias.**

Fonte: AUTORES, 2020.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se com este trabalho que o tratamento com sílica ativa e o tratamento com metacaulim em conjunto com AGCR apresentaram melhorias significativa na resistência aos 7 e principalmente aos 28 dias. Admite-se que os tratamentos com sílica ativa e metacaulim demonstram imenso potencial para serem utilizados na produção de concreto, visto que tiveram melhor resistência à compressão axial em comparação ao concreto AGCR sem tratamento.

No programa experimental destaca-se o traço de concreto de AGCR com o tratamento de sílica ativa aos 7 e 28 dias de idade, a sua resistência a compressão axial obteve o ganho respectivo de 5,28% e 15,73% em relação à média de resistência à compressão axial do concreto produzido com AGCR sem tratamento.

Porém foi analisado o aumento de 14,29% no abatimento do concreto de AGCR tratado com metacaulim, que apesar de ter um ganho de resistência à compressão axial menor apresentou maior plasticidade e trabalhabilidade o tratamento com metacaulim em comparação ao traço não tratado apresentou 0,83% de acréscimo em resistência a compressão axial para 7 dias e 2,7% para 28 dias.

O tratamento por impregnação proporcionou menor massa específica seca sendo respectivamente para o metacaulim 1,12% menor e para sílica ativa 0,68% menor em comparação com o concreto referência evidenciando que o concreto tratado foi mais leve.

Quanto a absorção de água a sílica ativa e o metacaulim apresentaram maiores valores para absorção em relação ao traço de referência para o tratamento com sílica a absorção foi 16,81% maior e para o metacaulim 2,66%.

Analisando o índice de vazios o concreto de referência apresentou menor índice o concreto referência apresentou menos vazios sendo o índice proporcionalmente 1,36% menor que o tratado com metacaulim e 15,92% menor em relação ao tratamento com sílica ativa.

Ao considerar as melhorias que o tratamento proporciona ao agregado graúdo reciclado é válido considerar que o tratamento é uma maneira de ampliar o uso de agregado graúdo de concreto reciclado AGCR e consequentemente destinar o entulho gerado pela construção civil ao uso sustentável de modo que seja uma alternativa economicamente viável para a substituição do agregado natural solucionando simultaneamente os problemas de destinação de entulhos e a alta demanda por agregados.

Sugere-se para outros estudos fazer o uso de aditivo plastificante para melhor abatimento do concreto, e menor índice de vazios, consequentemente maior resistência mecânica.

## REFERÊNCIAS

- ABRECON. **Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil**. 2011. Disponível em: <https://abrecon.org.br/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil/#:~:text=Para%20se%20ter%20uma%20ideia,70%25%2C%20informa%20o%20especialista.&text=Elas%20trabalham%20com%20planos%20de%20res%C3%ADduos%20s%C3%B3lidos%20e%20separam%20materiais..> Acesso em: 13 nov. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2008**. 2009. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2009**. 2010. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010**. 2011. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011**. 2012. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013**. 2014. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014**. 2015. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. 2016. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. 2017. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. 2018. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. 2019. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 set. 2020.
- AECWEB. **SI02 – Active Silic em pó**. Disponível em: [https://www.aecweb.com.br/prod/e/si02-active-silic-em-po\\_28500\\_46067](https://www.aecweb.com.br/prod/e/si02-active-silic-em-po_28500_46067). Acesso em: 20 nov. 2020.
- AECWEB. **SI02 – Active Silic líquida**. 2020. Disponível em: [https://www.aecweb.com.br/prod/e/si02-active-silic-liquida\\_28500\\_46068](https://www.aecweb.com.br/prod/e/si02-active-silic-liquida_28500_46068). Acesso em: 20 nov. 2020
- ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Controle tecnológico básico do concreto**. 2002. Disponível em: [https://www.academia.edu/download/35980982/Controle\\_tecnologico\\_basico\\_do\\_concreto.pdf](https://www.academia.edu/download/35980982/Controle_tecnologico_basico_do_concreto.pdf). Acesso em: 05 dez. 2020.

ANDRADE, Daniel da Silva. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. 2017. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31070>. Acesso em 25 nov. 2020

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18112005-155825/publico/caracterizacaoSA.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2020

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-05102005-112833/publico/variabilidade\\_serjio\\_angulo.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-05102005-112833/publico/variabilidade_serjio_angulo.pdf). Acesso em: 19 nov. 2020

ANGULO, Sérgio C.; FIGUEIREDO, Antônio D. de. **CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS**. Instituto Brasileiro do Concreto – Livro CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5015876/mod\\_resource/content/0/CAP%2047\\_RCD\\_3.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5015876/mod_resource/content/0/CAP%2047_RCD_3.pdf). Acesso em: 6 dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889:**

Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 09 p. Disponível em: <http://areiaovitoria.com.br/download/nbr%207211.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Nbr 11768 (2011) - Aditivos Para Concreto De Cimento Portland Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2011. 19 p. Disponível em: <https://idoc.pub/documents/nbr-11768-2011-aditivos-para-concreto-de-cimento-portland-requisitos-em-vigorpdf-pnxk8256ee4v>. Acesso em: 2 dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil-Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural**. 2004 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM248 : Agregados-Determinação da composição granulométrica**. 2003 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5738 Concreto -Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: Abnt, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2015. 6 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 10 p. Disponível em: <http://www.areiaovitoria.com.br/download/NBR%2015115.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil-Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2018. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5011098/mod\\_resource/content/0/NBR16697%20-%20Arquivo%20para%20impress%C3%A3o.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5011098/mod_resource/content/0/NBR16697%20-%20Arquivo%20para%20impress%C3%A3o.pdf). Acesso em: 10 dez. 2020.

BAZUCO, Régis Sandro. **UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO PARA PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS**. 1999. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80789>. Acesso em: 05 dez. 2020.

BERTEQUINI, Aline Botini Tavares; MACHI, Isabela da Silva; DONÁ, Wallace. **ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**. 2019. Disponível em: <http://www.unitoledo.br/repositorio/handle/7574/2161>. Acesso em: 5 dez. 2020.

BIANCHINI, Mauricio. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS TEORES DE SÍLICA ATIVA NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA EM CENTRAL DOSADORA DE CONCRETO**. 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/24035/TEOR%20SILICA%20PRODUCAO%20CAR%20BIANCHINI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 dez. 2020.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Cap. 3. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-21102007-164548/pt-br.php>. Acesso em: 19 nov. 2020

CARMO, J. B. M. do; PORTELLA, K. F.. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**. Cerâmica 54 (2008) paginas 309-318. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ce/v54n331/a0754331.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2020.

CARMO, João Bosco Moreira do. **ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COMPOSTOS COM SÍLICA ATIVA E METACAUIM FACE À RESISTÊNCIA MECÂNICA E À VIABILIDADE ECONÔMICA**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/8156?show=full>. Acesso em: 05 dez. 2020

CONAMA. **RESOLUÇÃO Nº 307**. 2002. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98303>. Acesso em: 18 set. 2020.

CORRÊA, Augusto Cesar Abduche. **ESTUDO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS PLASTIFICANTES E POLIFUNCIONAIS EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND TIPO CPIII-40**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Tecnologia da Construção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010. Disponível em: <http://cepisnf.uff.br/wp-content/uploads/sites/461/2018/10/definitivaabduche.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2020.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. doi:10.11606/D.3.2005.tde-11052006-143829. Acesso em: 2020-12-05.

COSTA FILHO, Tilson Baltazar da. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÕES DE CINZA DE CASCA DE ARROZ AMORFA E CRISTALINA EM RELAÇÃO À CORROSÃO DE ARMADURAS EM AMBIENTE CONTAMINADO COM ÍONS CLORETO**. 2005. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2005. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/37102>. Acesso em: 5 dez. 2020.

ÇAKİR, Özgür; SOFYANLI, Ömer Özkan. **Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete**. 2014. Traduzido do inglês. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404814000431#:~:text=Concrete%20properties%20were%20evaluated%20by,and%20physical%20properties%20of%20concrete..>

Acesso em: 19 nov. 2020.

DIPROTEC. **Aditivos e Complementares: sílica ativa (microsílica)**. Sílica Ativa (Microsílica). 2020. Disponível em: <https://www.diprotec.com.br/produto/silica-ativa-microsilica/>. Acesso em: 17 nov. 2020.

FERREIRA, Ricardo. **Materiais constituintes do Concreto**. 2020. Disponível em: [http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc\\_maco\\_2\\_04\\_adicoes.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc_maco_2_04_adicoes.pdf). Acesso em: 17 nov. 2020.

FERREIRA, Ricardo. **Materiais constituintes do Concreto: aditivos para concreto**. Aditivos para concreto. Disponível em:

[http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc\\_maco\\_2\\_05\\_aditivos.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc_maco_2_05_aditivos.pdf). Acesso em: 2 dez. 2020.

GAPINSKI, Gary M.; SCANLON, John. **Silica Fume**. [2006]. Traduzido do inglês. Disponível em: <https://www.norchem.com/pdf/technical-papers-articles-gapinski-scanlon.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020

GONÇALVES, Rodrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de resíduos de concreto: um novo material para dosagens estruturais**. 2001. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06052016-150748/publico/Dissert\\_Goncalves\\_RodrigoDC.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06052016-150748/publico/Dissert_Goncalves_RodrigoDC.pdf). Acesso em: 13 nov. 2020..

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de Cimento Portland: cap.29**. Cap.29. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto:ibracon, 2010.

HERMANN, A. *et al.* Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 48-65, fev. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952016000100004>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000100004>. Acesso em: 21 nov. 2020

HOFFMANN, Anelise Todeschini. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA, RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE, TEMPERATURA E TEMPO DE CURA NO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS**. 2001. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/2117>. Acesso em: 5 dez. 2020.

- KATZ, Amnon. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 16, n. 6, p. 597-603, dez. 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:6\(597\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:6(597)). Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/b741/5e53b04549c1d9391248b2845a7de7f620ec.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2020.
- KURDA, Rawaz; BRITO, Jorge de; SILVESTRE, José D. **Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties**. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v.157,p.554-572,dez.2017.
- LEVY, Salomon M.. **Problemas Gerados pelo entulho**. 2000. Disponível em: [http://www.web-resol.org/site/trabalhos\\_tecnicos3.php?id=956](http://www.web-resol.org/site/trabalhos_tecnicos3.php?id=956). Acesso em: 13 nov. 2020
- LIMA, José Antonio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas a**. 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: [https://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/Dissert\\_Jose\\_Antonio\\_Ribeiro\\_de\\_Lima.pdf](https://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/Dissert_Jose_Antonio_Ribeiro_de_Lima.pdf). Acesso em: 21 nov. 2020
- LINTZ, Rosa Cristina Cecche. **Dosagem de concreto de elevado desempenho pelo processo da calda de cimento**. 1997. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-16122010-100814/publico/RosaCristinaCeccheLintzM.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2020.
- NITA, Clovis; JOHN, Vanderley Moacyr. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. São Carlos: Epusp, 2007. 15 p. (Série BT/PCC). Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento de Engenharia de Construção Civil. Disponível em: [http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT\\_00451.pdf](http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00451.pdf). Acesso em: 17 nov. 2020
- NOGUEIRA, Daniella Vieira; LIMA, Rafaela Vieira; GOMES, Kíria Nery Alves do Espírito Santo. Influência do Metacaulim para o tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 15326-15339, 2020. *Brazilian Journal of Development*. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n3-417>. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/8110/7011>. Acesso em: 9 dez. 2020.
- NOVAKEM. **Sílica Ativa em Pó**: adição mineral em pó. Adição Mineral em Pó. 2020. Disponível em: <http://novakem.com.br/silica-ativa-po/>. Acesso em: 17 nov. 2020.
- OLIVEIRA, Kelly Cristina da Cunha; CARVALHO, Matheus Costa. **Reutilização de resíduos liberados nas construções civil**. 2014. Disponível em: [http://www.academia.edu/download/50619406/Reutilizacao\\_dos\\_residuos\\_liberados\\_na\\_construcao\\_civil.pdf](http://www.academia.edu/download/50619406/Reutilizacao_dos_residuos_liberados_na_construcao_civil.pdf). Acesso em: 04 set. 2020.
- PINHEIRO, Libânio M. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**. 2007. Disponível em: [http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost\\_EESC\\_USP\\_Libanio.pdf](http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf). Acesso em: 02 dez. 2020.

PINTO, Tarcísio de Paula. **METODOLOGIA PARA A GESTÃO DIFERENCIADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO URBANA**. 1999. Disponível em: [http://www.academia.edu/download/46261238/Metodologia\\_para\\_gestao\\_diferenciada\\_de\\_CD\\_-\\_Pinto.pdf](http://www.academia.edu/download/46261238/Metodologia_para_gestao_diferenciada_de_CD_-_Pinto.pdf). Acesso em: 9 set. 2020.

POSSAN, Edna. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/8524>. Acesso em: 17 nov. 2020

ROCHA, Thais da Silva *et al.* **INFLUÊNCIA DA CALCINAÇÃO COMPLETA DO METACAULIM NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS**. 2017. 72º Congresso Anual da ABM. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/influencia-da-calcinacao-completa-do-metacaulim-na-resistencia-mecanica-de-argamassas-geopolimericas>. Acesso em: 10 dez. 2020.

SANTANA, Alcécio Carvalho *et al.* **Estudo comparativo de concreto com sílica de cinza da casca de arroz e sílica ativa**. Ibracon: Congresso Nacional do concreto, Foz do Iguaçu, set. 2018.

SEBRAE-SC (Brasil). Sebrae. **Panorama do setor de Construção Civil do setor de Construção Civil**. 2019. Disponível em: <https://atendimento.sebrae-sc.com.br/inteligencia/infografico/panorama-do-setor-de-construcao-civil>. Acesso em: 25 set. 2020.

SILVA JÚNIOR, Omir Fernandes da *et al.* **ATIVIDADE POZOLÂNICA DA SÍLICA ATIVA E DA METACAULINITA POR MÉTODOS DIRETO E INDIRETO**. 2018. Apresentado no Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018. Disponível em: [https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/54\\_apdsaedmpmdei.pdf](https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/54_apdsaedmpmdei.pdf). Acesso em: 17 nov. 2020.

SOUZA, Leandro Moreno de; ASSIS, Cleber Decarli de; SOUTO, Silvia Barroso Gomes. **Agregado reciclado: um novo material da construção civil**. 2013. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/193651452.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2020.

SUGAMOSTO, Jorge. **COMPARATIVO ENTRE CONCRETOS PRODUZIDOS COM SÍLICA ATIVA EM PÓ E SÍLICA ATIVA EM FORMA DE LAMA**. 2007. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Construção Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: [https://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/uploads/2018/05/Comparativo-de-silica-TCC\\_UTFPR\\_2007.pdf](https://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/uploads/2018/05/Comparativo-de-silica-TCC_UTFPR_2007.pdf). Acesso em: 20 nov. 2020

TECNOSIL. **SÍLICA ATIVA: POR QUE USÁ-LA NA SUA CONSTRUÇÃO?** 2020. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa-por-que-usa-la-na-sua-construcao-2/>. Acesso em: 17 nov. 2020.

TROIAN, Aline. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons de cloreto**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/3549>. Acesso em: 21 nov. 2020.

UNICAMP. **O uso do concreto na construção civil**. Disponível em: [http://www.fec.unicamp.br/~caxd/falcetta/\\_resumos/eng5.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~caxd/falcetta/_resumos/eng5.pdf). Acesso em: 19 nov. 2020.

WEIDMANN, Denis Fernandes. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA E DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**. 2008. 273 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106626/264453.pdf?se>. Acesso em: 2 dez. 2020.