

**UFPA**

**PPGEC**

**Universidade Federal  
do Pará**

---



Gabriela de Oliveira Pires

**Comportamento mecânico dos efeitos da  
substituição parcial do cimento por sílica ativa  
em Eco Concretos  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2016

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Gabriela de Oliveira Pires**

**Comportamento mecânico dos efeitos da substituição parcial do cimento  
por sílica ativa em Eco Concretos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

*Belém*  
*Maior de 2016*

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Gabriela de Oliveira Pires

TÍTULO: Comportamento mecânico dos efeitos da substituição parcial do cimento por sílica ativa em Eco Concretos.

GRAU: Mestre ANO: 2016

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta qualificação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa qualificação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

### **Gabriela de Oliveira Pires**

Rua Leopoldo Carpinteiro Peres, nº 32. Petrópolis.  
69063-510 Manaus – AM – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA

---

Pires, Gabriela de Oliveira. 1988 -

Comportamento mecânico dos efeitos da substituição parcial do cimento por sílica ativa em Eco Concretos / Gabriela de Oliveira Pires. – 2016.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2016.

1. Concreto – Propriedades mecânicas. 2. Agregados (Materiais de Construção). 3. Resíduos como material de construção. I. Título.

CDD - 22. ed. 624.1834

---



**Gabriela de Oliveira Pires**

## **Comportamento mecânico dos efeitos da substituição parcial do cimento por sílica ativa em Eco Concretos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPA. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

**Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço**

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPA

**Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo**

Examinador Interno

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPA

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**

Examinadora Interna

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

**Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral**

Examinador Externo

Universidade Federal do Ceará – UFC

*Belém, 27 de Maio de 2016.*

*Dedico este trabalho à toda minha família e  
principalmente ao meu companheiro de  
jornada Iberê Fernando Martins*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me guiar, proteger e abençoar em TODOS momentos da minha vida, realmente meu sentimento é de gratidão, mesmo nos momentos em que parecia que nada ia dá certo, foi para que o melhor acontecesse depois.

Mãe e pai, obrigada pelo amor acima de tudo, pelo o investimento na minha educação, essa conquista é nossa, ela é reflexo de tudo que fizeram por mim e principalmente por não desistirem de mim nunca. Irmãs vocês iluminam minha vida, vocês são importantes demais, nunca esqueçam disso. Ana Clara perdi seus primeiros anos de vida, mas foi por uma causa maior, espero que você entenda e me ame tanto quanto a tia te ama, nunca passei um dia sem olhar uma foto sua!

Agradeço principalmente ao meu orientador Marcelo Picanço, primeiro pela oportunidade de trabalho em conjunto, acreditou no meu potencial desde o início, por toda atenção, por todas lições aprendidas nas matérias ensinadas, cheguei com dificuldades e com toda paciência me guiou ao caminho do conhecimento acadêmico.

Iberê Fernando agradeço primeiramente pelo incentivo a participar do processo seletivo do mestrado, por ser além de companheiro, meu melhor amigo, por cuidar de mim, por me ajudar sempre que precisei, você é meu anjo como sempre digo. Obrigada por sempre pensar em mim, obrigada por me amar sempre e sempre, você é o eterno amor da minha vida, nunca esqueça disso.

Ao professor André Montenegro, que desde o primeiro contato comigo ainda em Manaus, sempre tratou com muita cortesia e com certeza acreditou também no meu potencial, ao Prof. Pompeu que hoje em dia se tornou uma pessoa extremamente importante, tanto pelo conhecimento ensinado, quanto pela amizade. Ao Prof. Dênio Ramam, Prof. Alcebiades e Prof. Cláudio Blanco minha admiração por vocês é extrema, obrigada também pela atenção sempre dada a mim. Agradeço toda ajuda dada na avaliação de qualificação pelo Prof. Paulo Sérgio, com certeza engrandeceram meu trabalho.

Luciana Cordeiro, agradeço por todas as dúvidas sanadas, você foi extremamente importante para execução do trabalho, obrigada pela paciência, você é um exemplo de profissional, com certeza uma inspiração para minha caminhada.

Maurílio Pimentel, você além de colega de laboratório foi um verdadeiro achado como amigo, além de ajudar em vários momentos que precisei, foi companheiro nos dias bons e ruins, no final de tudo ganhei um amigo pelo resto da vida, te amo!! Meu amigo Valdemir Colares que também estará sempre em meu coração, obrigada pela amizade, companheirismo, você é uma pessoa maravilhosa, de grande coração, quero levar sua amizade mesmo que distante para o resto da vida, aguardo sua visita em Manaus!

Aos amigos Adriano Vasconcelos e Wyllian Santana, que fizeram parte do meu cotidiano, obrigada pela amizade e pelo carinho, que a vida de vocês seja repleta de sucesso profissional, são merecedores e contem sempre comigo. Obrigada aos alunos da graduação: Denisson, Dayla, Lucas, Guilherme, Vanessa, Iury, Dani, Mateus Inácio, Paulo Sérgio, Vander que ajudaram na execução do meu trabalho, sem a força e inteligência de vocês teria sido bem mais difícil, serei eternamente grata. Ao pessoal do GAEMA sucesso e vida longa!

Dayse Soares e Carolina Nunes vocês não têm noção de como a amizade de vocês me fortalece, sem vocês essa caminhada teria sido bem mais difícil, amo vocês!!! Meus amigos de vida Camila Melo, Leonardo Brito também obrigada por sempre estarem ao meu lado nesses mais de 10 anos de amizade!!

Agradeço a Capes pela bolsa concedida, vital para o desenvolvimento desse trabalho. Aos funcionários da UFPA, Roseane Terra, Aline, Sanny, Tia Marly, Joel, Carmem, Rosemary, obrigada pelo carinho com que sempre me trataram, com certeza sentirei muitas saudades de vocês.

Aos meus sogros pelo apoio emocional, financeiro e por acreditar nesse meu sonho.

Finalizando, agradeço a todas as pessoas que contribuía direta ou indiretamente para elaboração do trabalho, muitíssimo obrigada!!

## **Resumo**

PIRES, G. O. (2016). **Comportamento mecânico dos efeitos da substituição parcial do cimento por sílica ativa em Eco Concretos**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2016.

A indústria de produção das ligas de ferro-silício também produz toneladas de subprodutos como a sílica ativa, que também pode ser utilizada em concretos e argamassas em substituição/adição em relação ao cimento. O objetivo principal dessa dissertação é avaliar se a substituição parcial do cimento por sílica ativa afeta o desempenho de concretos com agregado graúdo reciclado de concreto. O programa experimental foi dividido em três etapas, primeiramente foi feita a caracterização do material e beneficiamento do AGRC. A segunda etapa constou da elaboração dos traços para diferentes tipos de concretos pelo método IPT/EPUSP, sendo o mesmo dividido em três grupos com 0%, 25% e 50% de utilização de AGRC em substituição parcial do agregado graúdo natural, cada um grupo subdividido com teores de 0%, 5% e 10% de substituição do cimento por sílica ativa. Na terceira etapa os corpos de prova foram rompidos nas idades de 28 e 91 dias, com os seguintes ensaios: resistência à compressão axial, resistência a tração e módulo de elasticidade. Com os resultados pode-se concluir que desempenho mecânico dos concretos com agregados reciclado de concreto aumentaram significativamente em relação aos concretos de referência (sem sílica) em relação à resistência à compressão e tração e módulo de elasticidade.

## **Palavras-chave**

Agregado Graúdo Reciclados de Concretos, Adições Mineraias, Sílica Ativa, Propriedade Mecânicas.



## **Abstract**

PIRES, G. O. (2016). **Mechanical behavior of the effects of partial replacement of cement by silica fume in eco-friendly concretes.** MSc Thesis, Institute of Technology, Federal University of Para, Belem, Para, Brazil.

The exploitation of natural resources for construction purposes generates millions of tons of waste, thus being developed several studies to recycle this waste and the use of construction waste (CW) in the produced concrete. The pig silicon-iron production industry also produces tons of waste, silica fume, which can also be used in concretes and mortars in replacement / addition relative to cement. The main focus of this research is the study of the interaction of concrete produced with natural aggregates and aggregate coarse recycled concrete (CRCA) with partial replacement of silica fume relative to cement. The main objective of this dissertation is to analyze the influence of different levels of silica fume on the mechanical behavior of concrete produced with natural and concrete aggregates produced with different levels of ACRC. The experimental program was divided into three stages, it was first made the characterization of the material and processing of ACRC. The second phase consisted of the elaboration of the traits for different types of concrete by IPT/EPUSP method, and the same divided into three groups with 0%, 25% and 50% use of AGRC in partial replacement of coarse aggregate, each subdivided group levels with 0%, 5% and 10% replacement of cement with the silica fume. After curing the concrete were tested at the ages of 28 and 91 days with the following assays: compressive strength, splitting tensile strength and static modulus of elasticity. With the results can be concluded that mechanical performance of concrete with recycled concrete aggregates increased significantly in relation to the concrete reference (without silica) with respect to compressive strength and tensile and modulus of elasticity.

## **Keywords**

Recycled Coarse Aggregate Concrete, Silica Fume, Mineral Additives, Mechanical Properties.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	1
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
1.3 QUESTÕES DE PESQUISA .....	4
1.4 OBJETIVO .....	4
1.5 DELIMITAÇÃO .....	5
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO .....	6
2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO.....	7
2.2.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	7
2.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	9
2.2.3 MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA .....	11
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO .....	12
2.3.1 TRABALHABILIDADE .....	13
2.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	13
2.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	14
2.4 SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS .....	15
2.4.1 A SÍLICA ATIVA.....	15
2.4.2 EFEITOS DA SÍLICA ATIVA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	20
2.4.3 CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	20
2.4.3.1 CONSUMO DE ÁGUA .....	21
2.4.3.2 CALOR DE HIDRATAÇÃO.....	21

2.5 INTERAÇÃO DA SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO.....	22
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	24
3.1 ASPECTOS GERAIS.....	24
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	25
3.2.1 CIMENTO.....	25
3.2.2 AGREGADO MIÚDO.....	26
3.2.3 AGREGADO GRAÚDO NATURAL.....	27
3.2.4 AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO.....	28
3.2.5 SÍLICA ATIVA.....	31
3.2.6 ÁGUA.....	32
3.2.7 ADITIVO.....	32
3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	32
4. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS COM AGREGADOS NATURAIS (AG0SA0, AG0SA5 E AG0SA10).....	38
4.1.1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS.....	38
4.1.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	39
4.1.3 AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	41
4.2 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS COM 25% DE SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR AGREGADO RECICLADO (AG25SA0, AG25SA5 E AG025SA10).....	42
4.2.1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	42
4.2.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	43
4.2.3 AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	44
4.3 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS COM 50% DE SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR AGREGADO RECICLADO (AG50SA0, AG50SA5 E AG050SA10).....	45
4.3.1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	45

4.3.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	47
4.3.3 AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	49
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	51
5.1 CONCLUSÕES DAS ANÁLISES.....	51
5.2 CONCLUSÕES GERAIS .....	52
5.3 SUGESTÕES DE PESQUISAS.....	52
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
7. APÊNDICES .....	60
7.1 APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS REALIZADOS....	60
7.2 APÊNDICE B – RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICA REALIZADAS NOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	78
7.2.1 TESTE DE NORMALIDADE .....	78
7.2.2 TESTE DE HOMOGENEIDADE .....	78
7.2.3 ANÁLISE ENTRE IDADES ( <i>TESTE T NÃO PAREADO</i> ).....	78
7.2.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	79
7.2.4 ANÁLISE ENTRE GRUPOS (ANOVA DE UMA VIA).....	81
7.2.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	81
7.2.4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	82
7.2.4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	83
7.2.5 COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS.....	84
7.2.5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	84
7.2.5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	85
7.2.5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	86

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Levantamento bibliográfico relativo à taxa de absorção dos agregados reciclados de concreto. Fonte: Cordeiro, 2013. ....	10
Tabela 2 - Levantamento bibliográfico relativo à massa específica e massa unitária dos agregados reciclados de concreto. Fonte: Cordeiro, 2013. ....	12
Tabela 3 - Relação entre produção da liga metálica e captação de sílica ativa. Fonte: Dastol, 1984 citado por Dal Molin, 2011. ....	16
Tabela 4 - Composições químicas típicas de sílica ativa de diferentes fontes de produção. Fonte Hjorth, 1982. ....	17
Tabela 5 - Exigências químicas e físicas para a sílica ativa. Fonte: NBR 13956 (ABNT 2012). ....	20
Tabela 6 - Representação das misturas de concreto, expansão das representações e grupos. Fonte: Dilbas, 2014. ....	22
Tabela 7 - Representação das misturas, expansão das representações e os grupos de concreto produzidos. ....	25
Tabela 8 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI. ....	26
Tabela 9 - Características físicas do agregado miúdo. ....	26
Tabela 10 - Características físicas do agregado graúdo. ....	28
Tabela 11 - Características físicas do agregado graúdo reciclado. ....	30
Tabela 12 - Características da Sílica Ativa. ....	31
Tabela 13 - Proporcionamento dos concretos em função da porcentagem de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado. ....	34
Tabela 14 - Caracterização do agregado graúdo, bem como o consumo estimado para moldagem de 12 corpos de prova cilíndrico de (Ø10x20) cm. ....	35
Tabela 15 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC). ....	60
Tabela 16 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC). ....	61
Tabela 17 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC). ....	62
Tabela 18 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC). ....	63

Tabela 19 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC). .....	64
Tabela 20 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC). .....	65
Tabela 21 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC). .....	66
Tabela 22 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC). .....	67
Tabela 23 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC). .....	68
Tabela 24 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC). .....	69
Tabela 25 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC). .....	70
Tabela 26 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC). .....	71
Tabela 27 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC). .....	72
Tabela 28 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC). .....	73
Tabela 29 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC). .....	74
Tabela 30 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 91 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC). .....	75
Tabela 31 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC). .....	76
Tabela 32 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 91 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC). .....	77
Tabela 33 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0). Resultados de ensaio de resistência à compressão axial. ....	79
Tabela 34 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG25). Resultados de ensaio de resistência à compressão axial. ....	79
Tabela 35 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG50). Resultados de ensaio de resistência à compressão axial. ....	79

Tabela 36 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).....	79
Tabela 37 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).....	80
Tabela 38 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).....	80
Tabela 39 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).....	80
Tabela 40 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG25)...	80
Tabela 41 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG50)...	80
Tabela 42 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG0), aos 28 e 91 dias. ....	81
Tabela 43 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG25) aos 28 e 91 dias de idade. ....	81
Tabela 44 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG50), aos 28 e 91 dias. ....	81
Tabela 45 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG0) aos 28 e 91 dias. ....	82
Tabela 46 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG25) aos 28 e 91 dias. ....	82
Tabela 47 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG50) aos 28 e 91 dias. ....	82
Tabela 48 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG0) aos 28 e 91 dias. ....	83
Tabela 49 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG25) aos 28 e 91 dias. ....	83
Tabela 50 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG50) aos 28 e 91 dias. ....	83
Tabela 51 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG0 (Os números em vermelho indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	84
Tabela 52 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG25 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	84
Tabela 53 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG50 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	84

Tabela 54 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG0 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	85
Tabela 55 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG25 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	85
Tabela 56 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG50 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	85
Tabela 57 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG0 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	86
Tabela 58 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG25 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	86
Tabela 59 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG50 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$ ).....	86



## Lista de Figuras

Figura 1 - Diferença entre matrizes de (a) concreto com agregado gráúdo natural (b) concreto com agregado gráúdo reciclado de concreto. Fonte: Behera <i>et al</i> , 2014. ....	7
Figura 2 - Curva granulométrica de agregados reciclados e agregados naturais. Fonte: adaptado, de Gayarre <i>et al</i> , 2015. ....	9
Figura 3 - Representação esquemática das condições de umidade do agregado para concreto. Fonte: Neville, 1997. ....	10
Figura 4 - Esquema de produção do silício metálico e captação da sílica ativa. Fonte: Dal Molin, 2011). ....	16
Figura 5 - Sílica ativa resultante de silício metálico proveniente de uma indústria a) da Noruega e b) do Brasil. Fonte: Dal Molin, 2011. ....	18
Figura 6 - Micrografias de partículas de sílica ativa obtidas com microscópio eletrônico de varredura (elétrons secundários). Magnificação: (a) 20.000 vezes, (b) 80.000 vezes. Fonte: Cortesia Aguida G. de Abreu. ....	18
Figura 7 - Difratoograma típico da sílica ativa proveniente da produção de silício metálico, mostrando o halo de amorfismo. Fonte: Dal Molin, 2011.....	19
Figura 8 - Resultado de resistência à compressão axial. Fonte: de Dilbas, 2014.....	23
Figura 9 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural. ....	27
Figura 10 - Curva Granulométrica do agregado gráúdo natural.....	28
Figura 11 - Processo de produção do agregado gráúdo reciclado de concreto (a) corpos de prova de concreto; (b) britador de mandíbulas; (c) peneirador mecânico e (d) agregado gráúdo reciclado de concreto. ....	29
Figura 12 - Curva granulométrica do AGRC. ....	30
Figura 13 - Difratoograma de saios-X da sílica ativa.....	32
Figura 14 - Curva de Dosagem do AG0SA0, AG25SA0 e AG50SA0. Fonte: adaptado, Lopes <i>et al</i> , 2015. ....	34
Figura 15 - Quantidade de aditivo (%) em relação a massa de cimento adicionado na mistura com 0% de substituição de agregado gráúdo – AG0.....	37
Figura 16 - Resistência à compressão axial do concreto tipo AG0 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ). ....	39

Figura 17 - Resistência à tração por compressão diametral para concretos do tipo AG0, para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ).....	40
Figura 18 - Módulo de elasticidade dos concretos AG0 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento pela sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ).....	41
Figura 19 - Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão. Alves, 1993; Isaia, 1995; Dal Molin, 1995; Sllevold, 1987.....	42
Figura 20 - Resistência à compressão axial do concreto tipo AG25 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ).....	43
Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral para concretos do tipo AG25, para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ).....	44
Figura 22 - Módulo de elasticidade dos concretos AG25 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento pela sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ).....	45
Figura 23 - Resistência à compressão axial do concreto tipo AG50 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ).....	46
Figura 24 - Resultado das resistências à compressão de concretos preparados com agregado reciclados e sílica ativa em relação à concretos de referência (com agregados naturais). Fonte: adaptado de Mukharjee <i>et al</i> , 2014.....	47
Figura 25 - Resistência à tração por compressão diametral para concretos do tipo AG50, para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ).....	48

Figura 26 - Variação da resistência à tração. Fonte adaptado de Mukharjee e Barai, 2014. .....	49
Figura 27 - Módulo de elasticidade dos concretos AG25 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento pela sílica ativa. Valores expressos em média $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$ ). .....	50

## Lista de Símbolos

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta dissertação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$f_c$	resistência à compressão do concreto
$f_{ck}$	resistência à compressão característica do concreto

## LISTA DE ABREVIATURAS

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta qualificação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
A/C	Relação Água / Cimento
AGN	Agregado graúdo natural
AGRC	Agregado graúdo de concreto reciclado
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
GAEMA	Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais
GPMAC	Grupo de Pesquisa de Materiais de Construção Civil
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Estado do Pará
RCA	Resistência à Compressão Axial
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SA	Sílica Ativa
UFPA	Universidade Federal do Pará
CWW	<i>Civil Construction Waste</i>

## 1. INTRODUÇÃO

O capítulo de introdução busca situar o leitor desta dissertação, através da motivação da pesquisa, contextualização e justificativa do tema proposto, das questões de pesquisa, dos objetivos e delimitações.

### 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A motivação para a escolha dessa pesquisa surgiu pelo envolvimento da pesquisadora com projetos relacionados ao reaproveitamento de resíduos, projetos estes que são realizados pelo grupo de pesquisa Grupo de Pesquisa de Materiais de Construção Civil (GPMAC) e Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais (GAEMA), da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Através destes projetos buscam-se avaliar as características de agregados reciclados de resíduos da construção civil (RCC), de forma que sejam estudadas as propriedades dos concretos e argamassas produzidos com estes resíduos. Essa dissertação tem como foco o estudo das propriedades mecânicas de concretos produzidos com RCC com adição de sílica ativa.

### 1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A crescente preocupação com a sustentabilidade do planeta é de fato uma constante motivação para melhoria contínua de diversos processos produtivos no sentido de reduzir utilização de matéria prima e reutilizar resíduos, na construção civil e em outros segmentos. Essa preocupação se deve ao fato da enorme quantidade de geração de poluentes, resíduos, emissões de gás nocivos na atmosféricas, contaminação e utilização de água, emitida por esses setores.

Sabe-se que a construção civil possui grande impacto no que diz respeito ao consumo de recursos naturais e danos ambientais, além de ser um dos maiores geradores de resíduos é também responsável por grande parte do consumo dos recursos naturais. Entretanto, diminuir o ritmo da construção civil, significa deixar uma grande parcela da população mundial vivendo em situação precária (AGOPYAN, 2013). Torna-se assim vital intervir nesta atividade, no sentido de se caminhar para uma construção sustentável.

De acordo com o *Worldwatch Institute*, a indústria da construção civil consome mais de um terço dos recursos naturais, incluindo em torno de 12% da água, é responsável pela média de 25% a 40% do consumo mundial de energia e também por produzir de 30% a 40% de todas as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Segundo relatório da *Global, Regional and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions* de 2013, a fabricação, produção e transporte de materiais na construção geram um alto nível de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Desde 1751 cerca de 365 milhões de toneladas de gás carbônico foram liberadas na atmosfera, sendo que somente entre 2009 e 2010 ocorreu um incremento de 9,2 milhões de toneladas e, por exemplo, as emissões devidas à queima de combustíveis fósseis para a produção de cimento (450 milhões de toneladas de carbono em 2010) duplicaram desde meados dos anos 1990, representando atualmente 4,9% de liberação mundial de CO<sub>2</sub>.

O relatório de 2013 apresentado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento apresenta um consumo de cimento no Brasil de 71 milhões de toneladas, representando um crescimento de 49% em dez anos e elevando o consumo per capita brasileiro para 353 Kg/hab.ano, a maior marca de toda a história. Grande parte das emissões de gás carbônico são reduzidas pelo emprego de resíduos e pozolanas para compor o produto final.

No Brasil, em termos legais, foi publicado a resolução CONAMA nº 307 de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção. Em 2010 foi criada a lei 12.305/2010, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), segundo a mesma os resíduos da construção civil (RCC) são “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis”, a PNRS também incentiva a eliminação de deposições irregulares, além de exigir planejamentos públicos em nível nacional, estadual, metropolitano, municipal e impor às empresas particulares a elaboração de seus próprios planos de gerenciamento. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou também as normas regulamentadoras de resíduos sólidos, a NBR 15112 (ABNT, 2004) e a NBR 15116 (ABNT,2004).

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), apenas oito estados brasileiros já possuem a Política Estadual dos Resíduos Sólidos, cerca de 1% dos municípios brasileiros

estabeleceram seus planos de gerenciamento de RCC e em muitas cidades não há sequer alternativa para reciclar o RCC e o resíduo acaba sendo aterrado.

Para encorajar e promover o uso de agregados reciclados, agências governamentais de todo o mundo, estão introduzindo taxas e demais legislações em uma tentativa de incentivar a utilização de resíduos da construção, com variado grau de sucesso. Atualmente, países como Espanha, Portugal e Alemanha estão utilizando as normas de dimensionamento de estruturas em concreto convencional para projeto e execução de novas estruturas onde o agregado graúdo natural é substituído por uma baixa porcentagem de agregado RCC (Mehta, 2014).

Atualmente vários estudos estão em andamento sobre a reutilização de resíduos da construção civil como agregados para novos concretos e argamassas, como o trabalho de Dilbas, 2014 que estuda a interação da sílica e agregado graúdo reciclado de concreto (mecânico e de durabilidade). Dessa forma este reaproveito tem importância ambiental e também financeira, pois em determinadas regiões já existem a precariedade de matéria-prima.

A substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados apresenta diversas vantagens como economia na aquisição de matéria-prima, redução da poluição gerada pela produção dos agregados e melhoria na preservação das reservas naturais e também a grande disponibilidade de material sem destinação final (PEREIRA *et al*, 2012).

O resíduo de concreto se destaca entre os RCC, pois possui o maior potencial de uso, visto que é mais homogêneo e apresenta menor grau de contaminação (com plásticos, metais, vidros, tintas e etc) se comparado aos RCC mistos (FEDUMENTI, 2013). Estes resíduos podem ser provenientes de obras de demolições de estruturas de edificações, produção de elementos de concreto pré-moldados, usinas de concreto e laboratórios de engenharia.

Outro subproduto que atualmente está sendo utilizado comercialmente é a sílica ativa. A sílica ativa (SA) é um resíduo das indústrias de silício metálico e carbono, utilizado como pozolana devido à grande presença de sílica amorfa. Esta pozolana é utilizada como substituição ou adição ao cimento na produção de concretos e argamassas, em composições cimentícias a SA tem sido utilizada para aumentar a resistência e compacidade devido, principalmente, à ocorrência de reações pozolânicas e ao efeito físico filler.



Dentro dessa linha de pesquisa, o uso de sílica ativa é crescente na incorporação em concretos, em função dos benefícios citados anteriormente. Vários estudos foram realizados para avaliar a melhor forma de beneficiamento da sílica para incorporação no concreto produzido com agregados reciclados, citando-se como os mais recentes DILBAS *et al.* (2014); ÇAKIR (2014); KOU (2014).

Estudos aprofundados sobre a associação do uso de agregados reciclados e pozolanas ainda não são totalmente expressivos e divulgados, portanto é necessário um maior conhecimento das propriedades. Logo, se faz necessário um estudo amplo e contínuo sobre as propriedades deste concreto produzido com agregado reciclado e incorporação de sílica ativa a fim de obter maior conhecimento das propriedades da associação destes materiais, pois quando adicionados ou substituídos ao concreto e/ou argamassa modificam suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

O termo “eco concretos” é utilizado para especificar pesquisas de concretos com diferentes tipos de resíduos, em inglês encontra-se como “*eco friendly*”.

Torna-se imprescindível uma avaliação profunda sobre o comportamento mecânico do concreto, pois somente assim poderemos garantir o início de uma vasta inserção do uso de resíduos reciclados no setor da construção e diminuir assim o uso de recursos naturais.

### 1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

O presente trabalho se baseia na seguinte questão de pesquisa:

“A substituição parcial do cimento por sílica ativa influencia significativamente nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos com agregados reciclados e naturais?”

### 1.4 OBJETIVO

O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar a influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa afeta o desempenho mecânico de concretos com agregado graúdo reciclado de concreto.

A fim de atingir o objetivo principal do estudo, seguem-se alguns objetivos específicos:

- Verificar a influência dos teores de substituição de cimento por sílica ativa na resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregados naturais;
- Verificar a influência dos teores de substituição de cimento por sílica ativa na resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade de concretos produzidos com AGRC;
- Verificar a interação entre agregados reciclados de concreto com a sílica ativa na resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade de concretos;

## 1.5 DELIMITAÇÃO

A presente pesquisa delimita-se ao estudo do efeito da sílica ativa nas propriedades mecânicas nos concretos produzidos com agregados naturais e agregado graúdo reciclado de concreto.

## 1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução e contextualização do tema, as motivações e questões de pesquisa, os objetivos, delimitação e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo consta da revisão bibliográfica sobre os diversos aspectos relativos às características da sílica ativa e agregados graúdos reciclados de concreto, comportamento de agregados graúdos reciclados e dos concretos produzidos com agregados reciclados e adições minerais, assim também como o comportamento mecânico dos concretos (com agregado reciclado e com agregado natural).

No terceiro capítulo é apresentado o programa experimental.

No quarto a análise e discussão dos resultados das etapas da pesquisa.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões a que este estudo conduziu e sugestões para a continuação da pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Agregados é a denominação genérica dada aos materiais que são acrescentados ao cimento e à água para se obterem as argamassas e os concretos. Os agregados, apresentam-se em forma de grãos, tais como as areias e britas, e devem ser inertes, ou seja, não devem provocar reações indesejáveis, (STARLING *et al*, 2006).

Os agregados constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos em que são utilizados isto para concretos e argamassas, desempenhando, em consequência, um importante papel do ponto de vista do custo total desses produtos. Além disso, propiciam uma menor retração das pastas formadas por cimento e água e aumentam a resistência ao desgaste superficial das argamassas e concretos.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) as características relevantes do agregado para a composição do concreto incluem: porosidade, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes.

Levando essas características em conta, tem-se uma série de tipos de agregados, que são classificados de acordo com a dimensão das suas partículas, massa específica, origem entre outras. No que diz respeito à dimensão das partículas tem-se os agregados graúdos (partículas retidas na peneira de 4,75 mm) e os agregados miúdos (passantes na peneira de 4,75 mm) e quando se diz a respeito a sua origem podem ser classificados em naturais (provenientes de jazidas naturais) ou agregados artificiais (provenientes de rejeitos industriais como a escória de alto-forno e resíduos da construção civil).

O agregado de concreto reciclado é obtido através da britagem e peneiramentos dos resíduos de concreto para esse beneficiamento podem ser utilizados diversos equipamentos (britador de mandíbulas, máquina de abrasão “Los Angeles” entre outras.). Estes agregados possuem diferenças quando comparados ao agregado natural, o que se deve principalmente a argamassa aderida e a pasta de cimento aderidas ao agregado natural (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

As Figuras 1 a e b mostram o diagrama esquemático do concreto com agregado graúdo natural e com agregado graúdo reciclado de concreto, respectivamente, mostrando a diferença básica da matriz entre os dois concretos. O concreto de agregado reciclado consiste de três principais fases, tal como a fase de agregado natural, fase de argamassa e a zona de transição interfacial entre o agregado graúdo e a matriz de argamassa aderida.

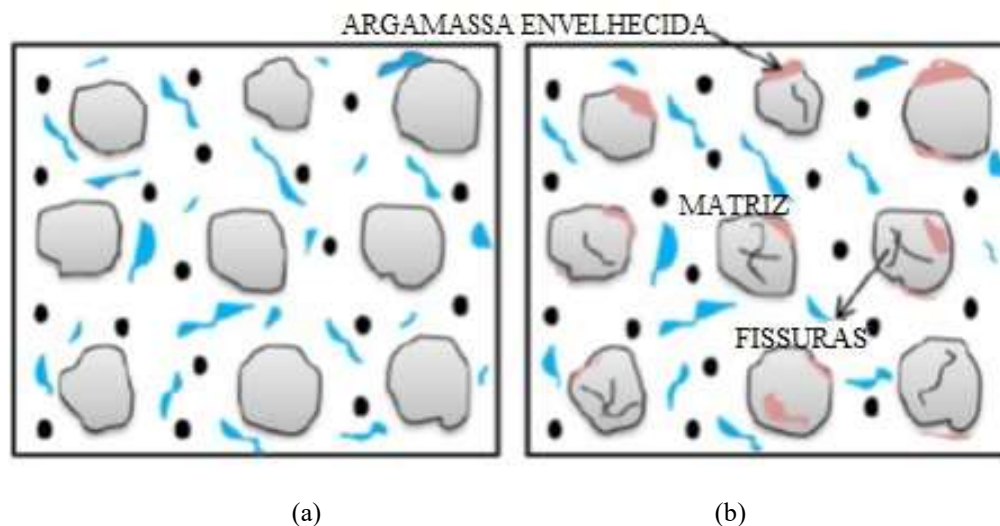


Figura 1 - Diferença entre matrizes de (a) concreto com agregado graúdo natural (b) concreto com agregado graúdo reciclado de concreto. Fonte: Behera *et al*, 2014.

## 2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO

O conhecimento das propriedades físicas de todos os materiais que fazem o concreto é extremamente importante, pois os mesmos influenciam diretamente no comportamento do mesmo, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Este capítulo discutirá algumas propriedades relacionadas aos agregados.

### 2.2.1 Composição granulométrica

Segundo Mehta e Monteiro (2014), composição granulométrica é a distribuição de dimensão das partículas de um material granular entre várias faixas granulométricas, normalmente expressas em termos de porcentagem acumulada maior ou menor do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou da porcentagem entre certa faixa de aberturas das peneiras.

Uma distribuição granulométrica contínua indica que o agregado está uniformemente graduado para todos os tamanhos, permitindo uma ampla possibilidade de interação entre as partículas, e proporcionando um grau de compactidade e uma resistência mecânica mais elevada (MORALES *et al*, 2011).

Padovan (2013), afirma que a granulometria de partículas sólidas é definida como a determinação do tamanho das mesmas, bem como a frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de dimensão. A composição granulométrica dos agregados reciclados de concreto tende a ser um pouco mais grossa quando comparada aos agregados naturais, e através desta é conhecida a quantidade de finos existentes no material, que são oriundos da argamassa que se desprende do agregado natural.

Há diversos fatores que influenciam na granulometria do agregado reciclado, dentre eles destacam-se o tipo de resíduo processado, a relação água/cimento do concreto de origem beneficiado, o tipo de equipamento utilizado para cominuição, a regulagem do equipamento, tipo de sistema adotado no peneiramento (LIMA, 1999; ALTHEMAN 2002; SANCHEZ, 2011).

Em relação ao tipo de britador, Hansen (1992) cita que os britadores de mandíbulas quebram somente uma pequena fração dos agregados naturais presente no concreto, enquanto os britadores de impacto quebram igualmente partículas de argamassa aderida e agregados graúdo naturais, produzindo agregados de qualidade inferior, do ponto de vista de quantidade de finos.

Sobre os finos, nota-se que devido a movimentação do material produzido pela britagem, independentemente do tipo de britador utilizado, desprendem-se finos, o que poderá ser um problema, pois afeta diretamente na aderência da pasta com os agregados para produção de concretos.

A Figura 2, de Gayare *et al* (2015), apresenta a distribuição granulométrica de diversos tipos de agregados (naturais e reciclados) aonde observou que a proporção de agregados graúdos e miúdos gerados, gerados através de britador de mandíbulas, apresentam proporções semelhantes, porém os resultados apresentam que o tipo resíduo influencia, nas características destes agregados reciclados.

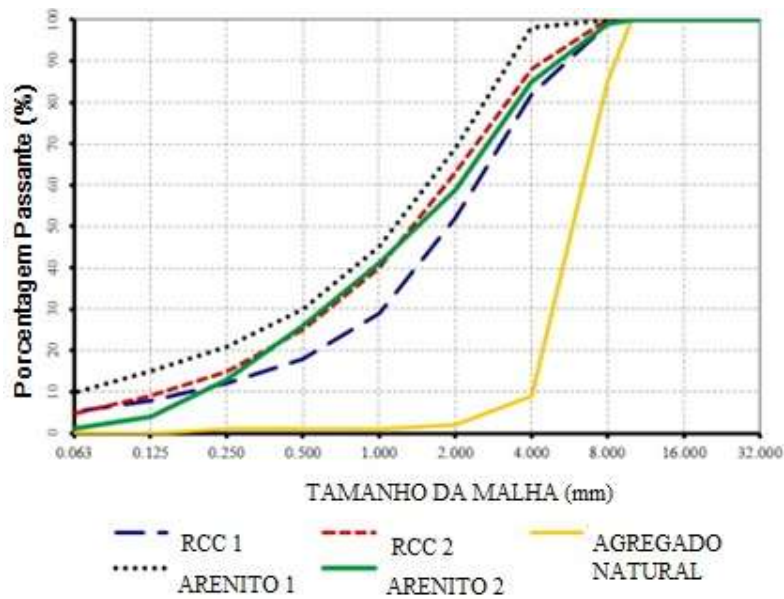


Figura 2 - Curva granulométrica de agregados reciclados e agregados naturais. Fonte: adaptado, de Gayarre *et al*, 2015.

### 2.2.2 Absorção de água

Segundo Mehta e Monteiro (2014), quando todos os poros permeáveis estão saturados e não há uma película ou filme de água na superfície, o agregado estará na condição saturada superfície seca (SSS). A capacidade de absorção (ou simplesmente absorção) é definida como a quantidade de água total de água necessária para levar um agregado da condição seca em estufa à condição (SSS). A absorção efetiva é definida como a quantidade de água necessária para levar o agregado da condição seca ao ar à SSS.

A Figura 3 apresenta um esquema que representa as devidas características de umidade de agregados.

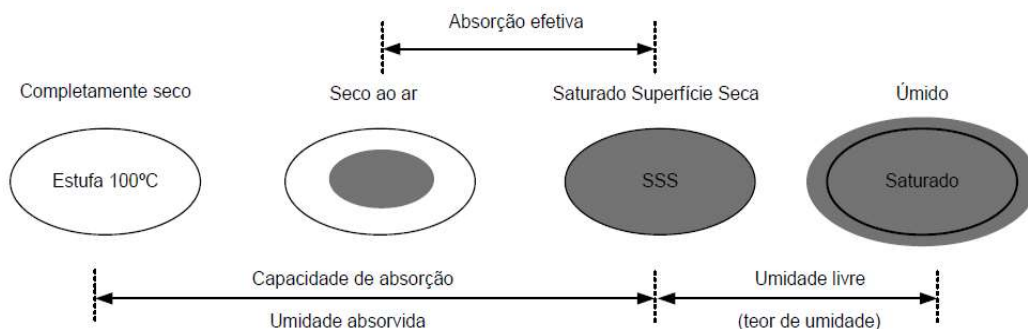


Figura 3 - Representação esquemática das condições de umidade do agregado para concreto. Fonte: Neville, 1997.

Geralmente agregados reciclados possuem valores de absorção de água entre 2,0% e 11,50%, o que é normalmente aceito para aplicação em concretos, porém precauções deverão ser tomadas, pois agregados reciclados apresentam uma alta porosidade, fatores como processo de britagem e qualidade do material reciclado influenciam na taxa de absorção. A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados de absorção de agregados graúdos reciclados de concreto.

Tabela 1 - Levantamento bibliográfico relativo à taxa de absorção dos agregados reciclados de concreto.

Fonte: Cordeiro, 2013.

Autor	Fração Granulométrica (mm)	Taxa de absorção (%)
Barra (1996)	6 - 12	7,5
	12 - 20	6,9
Soberón (2002)	5 - 10	6,8
	10 - 20	5,8
Butler (2003)	0 - 20	4,74 - 6
Poon <i>et al.</i> (2004)	0 - 10	7,6
	10 - 20	6,3
Sanchez (2004)	4 - 8	5,1 - 11,5
	8 - 16	4,2 - 8,8
Matias e Brito (2005)	2 - 25	4,1
Gomes (2007)	1 - 38	8,5
Yong e Teo (2009)	10 - 20	6,4
Rahman (2009)	10 - 20	3,48
Padmini <i>et al.</i> (2009)	10 - 40	2,2 - 5
Werle (2010)	10 - 20	6,07
Corinadelsi (2010)	4 - 8	8,8
	8 - 16	6,8
Kim <i>et al.</i> (2012)	4 - 8	4,55
Manzi <i>et al.</i> (2013)	16 - 25	7
Uddin <i>et al.</i> (2013)	0 - 20	3 - 7,70

Os resultados da absorção de água são muito variáveis, contudo estas diferenças se devem ao fato de diversos fatores, como origem dos agregados, resistência do concreto utilizado, britador, método de ensaio, diferença granulométrica.

### 2.2.3 Massa específica e massa unitária

Para fins de dosagem do concreto, não é necessário determinar a massa específica real de um agregado. Para efeito de dosagem, é necessário que se conheça o espaço ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas. Para a definição das dosagens de concreto, além da massa específica aparente, também são necessários dados sobre a massa unitária, que é definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume, MEHTA e MONTEIRO, 2014. Os agregados naturais são porosos; os valores de porosidade de até 2% são comuns para rochas ígneas intrusivas, de até 5% para rochas sedimentares compactas e de 10 a 40% para arenitos e calcários muito porosos, a Tabela 2 apresenta um resumo bibliográfico levantado por (CORDEIRO, 2013) relativo à massa específica e massa unitária de agregados reciclados em função de suas frações granulométricas.



Tabela 2 - Levantamento bibliográfico relativo à massa específica e massa unitária dos agregados reciclados de concreto. Fonte: Cordeiro, 2013.

Autor	Fração Granulométrica (mm)	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )
Hansen e Narud (1983)	4 - 8	2,34 - 2,35	-
	8 - 16	2,42 - 2,45	-
	16 - 32	2,48 - 2,49	-
Barra (1996)	6 - 12	2,41	-
	12 - 20	2,43	-
Soberón (2002)	5 - 10	2,42	-
	10 - 20	2,41	-
Santo <i>et al</i> (2002)	5 - 19	2,46 - 2,48	1,37 - 1,39
Katz (2002)	10 - 20	2,55 - 2,59	1,43 - 1,46
Butler (2003)	0 - 20	2,39 - 2,55	1,25 - 1,29
Sanchez (2004)	4 - 8	2,24 - 2,42	-
	8 - 16	2,33 - 2,47	-
	4 - 16	2,3 - 2,45	-
Matias e Brito (2005)	2 - 25	2,63 - 2,65	1,26
Gomes (2007)	1 - 38	2,52	1,3
Yong e Teo (2009)	10 - 20	2,3	1,32
Rahman (2009)	10 - 20	2,4	-
Padmini <i>et al</i> (2009)	10 - 20	2,38 - 2,56	1,32 - 1,42
Werle (2010)	10 - 20	2,47 - 2,50	1,20 - 1,21
Troian (2010)	10 - 20	2,47 - 2,50	1,18 - 1,21
Cavalheiro (2011)	0 - 20	2,28 - 2,37	1,16
Kim <i>et al</i> (2012)	4 - 8	2,43	-
	10 - 20	2,61	-
Belagra e Beddar (2013)	8 - 25	2,34 - 2,40	1,12 - 1,24
Manzi <i>et al</i> (2013)	16 - 25	2,3	-

Dois importantes fatores podem causar essa grande variabilidade são o processo de reciclagem e a qualidade do material original. Segundo (SILVA *et al.*, 2014) o número de etapas de britagem vai determinar a quantidade de argamassa aderida, sendo que quanto maior a quantidade de etapas de moagem, maior a densidade do agregado reciclado, devido à quebra da pasta de cimento aderida ao agregado reciclado.

### 2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Quando se menciona sobre dosagem e os princípios específicos para selecionar as proporções das misturas do concreto, é necessário saber que o objetivo principal é atingir um equilíbrio razoável entre a trabalhabilidade, a resistência, a durabilidade e o custo do concreto.

### 2.3.1 Trabalhabilidade

Mehta e Monteiro (2014) definem trabalhabilidade como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade, sendo que, o termo manipular inclui todas as operações das primeiras idades tais como lançamento, adensamento e acabamento do material. Ainda segundo os autores, um concreto difícil de lançar e adensar, não só causará o aumento do custo de manipulação, como também terá as suas propriedades mecânicas e de durabilidade afetadas.

Segundo Cordeiro (2013) é um consenso que a presença de agregados reciclados em concreto afeta diretamente a trabalhabilidade. Os fatores principais que influenciam nessa variação são a forma irregular, a textura áspera e superfície porosa por conta da argamassa aderida. Concretos com agregados reciclados, geralmente, apresentam misturas mais secas que as que utilizam agregados naturais, com a mesma relação água/cimento.

### 2.3.2 Resistência à compressão axial

A resistência mecânica é considerada como o principal parâmetro, ou, o mais objetivo, isoladamente, para se avaliar a qualidade do concreto na estrutura. Em particular, a resistência à compressão axial, avaliada por rupturas de corpos de prova moldados representam uma resistência potencial a qual o concreto pode atingir na estrutura.

São vários os fatores que influenciam a resistência mecânica: relação água/cimento, idade, forma e graduação dos agregados, tipo de cimento, forma e dimensão dos corpos de prova, velocidade de aplicação da carga de ensaio, duração da carga. Porém sem dúvidas a relação água/cimento e a porosidade são os fatores mais importantes, porque independente de outros fatores, afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado graúdo.

No Brasil para estimar a resistência à compressão simples ( $f_c$ ), é necessário que o concreto seja moldado em corpo-de-prova segundo à NBR 5738 (ABNT, 2015). Embora outros fatores também influenciem a resistência, as tabelas e os gráficos usados para a dosagem do concreto consideram que a resistência depende unicamente da relação água/cimento e do teor de ar incorporado no concreto. Uma relação mais precisa entre a resistência água/cimento, para determinado conjunto de materiais e condições, pode ser obtida a partir

de experiências anteriores ou do desenvolvimento de dosagens experimentais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

### 2.3.3 Módulo de Elasticidade

As características elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. Apesar do comportamento não-linear do concreto, é necessário estimar o módulo de elasticidade (relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional assumido) para se determinarem as tensões induzidas pelas deformações associadas aos defeitos ambientais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica e é conhecido também como módulo de Young, por referência ao cientista inglês Thomas Young (1773-1829), que estudou o comportamento elástico das barras. A equação que modela o comportamento elástico é conhecida como Lei de Hooke (Equação 1), pelos trabalhos de outro cientista inglês, Robert Hooke (1635-1703), que foi o primeiro a estabelecer experimentalmente a relação linear existente entre tensões e deformações.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\sigma$  = tensão;

E = constante de proporcionalidade;

$\varepsilon$  = extensão do componente ensaiado.

Para Souza (2006), pelo fato de o concreto ser um material que não obedece à lei de Hooke, tanto sob esforços de compressão como de tração, a determinação do módulo de elasticidade de concretos é mais complexa.

O módulo de elasticidade de um material sob tensão ou compressão é dado pela declividade da curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  para o concreto sob carga uniaxial. Uma vez que a curva para o concreto é não-linear, três métodos para calcular o módulo são utilizados. Isso originou três tipos de módulos de elasticidade.

1. Módulo tangente: é dado pela declividade de uma linha traçada de forma tangente à curva de tensão-deformação em qualquer ponto da curva.

2. Módulo secante: é dado pela declividade de uma linha traçada da origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura.
3. O módulo cordal: é dado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos, da curva tensão-deformação. Comparado ao módulo secante, em vez de partir da origem, a linha é traçada de um ponto representando a deformação longitudinal de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$  até o ponto que corresponde a 40% da carga última.

Muitos são os fatores que podem afetar o módulo de elasticidade. Segundo Vogt (2006), ele varia em função das matérias primas utilizadas e de sua resistência mecânica, diferentemente do que se observa nos metais. O mesmo autor explica que, no caso dos aços, independentemente da matéria-prima, a estrutura básica do cristal de ferro é sempre a mesma, pois independentemente da composição, é sempre o cristal cúbico de ferro que se sujeita às deformações elásticas. Já no caso do concreto, o cimento hidratado não tem sempre a mesma estrutura, pois é formado por cristais de diferentes espécies.

## 2.4 SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS

### 2.4.1 A sílica Ativa

A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício (insumo destinado em grande parte à produção de aços comuns, na qual atua como desoxidante) e silício-metálico (insumo utilizado pelas indústrias de alumínio, química – na fabricação de silicone – e eletrônica – na fabricação de semicondutores e células solares). Está sílica é utilizada como substituição ou adição ao cimento na produção de concretos e argamassas, pois possui em sua composição sílica amorfa.

A redução do quartzo em silício a temperaturas de até 2000°C produz vapores de SiO, que se oxidam e condensam na zona de baixa temperatura do forno em partículas esféricas minúsculas, consistindo em sílica não-cristalina. O material, removido por filtragem dos gases expelidos em filtros manga, possui um diâmetro médio da ordem de 0,1  $\mu\text{m}$  e área superficial específica entre 15 e 25  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Comparadas ao cimento Portland comum e cinzas volantes típicas, amostras de sílica ativa mostram distribuições de tamanho de partícula que são duas ordens de grandeza mais finas MEHTA e MONTEIRO (2014). A Figura 4 apresenta, esquematicamente, o processo de produção de silício metálico e de captação da sílica ativa.

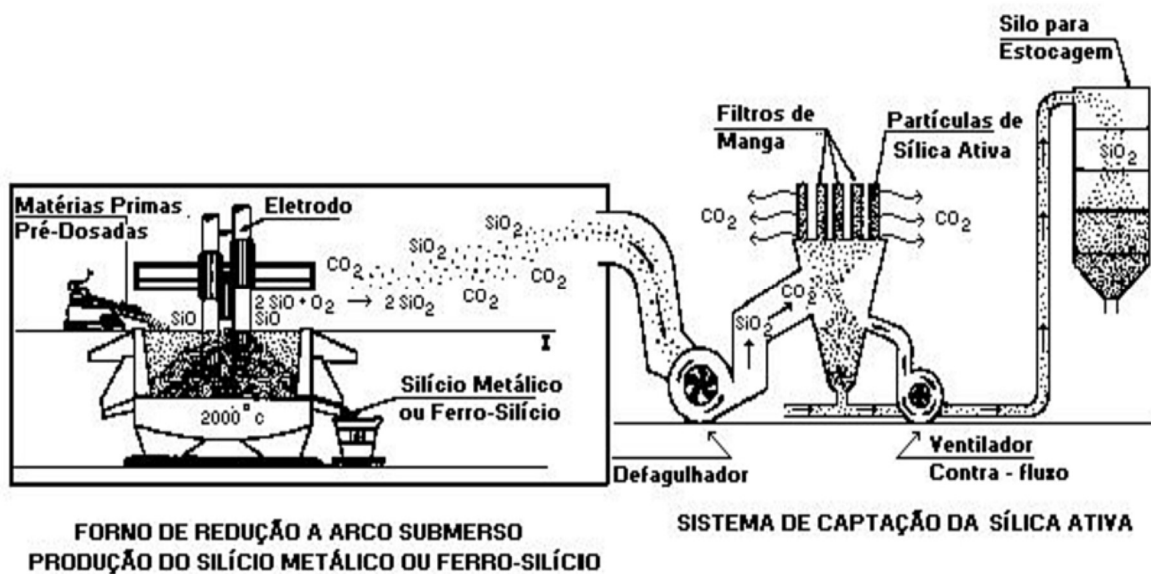


Figura 4 - Esquema de produção do silício metálico e captação da sílica ativa. Fonte: Dal Molin, 2011).

A quantidade de sílica ativa obtida por tonelada de liga metálica produzida pode variar dependendo das matérias-primas utilizadas, do tipo de liga produzida, tipo de forno, modo de operação entre outros fatores. A Tabela 3, apresenta alguns valores médios de sílica ativa captada por tonelada de metal produzido.

Tabela 3 - Relação entre produção da liga metálica e captação de sílica ativa. Fonte: Dastol, 1984 citado por Dal Molin, 2011.

Liga Metálica	Sílica Ativa
1000 kg de silício metálico	550 kg
1000 kg de ferro-silício 75%	350 kg
1000 kg de ferro-silício 50%	90 kg

No anuário de 2010, publicado pela Associação Brasileira de Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico, a produção brasileira referente ao ano de 2004 de silício metálico e ferro-silício 75% foi de 219.813 e 177.245 toneladas, respectivamente (ABRAFE, 2005). Considerando a relação entre produção da liga-metálica e captação de sílica ativa apresentada na Tabela 4, pode-se estimar uma captação cada vez mais potencial no Brasil. A produção mundial encontra-se em torno de 1 milhão de toneladas/ano, sendo os maiores produtores a Noruega e os Estados Unidos MEHTA e MONTEIRO (2008).

Dependendo do tipo de liga silícia produzida, tipo de forno, composição química e dosagem das matérias-primas, resultarão diferentes tipos de sílica ativa no que tange a composição química, cor, distribuição granulométrica e demais características, (DAL MOLIN, 2011). A

Tabela 4 apresenta as composições químicas típicas de sílicas ativas provenientes da produção de silício-metálico e ferro-silício 75%, que podem ser consideradas como representativas das sílicas ativas disponíveis comercialmente.

Tabela 4 - Composições químicas típicas de sílica ativa de diferentes fontes de produção. Fonte Hjorth, 1982.

<b>COMPOSIÇÃO</b>	<b>Silício-metálico (%)</b>	<b>FeSi 75 (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	94 - 98	86 - 90
K <sub>2</sub> O	0,20 - 1,30	0,80 - 2,30
Na <sub>2</sub> O	0,20 - 0,70	1,50 - 3,50
MgO	0,10 - 0,40	0,80 - 1,80
CaO	0,30 - 0,90	1,00 - 3,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08 - 0,30	0,20 - 0,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10 - 0,40	0,20 - 0,60
SiO <sub>2</sub>	0,02 - 0,15	0,30 - 1,00
S	0,10 - 0,30	0,20 - 0,40
Perda ao fogo	0,80 - 1,50	2,00 - 4,00

As partículas de sílica ativa possuem cor que pode variar de cinza claro a escuro, dependendo do excesso de carbono residual proveniente do carvão combustível ou da madeira usada na carga do forno. Quando os gases ascendentes da zona de produção da liga (na parte inferior do forno) esfriam muito rapidamente, uma parcela de carvão pode ficar sem se queimar no condutor de exaustão, produzindo uma sílica ativa de cor cinza mais escura em função da porcentagem de carvão residual (Figura 5-a). Caso a temperatura na parte superior do forno seja mantida em níveis elevados, a maior parte do pó de carvão ascendente queimará, originando uma sílica ativa de cor mais clara (Figura 5-b). O conteúdo de ferro, em menor grau, parece também influenciar a cor da sílica ativa (MALHOTRA, CARETTE & SIVASUNDARAM, 1992).



Figura 5 - Sílica ativa resultante de silício metálico proveniente de uma indústria a) da Noruega e b) do Brasil. Fonte: Dal Molin, 2011.

A distribuição dos tamanhos das partículas de uma sílica ativa típica apresenta a maior parte com diâmetro menor que  $1\mu\text{m}$  com um diâmetro médio de  $0,1$  a  $0,2\mu\text{m}$ , sendo aproximadamente duas ordens de magnitude mais finas que as partículas do cimento Portland ou da cinza volante, (DAL MOLIN, 2011). Na Figura 6, observam-se a forma e o tamanho das partículas da sílica ativa.

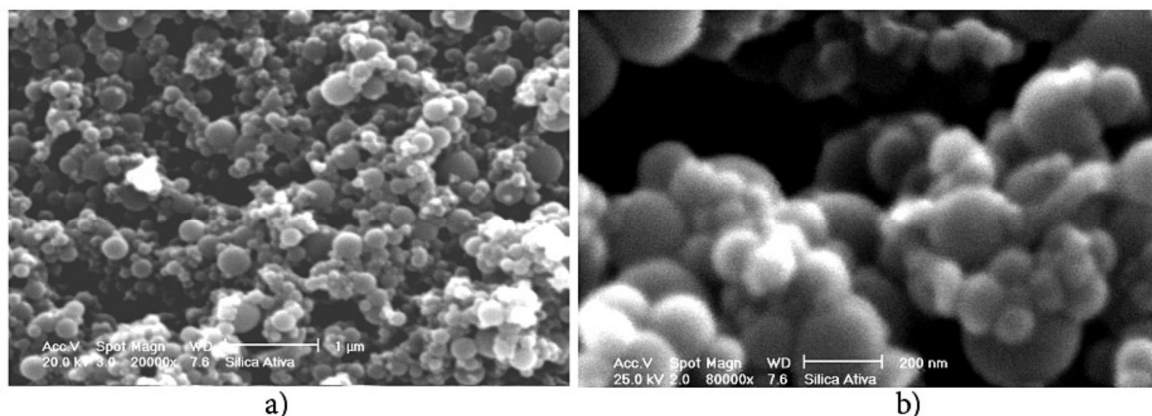


Figura 6 - Micrografias de partículas de sílica ativa obtidas com microscópio eletrônico de varredura (elétrons secundários). Magnificação: (a) 20.000 vezes, (b) 80.000 vezes. Fonte: Cortesia Aguida G. de Abreu.

A sílica ativa proveniente da manufatura do silício é mais fina que a proveniente da manufatura do ferro-silício. Isso se deve às diferenças nas temperaturas alcançadas pelos fornos, que tendem a diminuir à medida que aumenta a proporção de ferro na liga metálica.

A massa específica da sílica ativa encontra-se em torno de  $2200 \text{ kg/m}^3$ , menor que a do cimento Portland comum, de aproximadamente  $3150 \text{ kg/m}^3$  (MALHOTRA, CARETTE e SIVASUNDARAM, 1992).

Pelo fato de ser composta essencialmente ou não cristalina (Figura 7), a sílica ativa é considerada como inofensiva à saúde, pois segundo Dastol (1984), a silicose é doença típica causada por  $\text{SiO}_2$  cristalino.

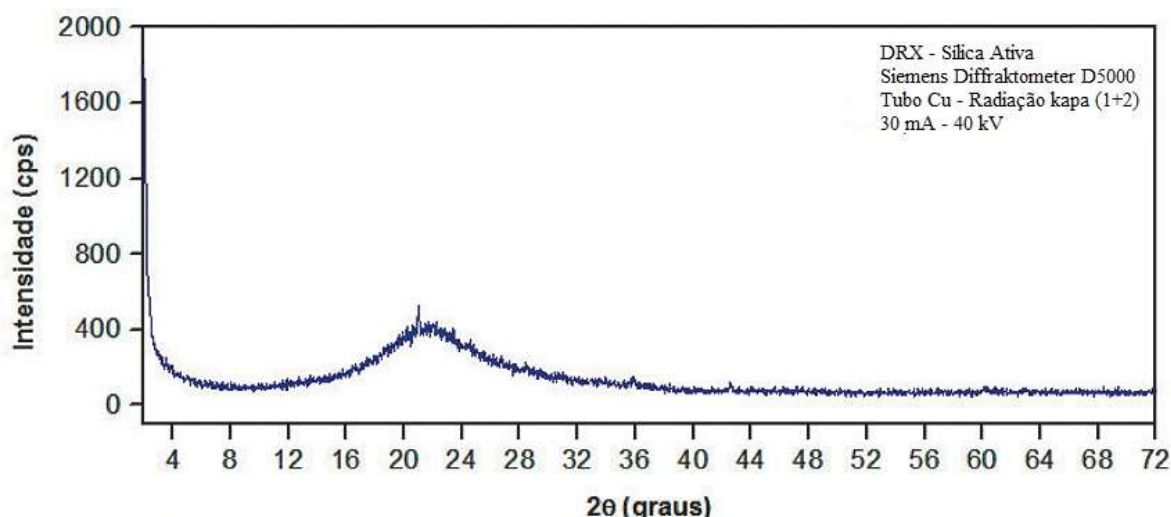


Figura 7 - Difratograma típico da sílica ativa proveniente da produção de silício metálico, mostrando o halo de amorfismo. Fonte: Dal Molin, 2011.

A sílica ativa produz tanto efeitos químicos como físicos na microestrutura do concreto. Ao contrário das pozolanas naturais, escórias e cinzas volantes, a reação  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-SiO}_2$  envolvendo a sílica ativa é rápida (e pouco variável), não sendo necessários longos períodos de cura para atingir as resistências ou baixas permeabilidades desejadas.

Para temperaturas de  $20^\circ\text{C}$ , Maage (1987) afirma que a reação pozolânica inicia por volta do sétimo dia, enquanto para temperaturas mais altas ( $35^\circ\text{C}$ ) a contribuição química já é observada aos dois dias de idade. O efeito microfíler acontece como resultado do tamanho das partículas de sílica ativa, que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para água e atuando como ponto de nucleação, o que dificulta a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio na interface pasta/agregado.

A NBR 13956 (ABNT, 2012) estabelece os requisitos exigíveis no recebimento da sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, bem como para



emprego como adição durante a fabricação do cimento Portland. Esta norma se aplica para todas as formas recebidas da sílica ativa: original ou densificada, não densificada ou em dispersão aquosa. Atualmente, no mercado nacional, somente é comercializada a sílica ativa no estado original.

A Tabela 5 apresenta algumas das exigências da NBR 13956-1 (ABNT 2012) para a sílica ativa, comparativamente à norma ASTM C1240 (2010).

Tabela 5 - Exigências químicas e físicas para a sílica ativa. Fonte: NBR 13956 (ABNT 2012).

Componente	Limite	
	NBR 13956	ASTM C1240
SiO <sub>2</sub>	≥ 105	> 85,0
Umidade (%)	≤ 3,0	< 3,0
Perda ao fogo (%)	≤ 6,0	< 6,0
Equivalente alcalino em NaOH (%)	≤ 1,5	-
Resíduo na peneira 45 45μ (%)	≤ 10,0	< 10,0
Área específica BET (m <sup>2</sup> /g)	≥ 15 ≥ 30	> 15
Índice de pozolanicidade com cimento Portland aos 7 dias (%)	≥ 105	-

A NBR 13956-2 (ABNT, 2012) descreve os métodos de ensaio de laboratório exigíveis na especificação de sílica ativa para uso em concretos, argamassas ou pastas de cimento, bem como a adição durante a fabricação do cimento Portland.

#### 2.4.2 Efeitos da Sílica Ativa nas Propriedades do Concreto

A utilização de sílica ativa no concreto traz benefícios para muitas propriedades do concreto, tanto pelo efeito físico associado pelo reduzido tamanho das partículas tanto quanto pelo efeito químico pozolânico e outras pela ação conjunta dos dois efeitos. A eficiência do material pode variar em função não só da quantidade utilizada e das condições de cura, como também da sua composição química, mineralógica e granulométrica.

#### 2.4.3 Concreto no estado fresco

O concreto poderá ser caracterizado, do ponto de vista reológico, por grandezas como coesão e viscosidade. A coesão do concreto é responsável por sua capacidade de se manter na posição original sob pequenas tensões, e a viscosidade caracteriza a estabilidade do concreto, que envolve sedimentação e segregação, agindo como restrição ao movimento relativo dos

grãos. Essas duas grandezas, oriundas basicamente dos fenômenos de superfície que se de superfície que se devem aos grãos, menores da mistura, são afetadas pela incorporação de adições minerais, principalmente quando seu diâmetro médio é inferior ao cimento, como é o caso da sílica ativa.

Segundo Male (1989), o grande número de pequenas partículas age como bloqueador de poros, aumentando o contato sólido-sólido. Dessa forma, os concretos com adições tendem a ser mais coesos, com redução considerável da tendência à segregação e exsudação, quando comparados a um concreto sem adição.

#### 2.4.3.1 Consumo de água

O consumo de água dos concretos produzidos com adições minerais varia pois depende de fatores como superfície específica de suas partículas e da quantidade utilizada como adição ou substituição ao cimento.

Devido à extrema finura da sílica ativa (superfície específica da ordem de 20.000 m<sup>2</sup>/kg) a água necessária em concretos com essas adições normalmente aumenta com o aumento da porcentagem adicionada para se manter uma mesma trabalhabilidade. Segundo estudos de Mehta (2014) diz que pequenas adições de sílica ativa (2% e 3% sobre a massa do cimento), ao invés de aumentar o consumo de água, podem ser úteis no sentido de melhorar a estabilidade e trabalhabilidade do concreto. As microesferas adicionadas na mistura, apesar de consumirem mais água para molhagem, atuam como rolamentos, facilitando o bombeamento e lançamento do concreto e compensando possíveis perdas de abatimento resultante da mudança do comportamento reológico da mistura.

#### 2.4.3.2 Calor de Hidratação

Normalmente o calor de hidratação gerado, por unidade de tempo, é reduzido com a substituição do cimento pelas adições minerais, já que a quantidade de clínquer diminui, resultando em menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação.

Para adições como a sílica ativa, a redução de calor de hidratação do clínquer pode ser contrabalançada pela capacidade das pequenas partículas da adição em atuar como pontos de nucleação, acelerando a hidratação inicial.

## 2.5 INTERAÇÃO DA SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO.

Atualmente, diversos pesquisadores utilizam adições minerais para adição ou substituição parcial de cimento em concretos produzidos com AGRC. A sílica ativa é uma dessas adições. Segundo Dilbas (2014), a resistência à compressão diminui conforme se aumenta a substituição de agregados naturais por AGRC, no entanto a sílica ativa é uma alternativa para recuperar a resistência à compressão axial.

A Figura 8 e Tabela 6 apresentam valores de pesquisa de diferentes teores de substituição de sílica e diferentes teores de substituição de agregado natural por AGRC, no qual pode-se verificar que concretos produzidos com teores de sílica ativa mostraram uma melhora em relação a resistência à compressão axial.

Tabela 6 - Representação das misturas de concreto, expansão das representações e grupos. Fonte: Dilbas, 2014.

Expansão	Expansão da representação
Grupo 1	
NAC	Concreto Convencional com agregado natural NA1 e NA2
RA1C	Concreto contendo dois tipos de agregado natural NA1 e agregado reciclado tipo RA1
RA2C	Concreto contendo dois tipos de agregado natural NA1 e agregado reciclado tipo RA2
RA12C	Concreto contendo dois tipos de agregado reciclado RA1 e agregado reciclado tipo RA2
Grupo 2	
NACSF5	Concreto Convencional com agregado natural NA1, NA2 e 5% de sílica
RA1CSF5	Concreto contendo RA1, NA2 e 5% de sílica
RA2CSF5	Concreto contendo NA1, RA2 e 5% de sílica
RA12CSF5	Concreto contendo RA1, RA2 e 5% de sílica
Grupo 3	
NACSF10	Concreto Convencional com agregado natural NA1, NA2 e 10% de sílica
RA1CSF10	Concreto contendo RA1, NA2 e 10% de sílica
RA2CSF10	Concreto contendo NA1, RA2 e 10% de sílica
RA12CSF10	Concreto contendo RA1, RA2 e 10% de sílica

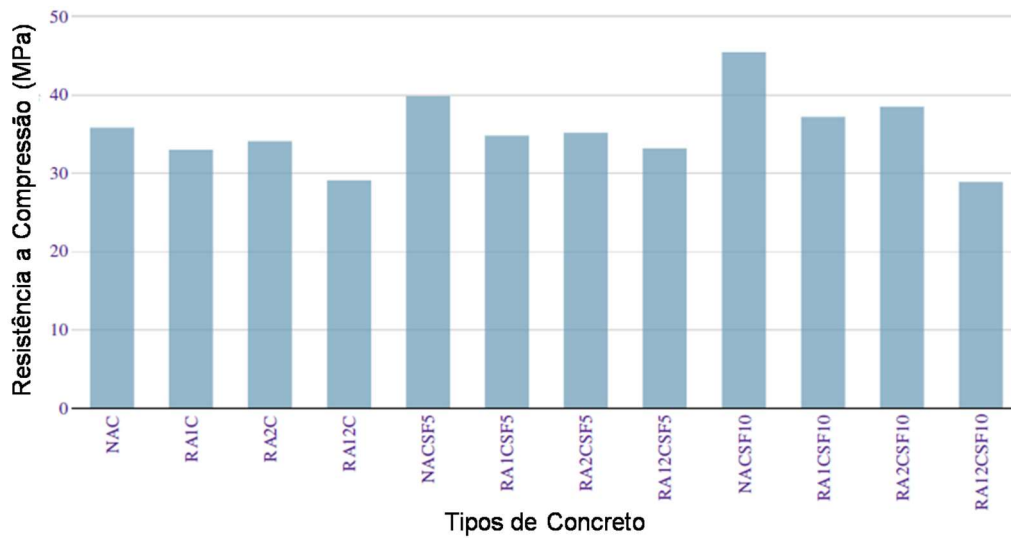


Figura 8 - Resultado de resistência à compressão axial. Fonte: de Dilbas, 2014.

Çakir (2014) afirma que o concreto com 100% de substituição de agregado natural por agregado reciclado pode diminuir até 24% de sua resistência aos 28 dias, amostras contendo de 5% até 10% de sílica ativa apresentam aumento de 30% a 60% de sua resistência à compressão axial aos 28 dias e também que a sílica ativa melhora a resistência à tração.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 ASPECTOS GERAIS

O programa experimental foi dividido em 4 fases. Na fase 1 foi feita a escolha do agregado de concreto bem como seu beneficiamento para utilização nos concretos e escolha dos métodos de caracterização, na fase 2 foi realizado a caracterização do material. Na fase 3 foram produzidos os concretos e na fase 4 foram realizados os ensaios mecânicos.

No estudo do comportamento destes concretos foram definidas algumas variáveis de controle para cada tipo de concreto, sendo estas as que foram fixadas durante o experimento e variáveis de respostas. Adotou-se assim as seguintes variáveis de controle:

- **Teor de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado (nos concretos com utilização de AGRC):** 0%, 25% e 50%;
- **Teor de substituição do cimento pela sílica ativa (em todos os concretos):** 0%, 5% e 10%;
- **Idade do concreto para os ensaios mecânicos:** Foram adotadas as idades de 28 e 91 dias para acompanhamento da evolução do desempenho dos concretos;
- **Resistência característica do concreto:** fixada em 30 MPa aos 28 dias.

Na Tabela 7 tem-se a representação dos grupos com diferentes tipos de teores utilizados para a substituição de agregado natural por agregado reciclado e cimento por sílica ativa.

Tabela 7 - Representação das misturas, expansão das representações e os grupos de concreto produzidos.

Representação	Expansão da representação
Grupo 1	
AG0SA0	Concreto com agregado natural
AG0SA5	Concreto com agregado natural e 5% de sílica ativa
AG0SA10	Concreto com agregado natural e 10% de sílica ativa
Grupo 2	
AG25SA0	Concreto contendo 25% de agregado reciclado
AG25SA1	Concreto contendo 25% de agregado reciclado e 5% de sílica ativa
AG25SA2	Concreto contendo 25% de agregado reciclado e 10% de sílica ativa
Grupo 3	
AG50SA0	Concreto contendo 50% de agregado reciclado
AG50SA5	Concreto contendo 50% de agregado reciclado e 5% de sílica ativa
AG50SA10	Concreto contendo 50% de agregado reciclado e 5% de sílica ativa

Determinou-se que as seguintes variáveis de respostas para os ensaios dos concretos produzidos:

- **Resistência à compressão axial** segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007);
- **Resistência à tração por compressão diametral** segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011);
- **Módulo de elasticidade** segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008).

Para cada betonada foram produzidos 12 corpos de prova com dimensões de 10 cm x 20 cm distribuídos da seguinte forma: 6 para ensaios de resistência à compressão axial, 3 para ensaios de módulo de elasticidade e 3 para ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Foi realizado um total de 18 betonadas até o fim do experimento, sendo que no final foi obtido um número total de 216 corpos de prova cilíndricos.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1 Cimento

O cimento escolhido para esta pesquisa foi o cimento do tipo CP V ARI. A opção deu-se por este tipo de cimento não apresentar qualquer tipo de adição além do calcário moído, o que facilita a compreensão da influência da sílica ativa nos concretos. A caracterização do cimento foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, segundo as normas NM 65 (ABNT, 2003), NM 23 (ABNT, 2001), NBR 7215 (ABNT, 1997), NBR 16372 (ABNT,

2005) e NBR 11579 (ABNT, 2013). Na Tabela 8 estão dispostos os resultados das características físicas e mecânicas do cimento.

Tabela 8 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI

Característica Avaliada	Resultado	NBR 5737 (ABNT, 1992)	Norma do Ensaio
Massa específica (cm <sup>3</sup> )	3,08	-	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4978	≥ 3000	NBR 16372 (ABNT, 2015)
Resíduo peneira 200 mm (%)	1,409	≤ 6,0	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Tempo de Pega (minutos) Início	186	≥ 60	NBR NM 65 (ABNT, 2003)
Tempo de Pega (minutos) Fim	305	≥ 600	NBR NM 65 (ABNT, 2003)
Resistência à Compressão (3 dias) MPa	27,41	≥ 24,00	NBR 7215 (ABNT, 1997)
Resistência à Compressão (7 dias) MPa	41	≥ 24,00	NBR 7215 (ABNT, 1997)
Resistência à Compressão (28 dias) MPa	49,85	Não aplicável	NBR 7215 (ABNT, 1997)

### 3.2.2 Agregado Miúdo

Como o agregado miúdo foi utilizado uma areia quartzosa, proveniente do município de Ourém (PA), para o mesmo foram feitos os ensaios de caracterização regidos pelas seguintes normas, composição granulométrica NBR 248 (ABNT, 2003), massa unitária NBR 45 (ABNT, 2003) e massa específica NM 52 (ABNT, 2009). O resultado da caracterização física da amostra está disposto na Tabela 9 e a curva granulométrica obtida está na Figura 9.

Tabela 9 - Características físicas do agregado miúdo.

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR 7211 (ABNT, 2009)			
	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
			Zona Util.	Zona ótima	Zona Util.	Zona ótima
4,75	0	0	0	0	5	10
2,58	0	0	0	10	20	25
1,18	1	1	5	20	30	50
0,6	7	8	15	35	55	70
0,3	49	57	50	65	85	95
0,15	38	95	85	90	95	100
Fundo	5	100	100	100	100	100
Módulo de Finura		1,61	1,55 - 2,2	2,2	2,9 - 3,5	2,9
Dimensão máxima (mm)		1,18				
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,63				
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,56				

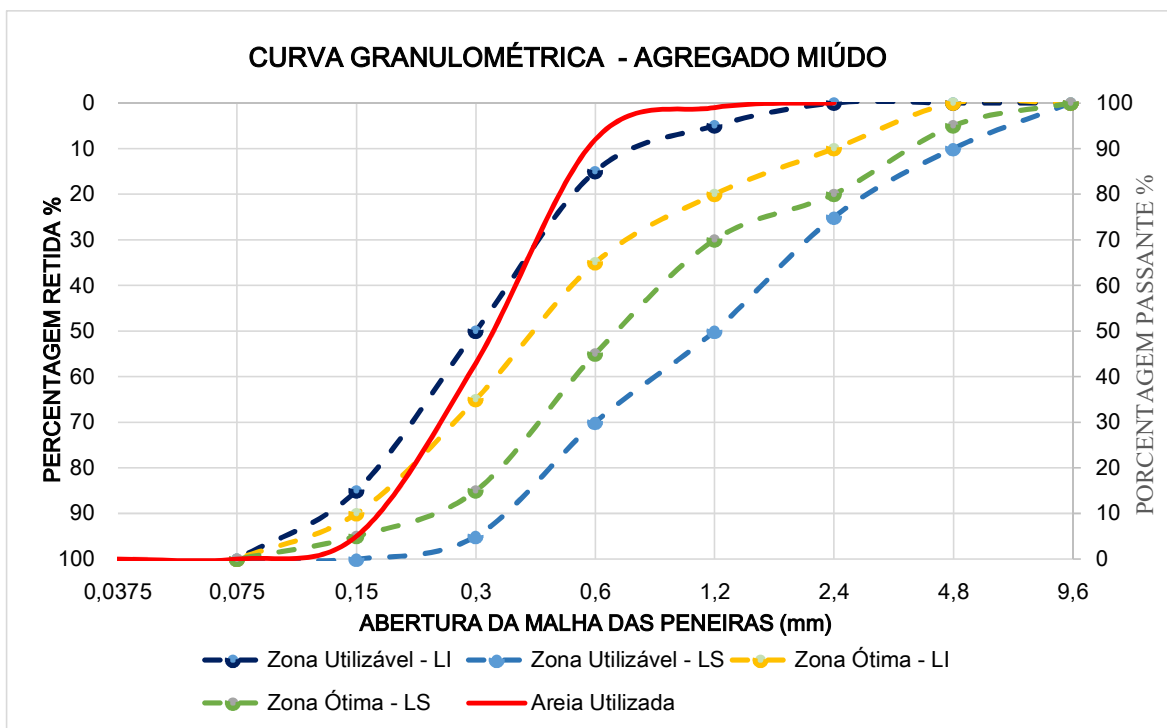


Figura 9 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural.

Pelos resultados obtidos observa-se que o agregado miúdo se enquadrou na zona utilizável do limite inferior.

### 3.2.3 Agregado Graúdo Natural

O agregado graúdo natural utilizado foi uma brita granítica proveniente do município de Tracuateua (PA), para os mesmos foram realizados os ensaios de composição granulométrica NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária NM 45 (ABNT, 2003) e massa específica NM 53 (ABNT, 2009). O resultado da caracterização física da amostra está disposto na Tabela 10 e a curva granulométrica obtida está na Figura 10.



Tabela 10 - Características físicas do agregado graúdo.

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR 7211 (ABNT, 2009)			
	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)			
			Zona Granulométrica d/D <sup>a</sup>			
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50
25	0	0	-	0 - 5	5 - 25 <sup>b</sup>	87 - 100
19	8	8	-	80 <sup>b</sup> -100	65 <sup>b</sup> - 95	95 - 100
9,5	68	76	2 - 15 <sup>b</sup>	95 - 100	95 - 100	-
4,75	21	97	80 <sup>b</sup> - 100	-	-	-
2,36	1	98	95 - 100	-	-	-
1,18	1	99	-	-	-	-
0,6	1	100	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-
Módulo de Finura	6,78		<sup>a</sup> - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo			
Dimensão máxima (mm)	25					
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65		<sup>b</sup> - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5% em apenas um dos limites marcados com 2			
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,3					

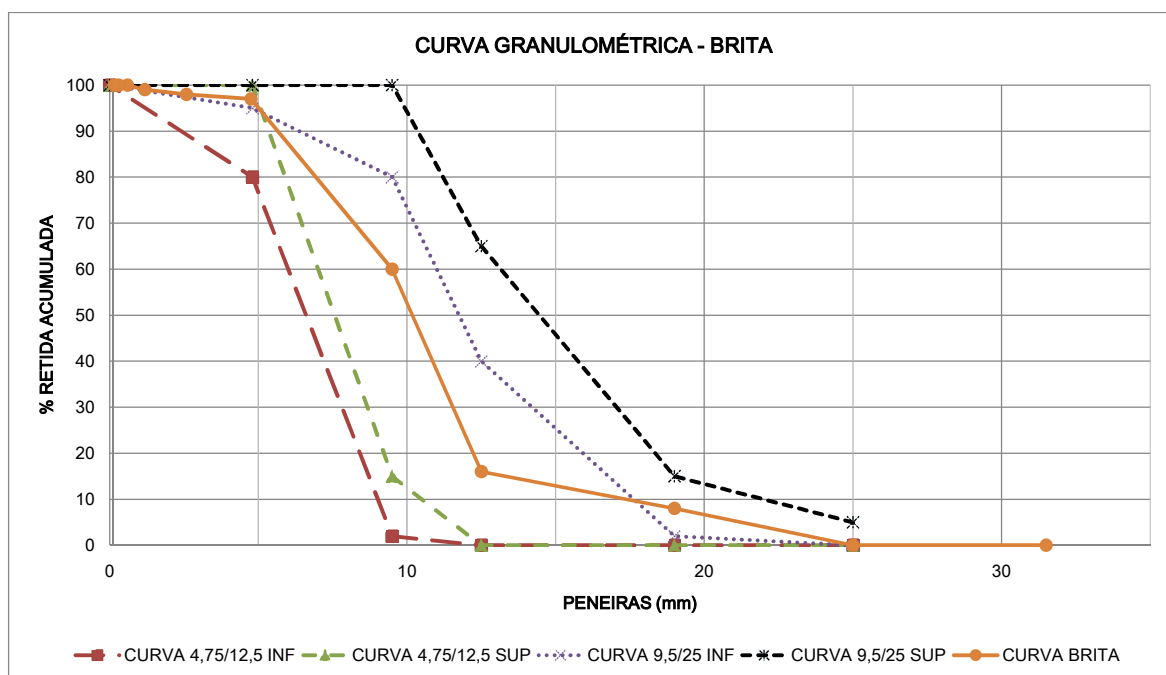


Figura 10 - Curva Granulométrica do agregado graúdo natural.

### 3.2.4 Agregado Graúdo Reciclado de Concreto

Para produção do agregado graúdo reciclado de concreto utilizou-se corpos de prova de concreto de forma aleatória, provenientes de descarte do Laboratório de Engenharia Civil, que foi cominuído em britador de mandíbulas. A faixa granulométrica do material foi

limitada em passante na peneira de # 25 mm e retido na peneira # 4,8 mm. Para separação e conferência do tamanho dos grãos utilizou-se um peneirador mecânico. Os agregados que não alcançavam as dimensões estipuladas voltavam para o processo de britagem, conforme mostra a Figura 11. Ao final desse processo foi obtido os agregados graúdos utilizados na confecção dos concretos.

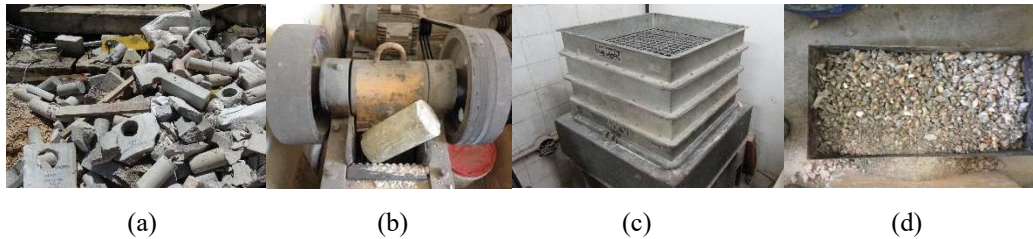


Figura 11 - Processo de produção do agregado graúdo reciclado de concreto (a) corpos de prova de concreto; (b) britador de mandíbulas; (c) peneirador mecânico e (d) agregado graúdo reciclado de concreto.

Para caracterização do agregado reciclado foram executados os ensaios de composição granulométrica NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária NM 45 (ABNT, 2003), massa específica pelo método de Leite (2011), pois tal metodologia já foi reproduzida em pesquisas nacionais obtendo resultados confiáveis (CORDEIRO, 2013), NM 51 (ABNT, 2001) e absorção de água pelo método de Leite *et al.* (2011). O resultado da caracterização física da amostra está disposto na Tabela 11 da curva granulométrica obtida está na Figura 12.

Tabela 11 - Características físicas do agregado graúdo reciclado.

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR 7211 (ABNT, 2009)			
	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)			
			Zona Granulométrica d/D <sup>a</sup>			
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50
25	1	1	-	0 - 5	5 - 25 <sup>b</sup>	87 - 100
19	18	8	-	80 <sup>b</sup> -100	65 <sup>b</sup> - 95	95 - 100
9,5	39	76	2 - 15 <sup>b</sup>	95 - 100	95 - 100	-
4,75	40	97	80 <sup>b</sup> - 100	-	-	-
2,36	1	98	95 - 100	-	-	-
1,18	1	100	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-
Módulo de Finura		6,78	<sup>a</sup> - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo			
Dimensão máxima (mm)		25				
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,65	<sup>b</sup> - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5% em apenas um dos limites marcados com 2			
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,16				
Abrasão Los Angeles (%)		35,44				
Absorção de água (%)		6,8				

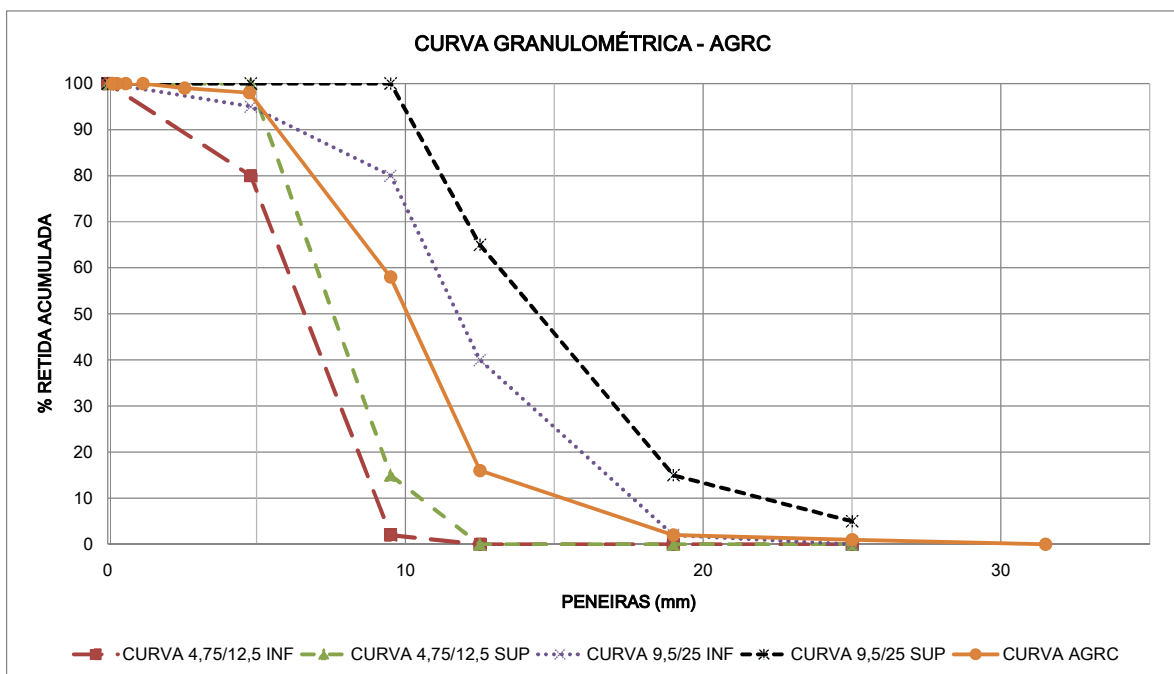


Figura 12 - Curva granulométrica do AGRC.

A massa específica do agregado reciclado é menor que a massa específica da brita, característica esta condizente com a encontrada na literatura, pois a argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto tem uma densidade significativamente menor que a de agregados naturais. É importante ressaltar que o método de britagem influencia na massa específica (entre outras características dos agregados), pois durante o processo de britagem a argamassa desprende do agregado. Com os resultados de massa específica e massa unitária podemos verificar que de uma forma geral o agregado reciclado é mais leve que o agregado natural, comportamento este que ocorre por conta da sua alta porosidade. O agregado reciclado se enquadra nos requisitos impostos pela NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

### 3.2.5 Sílica Ativa

Por se tratar de uma pozolana altamente reativa e possuir boa disponibilidade comercial na região de Belém, a sílica ativa foi escolhida para atuar como a adição mineral em substituição parcial do cimento nos concretos produzidos. A sílica ativa é proveniente da empresa Dow Corning Silício do Brasil, situada em Breu Branco (PA).

A caracterização foi feita no laboratório de Geologia da Universidade Federal do Pará e são regidas pelas respectivas normas: finura NBR 16372 (ABNT, 2015), massa específica NM 23 (ABNT, 2001), na Tabela 12 temos o resultado das características. De acordo com o fabricante a sílica encontra-se de acordo com as normas NBR 13956 (ABNT, 2012) e a NBR 13957 (ABNT, 2012).

Tabela 12 - Características da Sílica Ativa.

<b>Características Avaliadas</b>	<b>Valores</b>
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	1531,65
Umidade	0,95
% resíduo na peneira 45µm	2,98
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,20

A caracterização cristalográfica da sílica ativa foi realizada pelo método de Difração de raios – X para analisar a composição química e grau de cristanilidade. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

As condições instrumentais foram as seguintes: varredura de 5 a 69,98° em 2  $\Theta$ , voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA, tamanho do passo de 0,02° em 2 $\Theta$ , tempo/passos 82 s, fenda

divergente de  $\frac{1}{4}$ ", máscara de 10 mm e movimentação circular da amostra com frequência de 1 rotação/s. A aquisição de dados foi feita através do software X'Pert Data Collector, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore. O difratograma de raios-x da sílica ativa é apresentado na Figura 13.

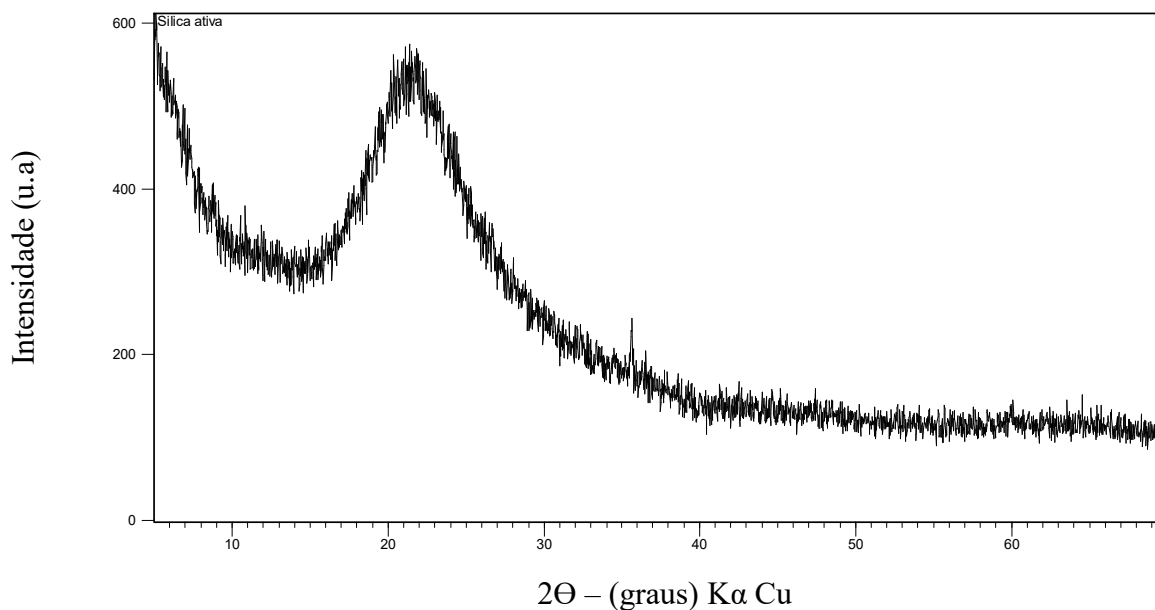


Figura 13 - Difratograma de raios-X da sílica ativa.

### 3.2.6 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento local de Belém (PA), no qual o órgão responsável pela sua potabilidade é a ETA (Estação de Tratamento de Água) da Universidade Federal do Pará.

### 3.2.7 Aditivo

O aditivo químico utilizado foi do tipo superplastificante de pega normal à base de sais sulfonados e carboidratos, densidade de  $1,19 \pm 0,02$  kg/litro e com dosagem recomendada pelo fabricante variando de 0,70% a 1,20% sobre o peso do aglomerante.

## 3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

A produção de concreto partiu de um trabalho de dosagem experimental de concretos com agregado graúdo reciclado de concreto (LOPES *et al* 2015). Foi elaborado para cada tipo de concreto (com diferentes proporções de substituição do agregado graúdo) uma curva de dosagem.

O método de dosagem adotado para o estudo foi IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), que consiste em ajustar o teor ideal de argamassa estabelecendo, como parâmetro de controle. O valor de abatimento do tronco de cone, que no caso desta pesquisa fixou-se em  $100 \pm 20$  mm. Os agregados graúdos reciclados foram usados em substituição parcial de 0%, 25% e 50% ao agregado graúdo natural, em volume.

Antes da incorporação do resíduo, foi realizado a saturação do resíduo, deixando-o imerso por 24 horas e posteriormente utilizou-se o agregado graúdo reciclado após a perda natural de água com uma taxa de compensação de 80% da massa determinada na absorção. A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme a prescrição da NBR 5738 (ABNT, 2003).

Na idade de 28 dias os corpos de prova foram ensaiados para determinação da resistência à compressão. Para este ensaio foi empregada uma prensa informatizada do modelo EMIC, com capacidade de carga de 200 toneladas e taxa de carregamento controlada. De posse dos resultados da Tabela 13, traçou-se a curva de dosagem, conforme Figura 14.

Tabela 13 - Proporcionamento dos concretos em função da porcentagem de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado.

AG0SA0		Traço Unitário			Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	
$\alpha$	a/c	m	a	p	Cc	Ca
0,52	0,44	3,5	1,34	2,16	477,19	212,49
0,52	0,6	5	2,12	2,88	355,54	211,95
0,52	0,78	6,5	2,9	3,6	280,62	218,54
AG25SA0		Traço Unitário			Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	
$\alpha$	a/c	m	a	p	Cc	Ca
0,49	0,52	3,5	1,2	2,3	458,91	239,1
0,49	0,6	5	1,94	3,06	352,85	213,2
0,49	0,75	6,5	2,67	3,82	281,69	212
AG500SA0		Traço Unitário			Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	
$\alpha$	a/c	m	a	p	Cc	Ca
0,51	0,52	3,52	1,3	2,22	457,53	237,1
0,51	0,6	5	2,06	2,94	651,45	211,82
0,51	0,76	6,5	2,82	3,67	279,85	212,6

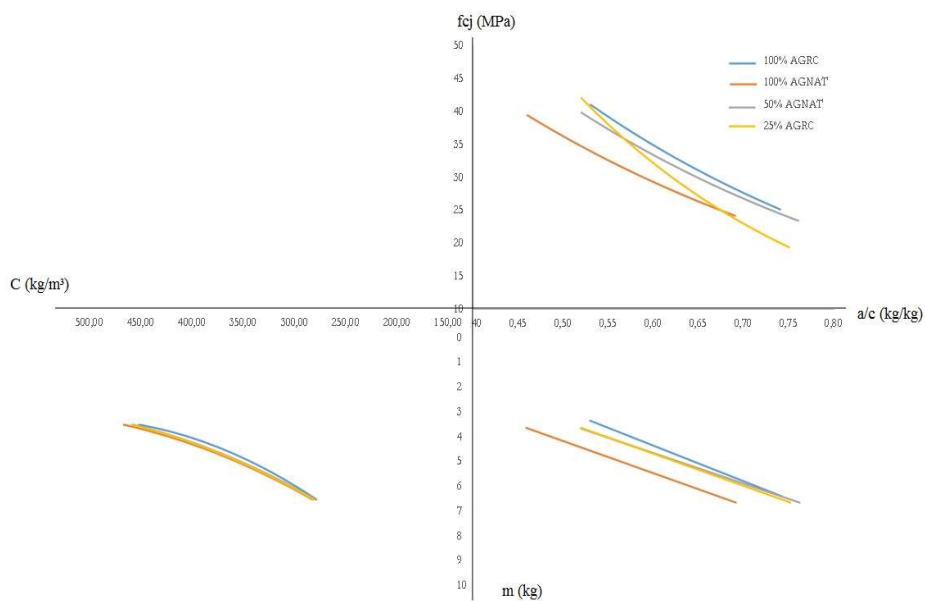


Figura 14 - Curva de Dosagem do AG0SA0, AG25SA0 e AG50SA0. Fonte: adaptado, Lopes *et al*, 2015.

Para confecção de todos os concretos adotou-se os traços da Tabela 14 baseado no estudo de dosagem, onde os concretos deverão apresentar uma resistência à compressão na idade de 28 dias de um fck de 30 MPa. A quantidade total de brita utilizada no traço será substituída em 0%, 25% e 50% por agregado graúdo reciclado de concreto (divididos em três grupos distintos), para uma mesma relação a/c de 0,59, e a/agl 0,63 e 0,63 respectivamente, com teores de substituição do cimento por sílica ativa em 0%, 5% e 10% cada grupo.

Tabela 14 - Caracterização do agregado graúdo, bem como o consumo estimado para moldagem de 12 corpos de prova cilíndrico de (Ø10x20) cm

<b>AG0SA0</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	2,27	3,02	7,5	17,03	22,65	0	0	2,65	2,49
<b>AG0SA05</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	2,27	3,02	7,125	17,03	22,65	0	0,375	2,65	2,49
<b>AG0SA10</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	2,27	3,02	6,75	17,03	22,65	0	0,75	2,65	2,49
<b>AG25SA0</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	1,94	3,06	7,5	14,55	17,21	5,39	0	2,65	2,49
<b>AG25SA5</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	1,94	3,06	7,125	14,55	17,21	5,39	0,375	2,65	2,49
<b>AG25SA10</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	1,94	3,06	6,75	14,55	17,21	5,39	0,75	2,65	2,49
<b>AG50SA0</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	2,52	3,38	7,5	18,9	12,68	11,91	0	2,65	2,49
<b>AG50SA5</b>									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	2,52	3,38	7,125	18,9	12,68	11,91	0,375	2,65	2,49



AG50SA10									
Traço			Consumo (kg)					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Agregado RCC	Sílica	Brita	Agregado RCC
1	2,52	3,38	6,75	18,9	12,68	11,91	0,75	2,65	2,49

Para substituição da brita pelo agregado graúdo reciclado de concreto, utilizou-se a Equação 1.

$$m = mt \frac{\gamma_{arc}}{\gamma_{nat}} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

$m$  é a massa de agregado reciclado de concreto correspondente a sua equivalente de brita;

$mt$  é a massa total de brita que será substituída por AGRC;

$\gamma_{arc}$  é a massa específica do AGRC;

$\gamma_{nat}$  é a massa específica da brita.

Para a mistura dos concretos além dos materiais estabelecidos anteriormente, fixou-se o tempo de mistura em 8 minutos, foi o tempo necessário para os concretos alcançarem a consistência de 100±20mm. Para manter a mesma relação a/agl foi utilizado aditivo superplastificante, quanto maior o teor de adição de sílica, maior a quantidade de aditivo superplastificante necessária para alcançar a mesma consistência como mostra a Figura 15, o aumento de aditivo se deve principalmente à alta superfície específica da sílica ativa.

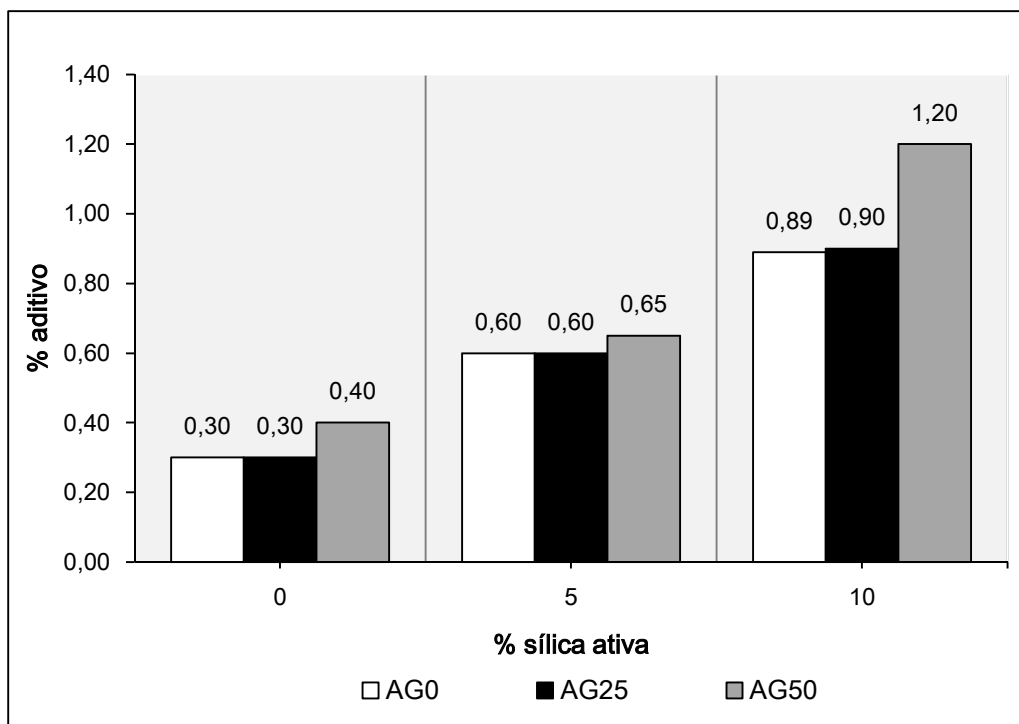


Figura 15 - Quantidade de aditivo (%) em relação a massa de cimento adicionado na mistura com 0% de substituição de agregado graúdo – AG0.

A ordem da mistura foi fixada de forma que primeiramente misturou-se o material cimentício (cimento, sílica e 50% da água), posteriormente o agregado miúdo, agregado graúdo natural e finalmente o agregado graúdo de concreto, o restante da água e por último o aditivo. O método de mistura escolhido da pesquisa de (Oynadel), 2009, que observou que as misturas em duas etapas são eficientes, e em geral levam a resultados superiores aos obtidos pelo método de mistura tradicional.

Seguindo as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015), após a mistura completa o concreto era adicionado e adensado manualmente com a haste de aço nos moldes cilíndricos medindo 10x20 cm. Após o adensamento do concreto, realizou-se o acabamento superficial dos corpos de prova, 24 horas depois foi feita a desforma dos corpos de prova e os mesmos foram submersos em tanque com água e cal para continuar sua cura até idade de ensaio. Antes dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, os corpos de prova foram retificados com o objetivo de proporcionar uma distribuição uniforme dos esforços nas suas superfícies.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido foram analisados por meio de análise estatística. A análise foi feita para que em cada ensaio, fosse obtido uma resposta para os objetivos do trabalho, comprovando estatisticamente se existe influência ou não nas variáveis investigadas, assim como possíveis interações entre as variáveis. Os dados foram analisados utilizando o teste de Shapiro Wilk. Juntamente, aos dados foram analisados quanto a sua homogeneidade utilizando-se o teste de Levene, confirmando a homogeneidade das variâncias dos mesmos, esses foram comparados utilizando o teste T de Student para amostras independentes quando havia duas condições experimentais, para condições experimentais maiores que duas os dados foram analisados a partir da análise de variância de uma via (ANOVA – one way). Se os dados apresentassem desigualdade nas médias, para identificação dos grupos responsáveis pela desigualdade, estes eram analisados utilizando-se a análise de variância de Tukey, foram consideradas diferenças estatísticas quando  $p < 0,05$ , os resultados das análises estatística estão apresentados nos Apêndice A e Apêndice B.

### 4.1 Avaliação dos concretos com agregados naturais (AG0SA0, AG0SA5 e AG0SA10)

#### 4.1.1 Avaliação da resistência à compressão axial dos concretos

Observa-se que aos 28 dias, a resistência à compressão foi estatisticamente maior nos concretos AG0SA5 e AG0SA10 ( $P < 0,05$ ) em relação ao concreto de referência, após 5% de substituição de sílica não houve acréscimo na resistência dos concretos para a condição de análise. Aos 91 dias houve um aumento significativo de resistência para os concretos AG0SA5 e AG0SA10 em relação ao concreto AG0SA0, não havendo acréscimo de resistência após substituição de 5% de sílica. A resistência à compressão foi estatisticamente diferente entre as idades do concreto de referência e o concreto AG0SA5, onde houve um aumento significativo de resistência (Figura 16).

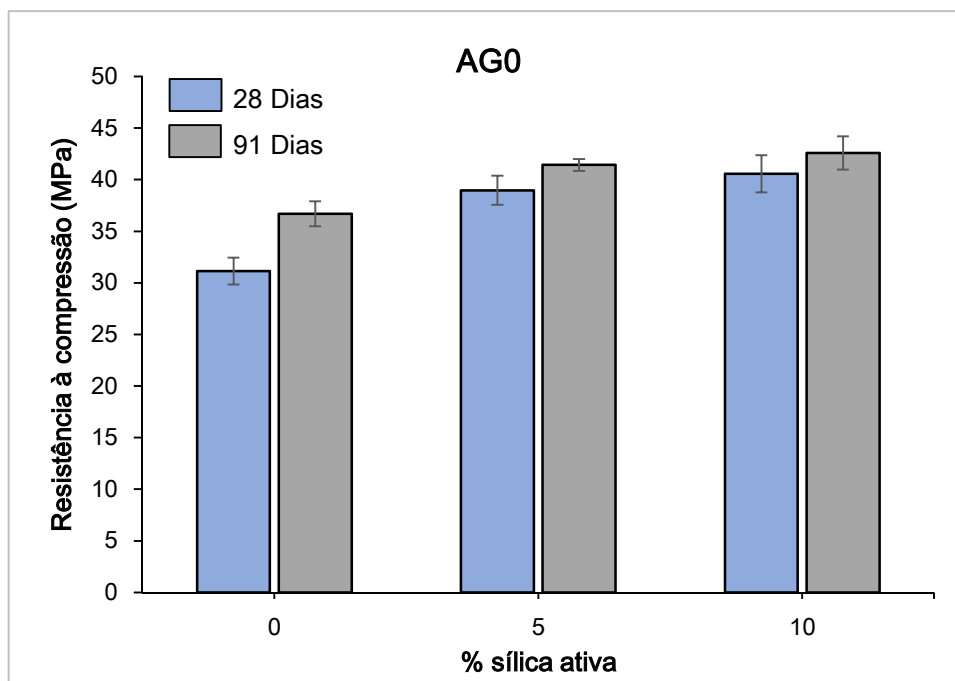


Figura 16 - Resistência à compressão axial do concreto tipo AG0 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

O aumento de resistência nos concretos contendo sílica ativa pode ser explicado em função da sílica ativa afetar o arranjo físico do sistema, promovendo a homogeneidade da microestrutura da pasta e principalmente, da zona de transição.

Segundo Marlova, 2003 a adição de sílica ativa no concreto causa uma notável melhora das propriedades mecânicas do material. O aumento da resistência à compressão de concretos com sílica ativa, quando comparados ao concreto sem nenhuma adição, é significativo.

Nos concretos com sílica ativa têm-se o efeito filer, de nucleação e de densificação da zona de transição, decorrentes da elevada finura deste material, diminuindo a porosidade das pastas, argamassas e concretos, com diferentes teores de sílica (SOUZA, 2007).

Dal Molin (2011) obteve aumentos de 7 a 16% na resistência à compressão de concretos com adição de 10% de sílica ativa, comparados aos concretos de referência.

#### 4.1.2 Avaliação da resistência à compressão diametral

A Figura 17 apresenta uma análise comparativa entre os concretos produzidos somente com agregado natural, com substituição de 0%, 5% e 10% de sílica ativa em relação ao cimento.

Observa-se que aos 28 dias, a resistência à tração foi estatisticamente maior no concreto AG0SA10 em relação aos outros concretos ( $p < 0,05$ ). O comportamento aos 91 dias indica que houve aumento da resistência nos concretos AG0SA5 e AG0SA10 em relação ao concreto de referência AG0SA0. Quando os concretos foram analisados entre idades não houve diferença estatística.

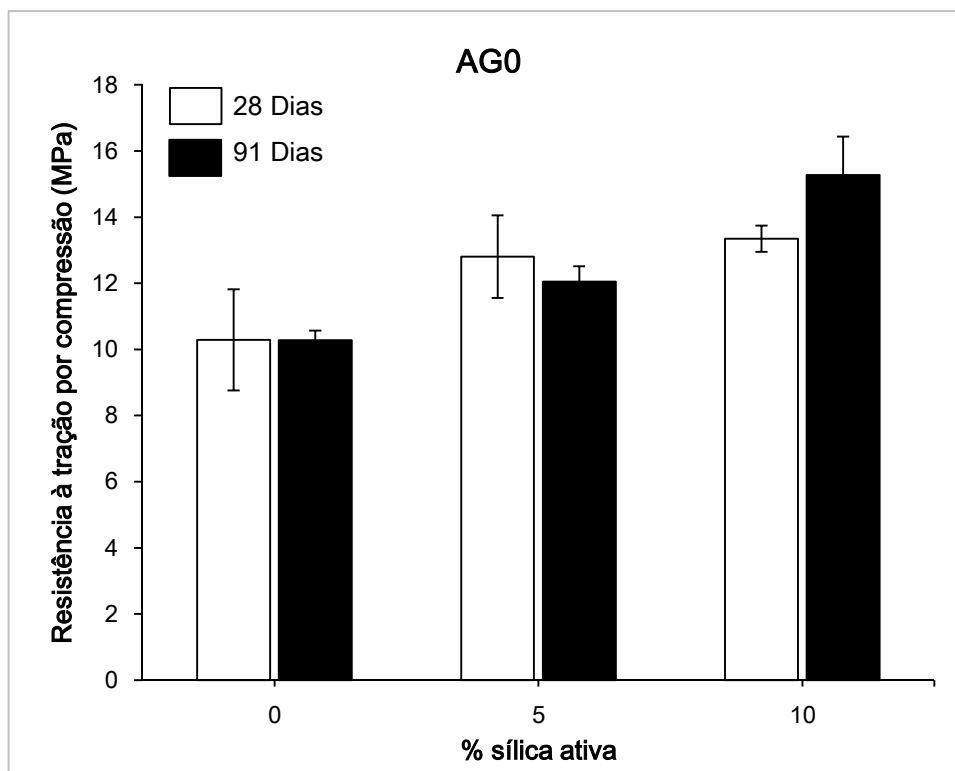


Figura 17 - Resistência à tração por compressão diametral para concretos do tipo AG0, para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

Segundo Larrad (1992) apud ROMANO *et al* (2008) em composições cimentícias a sílica ativa tem sido utilizada para aumentar a resistência mecânica e compacidade devido, principalmente, à ocorrência de reações pozolânicas e ao efeito físico filler. A primeira ocorre devido à interação com o hidróxido de cálcio do cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), material mais resistente e estável, que favorece a durabilidade dos compósitos.

Segundo Dal Molin (2003) as adições minerais causam redução na porosidade e permeabilidade da matriz e da zona de transição. Esse fato leva à melhora geral na resistência à compressão e resistência à tração do concreto. Porém o aumento significativo na resistência à tração se dará somente quando ocorrem as reações pozolânicas das adições

minerais, com consequente redução do tamanho e concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.

#### 4.1.3 Avaliação do módulo de elasticidade

A Figura 18 apresenta uma análise comparativa entre os concretos produzidos somente com agregado gráudo natural, com substituição de 0%, 5% e 10% de sílica ativa em relação ao cimento. Observa-se que aos 28 dias, o módulo de elasticidade foi estatisticamente maior no concreto AG0SA10 em relação ao concreto de referência ( $p < 0,05$ ). Esse comportamento não se repetiu na idade de 91 dias aonde não houve diferença estatística. Quando os concretos foram analisados entre idades, o módulo de elasticidade foi estatisticamente diferente nos concretos AG0SA0 e AG0SA10, onde houve um incremento do valor de módulo.

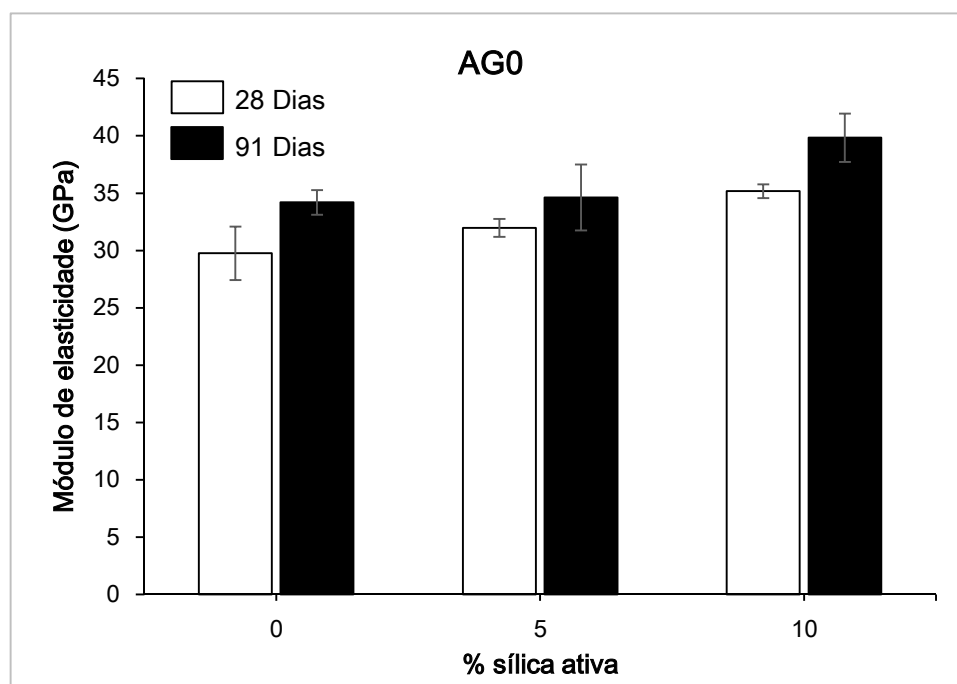


Figura 18 - Módulo de elasticidade dos concretos AG0 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento pela sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

Sandemir (2013) substituiu diferentes teores de cimento por sílica ativa, analisando a resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos de alta resistência com relação a/agl fixada em 0,25. Os resultados indicam um ganho de 21,7%, 28,56%, 38,79%, 31,46% e 13% para 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, o maior ganho foi conseguido com a mistura de 15%, fato este relacionado à melhoria das propriedades físicas e químicas por meio da adição de sílica ativa, pois suas partículas ultrafinas preenchem os vazios do cimento, o que

torna a microestrutura mais densa e a também a reação química da AS com os hidratos do cimento, respectivamente. O módulo dinâmico esteve ligeiramente maior nos concretos com SA que o de referência, resultado este similar aos trabalhos de MAZLOOM *et al* (2004), SHANNAG (2000), KÖKSAL *et al* (2008) e ALMUSALLAM (2004).

A Figura 19, obtida a partir de dados apresentado por diversos pesquisadores (Alves, 1993; Isaia, 1995; Dal Molin, 1995; Sillevold, 1987), apresenta a relação existente entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão axial. Observa-se que o módulo de elasticidade varia com a resistência à compressão, independente do teor de sílica ativa incorporado.

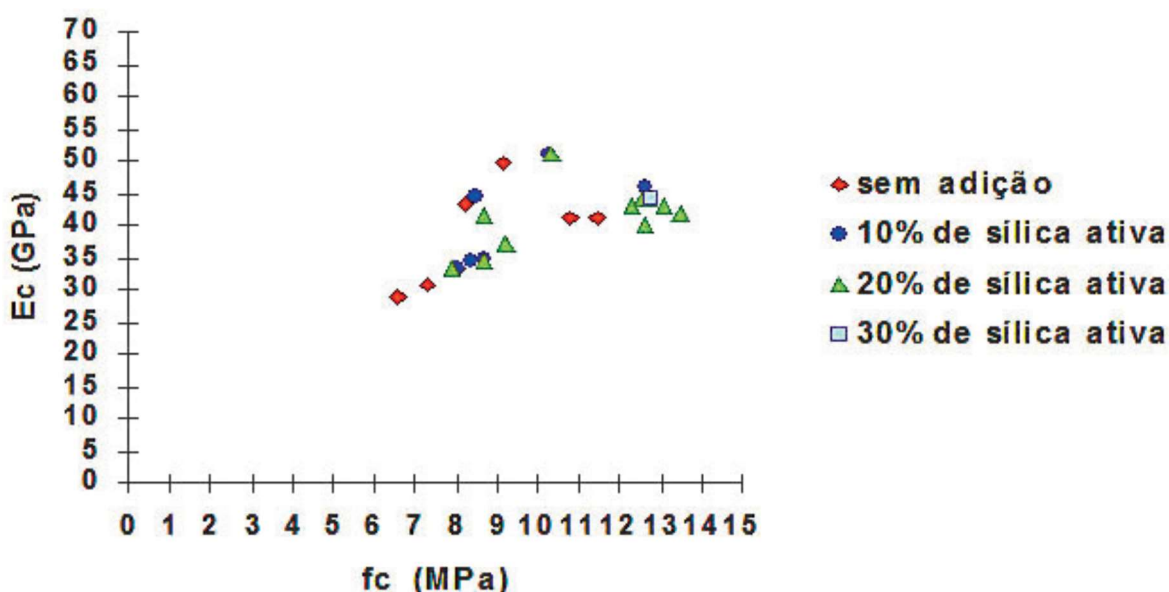


Figura 19 - Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão. Alves, 1993; Isaia, 1995; Dal Molin, 1995; Sillevold, 1987.

Segundo Dal Molin (2011) uma das razões para esse comportamento é o maior volume de pasta das adições minerais, quando há substituição direta em massa de cimento. Nota-se, entretanto, que o aumento percentual da resistência à compressão se dá numa taxa, em média, três vezes superior ao aumento percentual do módulo de elasticidade correspondente.

#### 4.2 Avaliação dos concretos com 25% de substituição de agregados naturais por agregado reciclado (AG25SA0, AG25SA5 e AG025SA10).

##### 4.2.1 Avaliação da resistência à compressão axial

Aos 28 dias, a resistência à compressão foi estatisticamente maior apenas no concreto AG25SA10 ( $P < 0,05$ ) em comparação ao concreto de referência AG25SA0 e o concreto

AG25SA5. Aos 91 dias houve um aumento significativo de resistência para os concretos AG25SA5 e AG25SA10 em relação ao concreto AG25SA0, não havendo acréscimo de resistência após substituição de 5% de sílica. A resistência à compressão foi estatisticamente diferente entre as idades somente no concreto AG25SA5, onde houve um aumento significativo de resistência (Figura 20).

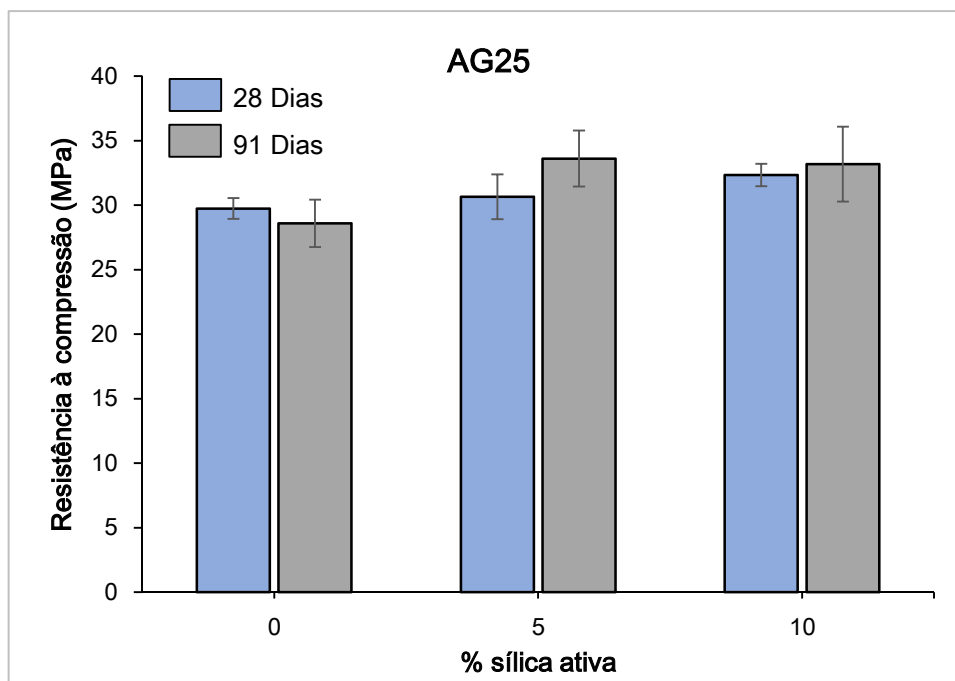


Figura 20 - Resistência à compressão axial do concreto tipo AG25 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

#### 4.2.2 Avaliação da resistência à tração por compressão diametral

Aos 28 dias a resistência à tração dos concretos produzidos com 25% de AGRC foi observado que não houve incremento de resistência à tração nos concretos produzidos em relação ao concreto de referência, não havendo assim diferença significativa ( $p < 0,05$ ). Aos 91 dias o mesmo comportamento se repetiu. Quando foi comparado entre idades os concretos AG25SA5 e AG25SA10 não obtiveram aumento significativo de resistência, enquanto houve um aumento significativo de resistência no concreto AG25SA0 (Figura 21).



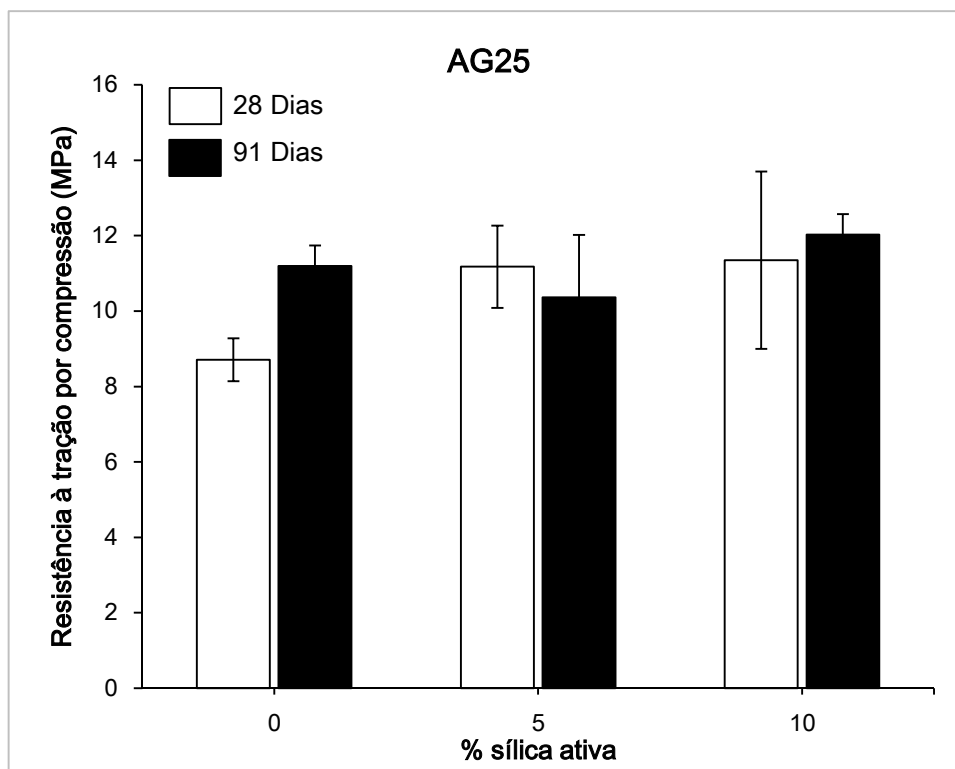


Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral para concretos do tipo AG25, para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

#### 4.2.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade

A Figura 22 apresenta uma análise comparativa entre os concretos produzidos com 25% de AGRC com diferentes teores de sílica ativa 0%, 5% e 10% em relação ao cimento. Observa-se que aos 28 dias, os concretos AG25SA5 e AG25SA10 foram diferentes estatisticamente em relação ao concreto de referência ( $p < 0,05$ ), aonde houve incremento nesta propriedade. Esse comportamento não se repetiu na idade de 91 dias, aonde não houve diferença estatística. Não houve diferença entre os grupos de concretos quando foram comparados entre idades.

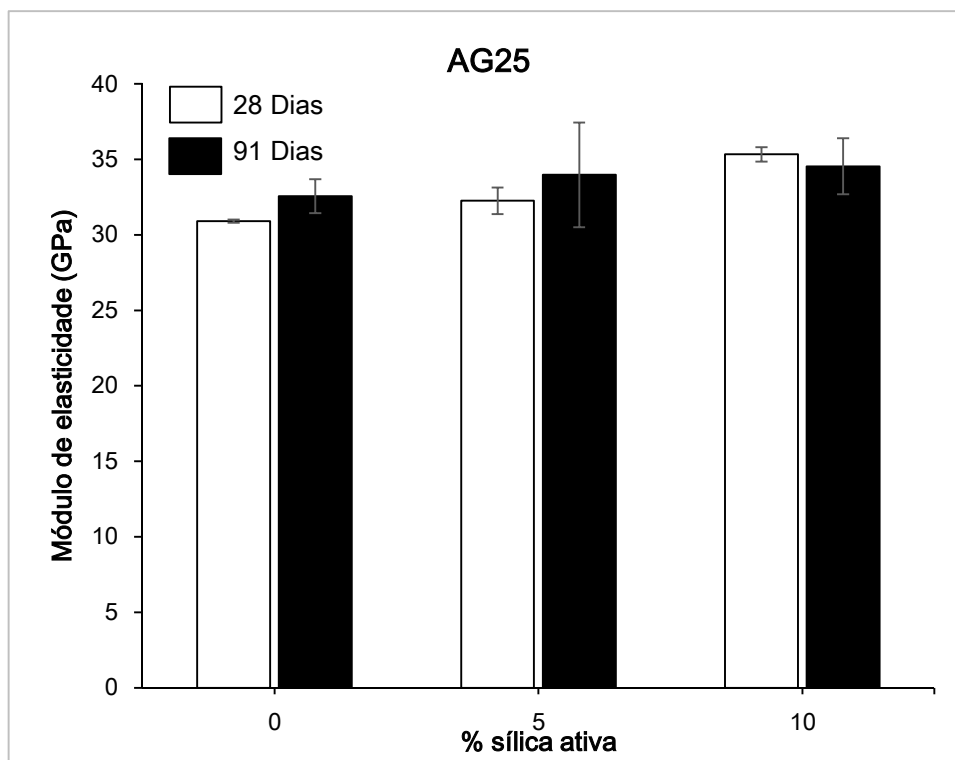


Figura 22 - Módulo de elasticidade dos concretos AG25 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento pela sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

### 4.3 Avaliação dos concretos com 50% de substituição de agregados naturais por agregado reciclado (AG50SA0, AG50SA5 e AG050SA10).

#### 4.3.1 Avaliação da resistência à compressão axial

Observa-se que aos 28 dias, a resistência à compressão foi estatisticamente maior nos concretos AG50SA5 e AG50SA10 ( $P < 0,05$ ) em relação ao concreto de referência, após 5% de substituição de sílica não houve acréscimo na resistência dos concretos para a condição de análise. Não houve diferença estatística na idade de 91 dias. A resistência à compressão foi estatisticamente diferente entre as idades do concreto de referência, AG50SA5 e AG50SA10, onde houve um aumento significativo de resistência (Figura 23).

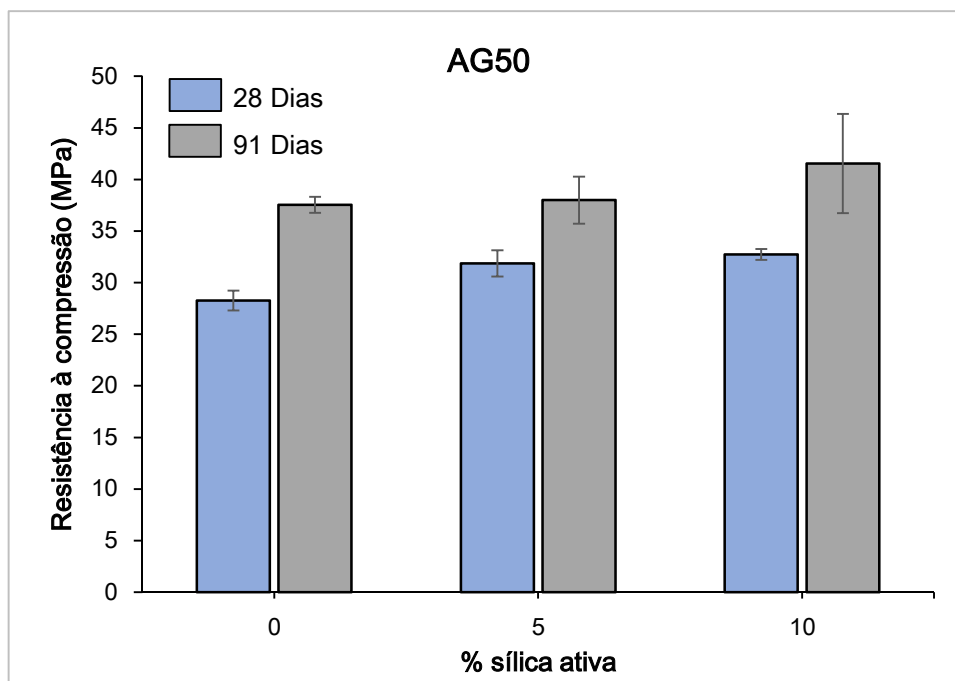


Figura 23 - Resistência à compressão axial do concreto tipo AG50 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

Os resultados demonstram que a resistência do concreto aumenta com a adição de sílica ativa, sabe-se que a sílica ativa por meio do seu efeito pozolânico melhora particularmente a resistência à compressão axial dos concretos.

Devido aos agregados graúdos reciclados de concreto serem mais porosos, uma parte do cimento e a sílica ativa seriam capazes de penetrar no agregado, que posteriormente iria aumentar a resistência de ligação entre os agregados e a matriz de cimento hidratado. Por consequência, o concreto feito com AGRC e cimento com substituição parcial de sílica ativa melhora a qualidade da zona de transição (ÇAKIR, 2015).

Os resultados apresentam um efeito positivo da sílica ativa sobre a resistência à compressão, em concretos produzidos com faixa de 25-40% de AGRC, tais como os estudos reportados de (CORINADELSI, 2010).

Fonteboa e Abella (2009), diz que os concretos produzidos com 50% de agregados reciclados quando previamente molhados (saturados) antes da concretagem, diminuem os efeitos negativos sobre a resistência do concreto, a resistência é melhorada. A resistência do concreto de referência de 30 MPa foi alcançada aos 91 dias. Em relação ao aumento

significativo dos concretos na idade de 91 dias, o mesmo deve-se a presença da sílica ativa, pois pozolanas contribuem para o aumento de resistência em idades avançadas.

Adicionando sílica ativa diminui a porosidade dos agregados reciclados de concreto, isto pode ser atribuído às partículas ultrafinas da sílica, além disso a ação pozolânica muda de hidróxido de cálcio para silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que aumenta a matriz (MOHAMED, 2012).

Estudos de Mukharjee e Barai 2014, apresentam uma análise comparativa de quatro tipos de concretos em vários dias de cura, a incorporação de sílica aumentou em 15% a resistência à compressão do concreto AGN em 7 dias, no concreto RCC houve uma redução de 12% da resistência (causado pela qualidade do tipo de AGRC e maior absorção de água), após a adição de sílica a resistência foi equivalente ao concreto AGN, este melhoramento na resistência é devido à redução da porosidade (Figura 24).

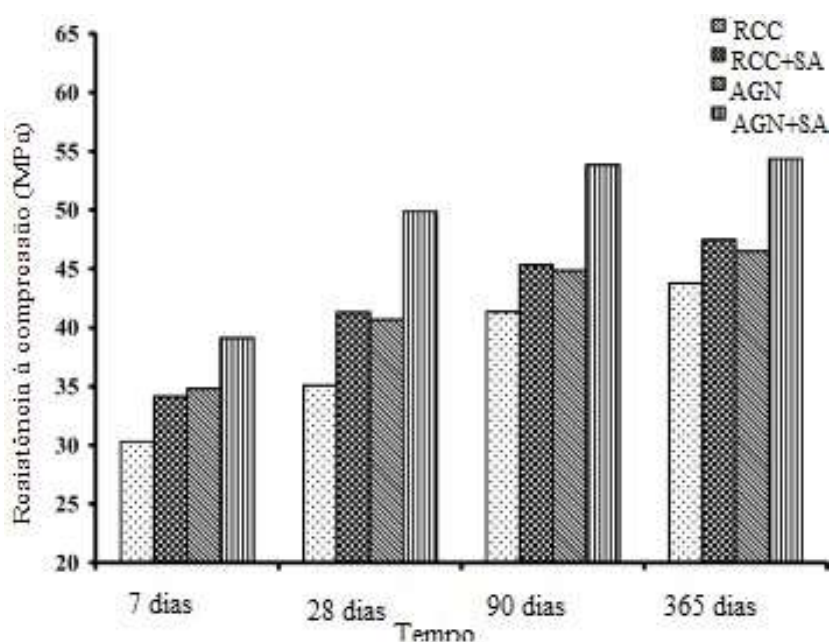


Figura 24 - Resultado das resistências à compressão de concretos preparados com agregado reciclados e sílica ativa em relação à concretos de referência (com agregados naturais). Fonte: adaptado de Mukharjee *et al*, 2014.

#### 4.3.2 Avaliação da resistência à tração por compressão diametral

Ao analisar a Figura 25 podemos verificar que aos 28 dias a resistência à tração por compressão foi significativamente maior nos concretos AG50SA5 e AG50SA10 (todos com adição de sílica ativa) em relação concreto de referência AG50SA0 ( $P < 0,05$ ). Aos 91 dias

houve um incremento significativo de resistência para o concreto AG50SA10 em relação ao concreto de referência AG50SA0. Quando analisados estatisticamente entre idades não houve diferença significativa entre os concretos produzidos.

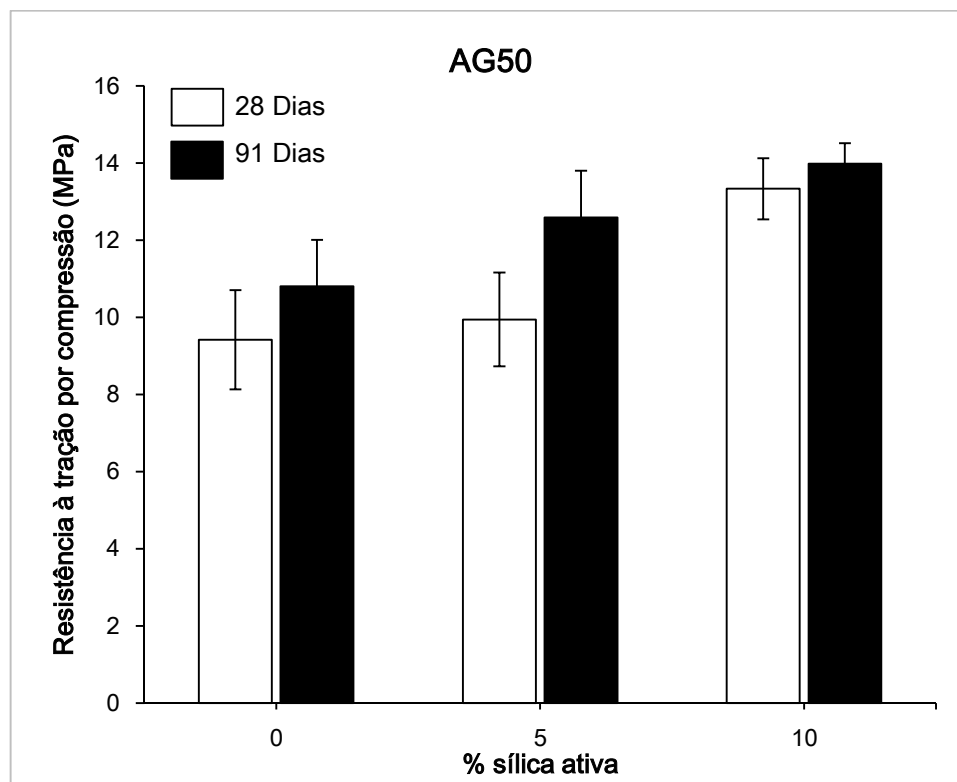


Figura 25 - Resistência à tração por compressão diametral para concretos do tipo AG50, para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento por sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

A melhoria do comportamento do concreto se deve a ação pozolânica da SA. A zona de transição interfacial (ZTI) desempenha um papel importante para a resistência à tração, pois a zona se torna densa e compacta, devido à adição de partículas finas da sílica ativa, portanto a melhoria na resistência à tração é observada.

Mohamed (2012) diz que o uso de agregado reciclado diminui a resistência à tração em relação aos concretos produzidos somente com agregado natural, o efeito benéfico da sílica à compressão e tração diminui a zona de transição entre os agregados reciclados e a argamassa de cimento. De fato, a estrutura de poros é melhorada e, em particular o volume dos poros é reduzido, trazendo benefícios em termos mecânicos.

No trabalho de Makharjee (2014), a adição de sílica ativa no concreto RCC melhora a resistência de forma que equivale ao valor de AGN (concreto de referência), esse

comportamento se deve a presença da sílica ativa na zona de transição, tornando-a mais forte e mais densa que os concretos de referência, reduzindo os espaços vazios presentes na zona de transição conforme os resultados de resistência à tração apresentado na Figura 26.

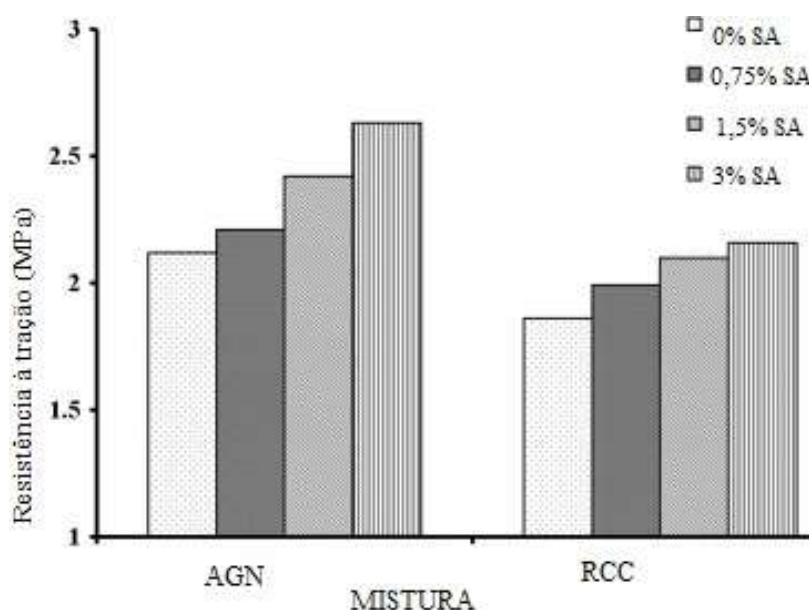


Figura 26 - Variação da resistência à tração. Fonte adaptado de Mukharjee e Barai, 2014.

#### 4.3.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade

A Figura 27 apresenta uma análise comparativa entre os concretos produzidos com 50% de AGRC com diferentes teores de sílica ativa 0%, 5% e 10% em relação ao cimento. Observa-se que aos 28 dias, os concretos houve incremento desta propriedade nos concretos AG50SA5 e AG50SA10 em relação ao concreto de referência ( $p < 0,05$ ). Observou-se o mesmo comportamento nos concretos de idade de 91 dias. Quando os concretos foram analisados entre idades, o módulo de elasticidade foi maior nos concretos AG50SA0 e AG50SA5 na idade de 91 dias.

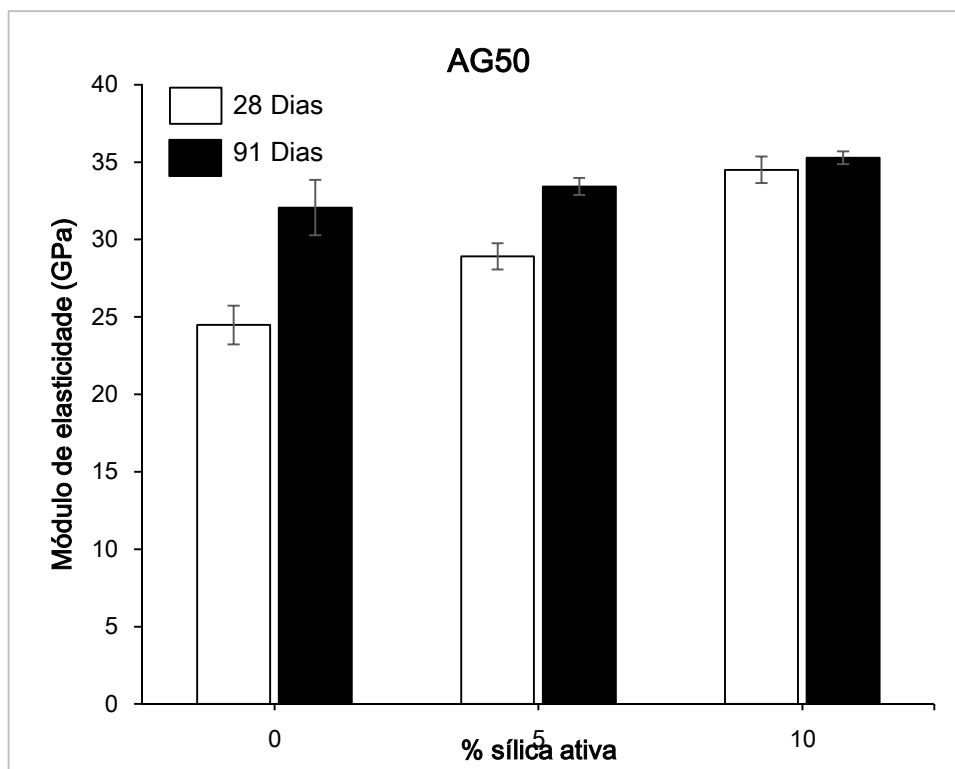


Figura 27 - Módulo de elasticidade dos concretos AG25 para idades diferentes, em função do teor de substituição do cimento pela sílica ativa. Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $p < 0,05$  (ANOVA; Tukey,  $p < 0,05$ ).

Çakir *et al.* (2014) diz que geralmente o módulo de elasticidade do concreto depende das fases de rigidez (zona de transição interfacial, pasta de cimento e agregados). É bem conhecido também que o módulo de elasticidade é influenciado pelo módulo dos seus agregados, neste contexto o uso de AGRC influencia o módulo de elasticidade do concreto produzido.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal da presente dissertação de mestrado foi avaliar a influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa em concretos com agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) e agregados naturais, nas suas propriedades mecânicas, com ênfase na resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à compressão diametral. Tais estudos permitiram ampliar o entendimento da interação da sílica e agregados (AGRC e brita), bem como possibilitaram que os objetivos do estudo pudessem ser atendidos.

A partir dos ensaios realizados e dos resultados apresentados, juntamente com a literatura, diversas conclusões foram compreendidas no que diz respeito à interação da sílica ativa nos concretos produzidos com e sem AGRC.

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir das análises realizadas, bem como enumera sugestões para pesquisas que visem expandir o entendimento sobre o assunto.

### 5.1 CONCLUSÕES DAS ANÁLISES

- O aumento de uso aditivo e valores de abatimento indicam que houve aumento na absorção de água, a razão disso se encontra no aumento de porcentagens de sílica ativa utilizados nos concretos, isto se deve a absorção de água pelas nano-partículas e elevada área superficial da sílica ativa, aliada também à alta capacidade de absorção de água do AGRC.
- O aumento da resistência à compressão das misturas de concreto nos primeiros dias (28 dias) foi resultado da adição da sílica ativa, devido à atividade pozolânica nos períodos iniciais. Este fenômeno acontece por conta do preenchimento dos vazios na estrutura C-H-S que o conduzem a uma estrutura mais densa.
- A adição de teores de sílica ativa melhorou as propriedades de resistência à compressão axial em todos os concretos produzidos, em especial aos concretos com AGRC.
- O aumento de resistência à tração do concreto foi conseguido pela adição de sílica ativa, pois as nano-partículas da sílica conseguem preencher os espaços vazios do concreto e da zona de transição, tornando-o mais forte e denso comparado aos concretos de referência (sem SA).



- Adição de 10% de sílica ativa em concretos com AGRC melhora as propriedades do concreto, também em idades mais avançadas.
- Os resultados dos experimentos realizados nos concretos com AGRC e sílica ativa, demonstrou claramente que algumas combinações da mistura dão maiores resistência à compressão e módulo de elasticidade a estes concretos, em relação aos concretos que não possuem sílica ativa.

## 5.2 CONCLUSÕES GERAIS

A partir da investigação experimental, pode-se concluir que a substituição de agregado gráúdo natural por reciclado para produção de concretos diminui a trabalhabilidade do mesmo (dentro da faixa delimitada). Esta redução foi ainda mais agravada com a incorporação de sílica ativa, pois a SA absorve parte da água da mistura. Além disso os testes mecânicos indicam que as propriedades dos concretos com sílica ativa foram superiores aos concretos sem sílica. É possível produzir concretos com até com 50% de AGRC, com resistências superiores a 30 MPa. Dessa forma podemos concluir que a utilização de eco concretos tanto com AGRC e agregados naturais, possuem resultados positivos em relação ao comportamento mecânico quando adicionado sílica ativa.

## 5.3 SUGESTÕES DE PESQUISAS

Considerando a enorme quantidade de resíduos provenientes da construção civil é importante a continuação e disseminação do conhecimento sobre a utilização de agregados reciclados de concreto e sua interação com adições pozolânicas. A sílica ativa se mostra com alternativa para melhoria do comportamento mecânico destes concretos. Visto que o estudo ficou limitado ao comportamento mecânico, sugere-se:

- Realizar somente um estudo de dosagem de referência para analisar e comparar a interação entre os diferentes grupos de concreto produzidos;
- Avaliar o desempenho mecânico com maiores teores de substituição de AGRC e maiores teores de substituição de sílica ativa;
- Analisar as propriedades referentes à durabilidade dos concretos produzidos com AGRC e sílica ativa, ensaios como: absorção de água, carbonatação, reação álcali-agregado, penetração de cloretos;

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V. Construção Civil consome até 75% da matéria-prima do planeta. Disponível em: < <http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

ALAEJOS, P. G.; SÁNCHEZ, M. J. Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. In: International Rilem Conference on the use of Recycled Materials in Buildings and structures, Barcelona. Proceedings... Bagneux, France: Elsevier, v. 2, p. 693-702, 2004

ALMUSALLAM A. A., BESHAR H., MASLEHUDDIN M., AL-AMOUDI O. S. B. Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete. Cement and Concrete Composites, v. 26, p. 891-900. 2004.

ALTHEMAN, D. Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil. Relatório Final das Atividades de Iniciação Científica. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. ASTM C1240. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto - Especificação. NBR 7211. Rio de Janeiro. 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 53. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. NBR NM 45. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. NBR 13956-1. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. NBR 13956-2. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. NBR 7222. Rio de Janeiro. 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67. Rio de Janeiro. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Concreto - Determinação do tempo de pega. NBR NM 65. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. NBR 8522. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). NBR 16372. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimentos Portland resistentes a sulfatos. NBR 5737. Rio de Janeiro. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. NBR NM 13. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). NBR 11579. Rio de Janeiro. 2015. NBR 16372. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Terminologias. NBR 9935. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Minérios de ferro como insumo para alto-forno — Determinação da redutibilidade pelo índice do grau de redução final. NBR 7215. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. NBR 15112. Rio de Janeiro. 2004

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto fresco - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. NBR NM 23. Rio de Janeiro. 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". NBR NM 51. Rio de Janeiro. 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. NBR NM 22. Rio de Janeiro. 2004

BEHERA, M.S.K. BHATTACHARYYA, A.K. MINOCHA, R. DEOLIYA. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 501-516, 2014.

BELTRÁN, M. G.; AGRELA, F.; BARBUDO, A.; AYUSO, J.; RAMÍREZ, A. Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 72, p. 231–238, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814010344>>.

BENETTI, J. K. Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2012.

BODEN, T.A.; MARLAND, G.; ANDRES R.J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2013. Disponível em: <[http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre\\_glob\\_2010.html](http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob_2010.html)>. Acesso em: 04 Março. 2016.

BUTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CALLISTER, W. D. J. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMPITELI, V. C. Porosidade do concreto. Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987.

ÇAKIR, Ö. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 17–25, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814006515>>. Acesso em: 6/11/2014.

CORDEIRO, L. N. P. Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

COUTINHO, A. - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II e III, LNEC, Lisboa, 2000

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behavior of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Cement and Building Materials*, 24(1), 1616-1620. 2010

DAL MOLIN, D. C. C., Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DAL MOLIN, D. C. C., VIEIRA F. M. P., KULAKOWSKI, M. P., STOLFO, R. M. Pesquisa para o aprimoreto do emprego da sílica ativa Silmix em cimento e concreto e verificação de desempenho dos cimentos Eldorado. Porto Alegre, NORIE-CPGEC-UFRGS, 1997. 124p. (Relatório de Pesquisa)

DAMINELI, B. L. Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição. (Dissertação em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

DASTOL, M. Produção e propriedades da microssílica da Elkem. In: SEMINÁRIO TECNOLÓGICO DA ELKEM MICROSSÍLICA, 1. São Paulo. Anais. 1984. p.1-19.

DILBAS, H.; ŞİMŞEK, M.; ÇAKIR, Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 61, n. March 2006, p. 50–59, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814002207>\n<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002207>>.

D'AGOSTINO, L. Z. Uso de finos de pedreira no preparo de argamassas de assentamento. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

FEDUMENTI, Mariana Battisti. Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto. 2013. 134 f. Dissertação Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2013.

FERREIRA, L. M. M. “Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão. Influência da pré-saturação”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007

FONTEBOA, B. G., ABELLA, F. M., LAGE, I. M. Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume. *Construction and Building Materials*. nº 23, p. 3406-3410, 2009.

GAYARRE, F. L., VIÑUELA, R. B., SERRANO-LÓPEZ, M. A. LÓPEZ-COLINA, C. Influence of the water variation on the mechanical properties of concrete manufactured with recycled mixed aggregates for pre-stressed components. *Construction and Building Materials*. nº 94, p. 844-850, 2015.

KÖKSAL F., ALTUN F., YIGIT, I., SAHIN, Y. Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Cement and Concrete Composites*, v. 22, p. 1874-1980. 2008.

KOU, S. C.; POON, C. S.; AGRELA, F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 8, p. 788–795, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>>.

KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. 2002. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2002.

ISAIA, G. E., *et al.*, *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, IBRACON, 2007

LEITE, M.B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2001.

LOPES, I., CORDEIRO, L. N. P. Dosagem de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto. Congresso Brasileiro do Concreto, Bonito. Anais de Congresso. 2015.

HANSEN, K. K., KRUS, M., KÜNZEL, H. M. Porosity and liquid absorption of cement paste. *Materials and Structures*, v. 30, p. 934-398, 1997.

MAAGE, M. SELLEVOLD, E. J. Effect os microsilica on the durability of concrete structures. *Concrete International*, v.9 n.12, p. 39-43. 1987.

MALHOTRA V.M., MEHTA P.K. *Pozzolanic and cementitious materials*, vol. 1. Canada: Gordon and Breach Publishers; 1996. p. 191.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2014. 751 p.

MOHAMED, A. E., ELHAKARAM, A. A. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*. n° 35, p. 421-427, 2012.

MORALES, M. M., ZAMORANO M., MOYANO A. R, ESPINOSA, V. Characterization of recycled aggregates construction and demolition wastefor concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Cement and Building Materials*. n° 25, pp. 742-748, 2011

MUKHARJEE, B. B., BARAI, S. V. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. n° 55, p. 29-37, 2014.

MUKHARJEE, B. B., BARAI, S. V. Influence of incorporation of nano-silica and recycled aggregates on compressive strength and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*. n° 71, p. 570-578, 2014.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997

PADOVAN, R. G. Influência da pré molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

ROMANO, R. C. O.; SCHREUS, H.; JOHN, V.M; PILEGGI, R. G. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132008000400011>>. Acesso em: 04-03-2016

SANCHEZ, M. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tese de Doutoramento em Construção, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.

SANDEMIR, M. Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. *Construction and Building Materials*. n° 49, p. 484-489, 2013.

SELMO, S. M. S. Agregados miúdos para argamassas de revestimento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: AGREGADOS, 1986. São Paulo. Proceedings. São Paulo. 1986. p. 27-43.

SILVA, R. V.; BRITO, J. DE; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, v. 65, p. 201–217, 2014.

SILVA, R. V.; BRITO, J. DE; DHIR, R. K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 2171–2186, 2016.

SHANNAG, M. J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, v. 22, p. 399-406. 2000

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório anual. Rio de Janeiro: SNIC, 2014. 40p. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 04 Março 2016.

SOUZA, A.S. Utilização de resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

SOUZA, P. S. L. Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. 2003. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2003.

STARLING, Tadeu. RIBEIRO, C.C. PINTO, J.C.S.; *Materiais de construção civil*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

ULSEN, C. Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. Tese (Doutorado) –Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TROIAN, A. Avaliação da influência do agregado reciclado de concreto na penetração de íons cloreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2010.

VANDERLEI, Romel Dias. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. 2004. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-23082006-095043/>>. Acesso em: 2016-03-03.

VOGT, C. J. Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.



## 7. APÊNDICES

### 7.1 APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS REALIZADOS.

Tabela 15 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG0SA0	32,29
AG0SA0	30,78
AG0SA0	33,09
AG0SA0	30,71
AG0SA0	30,54
AG0SA0	29,51
Média	31,15
Desvio Padrão	1,30
CV	4,17
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG0SA5	39,81
AG0SA5	39,99
AG0SA5	39,01
AG0SA5	39,01
AG0SA5	36,22
AG0SA5	39,77
Média	38,97
Desvio Padrão	1,41
CV	3,62
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG0SA10	41,37
AG0SA10	42,14
AG0SA10	41,57
AG0SA10	37,34
AG0SA10	39,58
AG0SA10	41,37
Média	40,56
Desvio Padrão	1,80
CV	4,43

Tabela 16 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG0SA0	34,53
AG0SA0	37,97
AG0SA0	36,61
AG0SA0	36,99
AG0SA0	37,63
AG0SA0	36,49
Média	36,70
Desvio Padrão	1,21
CV	3,30
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG0SA5	41,34
AG0SA5	40,93
AG0SA5	40,69
AG0SA5	41,89
AG0SA5	42,18
AG0SA5	41,56
Média	41,43
Desvio Padrão	0,57
CV	1,36
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG0SA10	41,34
AG0SA10	43,65
AG0SA10	44,85
AG0SA10	40,87
AG0SA10	43,44
AG0SA10	41,37
Média	42,59
Desvio Padrão	1,61
CV	3,78

Tabela 17 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG25SA0	30,68
AG25SA0	29,15
AG25SA0	28,83
AG25SA0	29,18
AG25SA0	30,65
AG25SA0	29,98
Média	29,75
Desvio Padrão	0,81
CV	2,71
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG25SA5	31,53
AG25SA5	32,24
AG25SA5	28,51
AG25SA5	30,56
AG25SA5	32,45
AG25SA5	28,66
Média	30,66
Desvio Padrão	1,74
CV	5,67
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG25SA10	32,37
AG25SA10	31,56
AG25SA10	32,78
AG25SA10	33,65
AG25SA10	32,45
AG25SA10	31,25
Média	32,34
Desvio Padrão	0,86
CV	2,67

Tabela 18 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG25SA0	29,04
AG25SA0	29,55
AG25SA0	29,09
AG25SA0	24,90
AG25SA0	29,05
AG25SA0	29,89
Média	28,59
Desvio Padrão	1,84
CV	6,43
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG25SA5	30,94
AG25SA5	32,11
AG25SA5	35,91
AG25SA5	35,28
AG25SA5	35,45
AG25SA5	31,95
Média	33,61
Desvio Padrão	2,17
CV	6,46
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG25SA10	35,37
AG25SA10	34,60
AG25SA10	29,51
AG25SA10	29,45
AG25SA10	34,38
AG25SA10	35,77
Média	33,18
Desvio Padrão	2,91
CV	8,77

Tabela 19 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG50SA0	27,14
AG50SA0	27,65
AG50SA0	28,96
AG50SA0	27,45
AG50SA0	28,99
AG50SA0	29,42
Média	28,27
Desvio Padrão	0,96
CV	3,41
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG50SA5	30,69
AG50SA5	32,54
AG50SA5	29,87
AG50SA5	32,98
AG50SA5	32,65
AG50SA5	32,44
Média	31,86
Desvio Padrão	1,27
CV	3,97
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG50SA10	33,25
AG50SA10	32,89
AG50SA10	32,56
AG50SA10	31,74
AG50SA10	32,95
AG50SA10	33,00
Média	32,73
Desvio Padrão	0,53
CV	1,63

Tabela 20 - Resultados individuais de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG50SA0	38,23
AG50SA0	37,03
AG50SA0	38,71
AG50SA0	36,62
AG50SA0	37,45
AG50SA0	37,26
Média	37,55
Desvio Padrão	0,78
CV	2,08
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG50SA5	38,52
AG50SA5	33,81
AG50SA5	37,29
AG50SA5	40,11
AG50SA5	39,64
AG50SA5	38,59
Média	37,99
Desvio Padrão	2,27
CV	5,98
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>30 Mpa</b>
AG50SA10	40,67
AG50SA10	39,97
AG50SA10	48,85
AG50SA10	34,09
AG50SA10	42,65
AG50SA10	42,98
Média	41,54
Desvio Padrão	4,81
CV	11,57

Tabela 21 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos

AG0 (0% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG0SA0	11,61
AG0SA0	10,65
AG0SA0	8,61
Média	10,29
Desvio Padrão	1,53
CV	14,89
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG0SA5	11,47
AG0SA5	13,00
AG0SA5	13,94
Média	12,80
Desvio Padrão	1,25
CV	9,74
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG0SA10	13,61
AG0SA10	13,54
AG0SA10	12,89
Média	13,35
Desvio Padrão	0,40
CV	2,97

Tabela 22 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias dos concretos

AG0 (0% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG0SA0	10,43
AG0SA0	10,46
AG0SA0	9,94
Média	10,28
Desvio Padrão	0,29
CV	2,84
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG0SA5	11,54
AG0SA5	12,13
AG0SA5	12,47
Média	12,05
Desvio Padrão	0,47
CV	3,91
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG0SA10	15,92
AG0SA10	13,93
AG0SA10	15,97
Média	15,27
Desvio Padrão	1,16
CV	7,62



Tabela 23 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos

AG25 (25% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG25SA0	9,03
AG25SA0	8,05
AG25SA0	9,04
Média	8,71
Desvio Padrão	0,57
CV	6,53
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG25SA5	12,05
AG25SA5	9,95
AG25SA5	11,53
Média	11,18
Desvio Padrão	1,09
CV	9,79
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG25SA10	11,36
AG25SA10	8,99
AG25SA10	13,70
Média	11,35
Desvio Padrão	2,36
CV	20,75

Tabela 24 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias dos concretos

AG25 (25% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG25SA0	11,82
AG25SA0	10,97
AG25SA0	10,80
Média	11,20
Desvio Padrão	0,55
CV	4,88
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG25SA5	11,73
AG25SA5	8,53
AG25SA5	10,84
Média	10,37
Desvio Padrão	1,65
CV	15,93
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG25SA10	12,38
AG25SA10	12,31
AG25SA10	11,41
Média	12,03
Desvio Padrão	0,54
CV	4,50

Tabela 25 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos

AG50 (50% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG50SA0	9,45
AG50SA0	8,12
AG50SA0	10,69
Média	9,42
Desvio Padrão	1,29
CV	13,64
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG50SA5	8,62
AG50SA5	10,20
AG50SA5	11,01
Média	9,94
Desvio Padrão	1,22
CV	12,22
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG50SA10	14,21
AG50SA10	13,10
AG50SA10	12,68
Média	13,33
Desvio Padrão	0,79
CV	5,93

Tabela 26 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG50SA0	10,01
AG50SA0	12,19
AG50SA0	10,20
Média	10,80
Desvio Padrão	1,21
CV	11,18
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG50SA5	12,45
AG50SA5	11,46
AG50SA5	13,86
Média	12,59
Desvio Padrão	1,21
CV	9,58
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Resistência em MPa</b>
AG50SA10	13,40
AG50SA10	14,08
AG50SA10	14,45
Média	13,98
Desvio Padrão	0,53
CV	3,81

Tabela 27 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG0SA0	29,91
AG0SA0	27,36
AG0SA0	32,01
Média	29,76
Desvio Padrão	2,33
CV	7,83
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG0SA5	32,52
AG0SA5	31,07
AG0SA5	32,32
Média	31,97
Desvio Padrão	0,78
CV	2,45
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG0SA10	35,20
AG0SA10	35,75
AG0SA10	34,56
Média	35,17
Desvio Padrão	0,60
CV	1,69

Tabela 28 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG0 (0% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG0SA0	35,02
AG0SA0	34,58
AG0SA0	32,98
Média	34,19
Desvio Padrão	1,07
CV	3,14
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG0SA5	33,56
AG0SA5	37,89
AG0SA5	32,45
Média	34,63
Desvio Padrão	2,87
CV	8,30
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG0SA10	38,34
AG0SA10	42,25
AG0SA10	38,91
Média	39,83
Desvio Padrão	2,11
CV	5,30

Tabela 29 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG25SA0	31,01
AG25SA0	30,81
AG25SA0	30,89
Média	30,90
Desvio Padrão	0,10
CV	0,33
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG25SA5	32,68
AG25SA5	32,85
AG25SA5	31,25
Média	32,26
Desvio Padrão	0,88
CV	2,73
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG25SA10	35,57
AG25SA10	35,65
AG25SA10	34,78
Média	35,33
Desvio Padrão	0,48
CV	1,36

Tabela 30 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 91 dias dos concretos AG25 (25% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG25SA0	33,59
AG25SA0	31,37
AG25SA0	32,73
Média	32,56
Desvio Padrão	1,12
CV	3,44
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG25SA5	31,04
AG25SA5	33,09
AG25SA5	37,79
Média	33,97
Desvio Padrão	3,46
CV	10,19
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG25SA10	32,60
AG25SA10	36,28
AG25SA10	34,75
Média	34,54
Desvio Padrão	1,85
CV	5,35



Tabela 31 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG50SA0	23,20
AG50SA0	24,57
AG50SA0	25,68
Média	24,48
Desvio Padrão	1,24
CV	5,08
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG50SA5	28,30
AG50SA5	28,55
AG50SA5	29,89
Média	28,91
Desvio Padrão	0,85
CV	2,95
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG50SA10	35,22
AG50SA10	33,55
AG50SA10	34,75
Média	34,50
Desvio Padrão	0,86
CV	2,50

Tabela 32 - Resultados individuais do módulo de elasticidade aos 91 dias dos concretos AG50 (50% de AGRC).

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG50SA0	30,73
AG50SA0	34,09
AG50SA0	31,37
Média	32,06
Desvio Padrão	1,78
CV	5,56
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG50SA5	33,97
AG50SA5	32,86
AG50SA5	33,46
Média	33,43
Desvio Padrão	0,56
CV	1,66
<b>Tipo de Concreto</b>	<b>GPa</b>
AG50SA10	35,71
AG50SA10	34,89
AG50SA10	35,26
Média	35,29
Desvio Padrão	0,41
CV	1,16

## 7.2 APÊNDICE B – RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICA REALIZADAS NOS ENSAIOS MECÂNICOS.

Neste apêndice são apresentadas as análises dos dados referentes aos concretos produzidos com substituição parcial do agregado graúdo natural por 0%, 25% e 50% de AGRC, com diferentes teores de sílica ativa 0, 5% e 10% de substituição em relação ao cimento, variando as idades das amostras e como variáveis têm-se a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade (variável em análise).

### 7.2.1 Teste de Normalidade

Para evitar alteração no nível de significância os dados foram analisados para avaliar se os mesmos eram provenientes de uma população normal. A análise dos p-valores, permite aceitar as hipóteses correspondentes ao nível de significância de 0,05. Todos os resultados do teste de normalidade permitiram a conclusão de que os dados são provenientes de uma população normal.

### 7.2.2 Teste de homogeneidade

Os dados foram testados quanto à sua homocedasticidade. Os valores permitem a validação da homogeneidade das variâncias.

### 7.2.3 Análise entre idades (*teste t não pareado*)

Os dados foram comparados entre os dois grupos de idades utilizando-se o teste T de *Student* de dois grupos independentes, devido o mesmo ser indicado para comparação de duas médias quando os grupos são independentes.

### 7.2.3.1 Resistência à compressão axial

Tabela 33 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0). Resultados de ensaio de resistência à compressão axial.

AG0					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	7,653	10	31,153	36,703	0,000
5	3,970	10	38,968	41,432	0,003
10	2,055	10	40,562	42,587	0,067

Tabela 34 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG25). Resultados de ensaio de resistência à compressão axial.

AG25					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	1,413	10	29,745	28,587	0,188
5	2,596	10	30,658	33,607	0,027
10	0,675	10	32,343	33,180	0,515

Tabela 35 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG50). Resultados de ensaio de resistência à compressão axial.

AG50					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	18,335	10	28,268	37,550	0,000
5	5,774	10	31,862	37,993	0,000
10	4,460	10	32,732	41,535	0,001

### 7.2.3.2 Resistência à tração

Tabela 36 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).

AG0					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	0,015	4	10,290	10,276	0,988
5	0,983	4	12,803	12,803	0,381
10	2,714	4	13,346	13,346	0,533

Tabela 37 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).

<b>AG25</b>					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	5,468	4	8,706	11,197	<b>0,005</b>
5	0,708	4	11,176	10,366	0,517
10	0,489	4	11,350	12,033	0,649

Tabela 38 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).

<b>AG50</b>					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	1,355	4	9,420	10,800	0,246
5	2,677	4	9,943	12,590	0,055
10	1,175	4	13,330	13,976	0,305

#### 7.2.3.4 Módulo de Elasticidade

Tabela 39 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG0).

<b>AG0</b>					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	2,992	4	29,760	34,193	<b>0,040</b>
5	1,549	4	31,969	34,663	0,196
10	3,681	4	35,170	39,833	<b>0,021</b>

Tabela 40 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG25).

<b>AG25</b>					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	2,559	4	30,903	35,563	0,063
5	0,831	4	33,973	32,261	0,453
10	0,716	4	35,333	34,543	0,513

Tabela 41 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (concreto tipo AG50).

<b>AG50</b>					
Test t não pareado	T-valor	Graus de Liberdade	Média 28	Média 91	P - valor
0	6,038	4	24,481	32,063	<b>0,004</b>
5	7,676	4	28,914	33,430	<b>0,002</b>
10	1,420	4	34,502	35,287	0,229

## 7.2.4 Análise entre grupos (anova de uma via)

Quando os dados dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, foram comparados entre grupos para a mesma condição de idades e tipo de concreto houve diferença significativa entre os grupos.

### 7.2.4.1 Resistência à compressão axial

Tabela 42 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG0), aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	304,259	152,129	66,020	<b>0,000</b>
Resíduos	15	34,564	2,304		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	116,609	58,305	39,966	<b>0,000</b>
Resíduos	15	21,882	1,459		

Tabela 43 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG25) aos 28 e 91 dias de idade.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	20,849	10,425	7,086	<b>0,007</b>
Resíduos	15	22,068	1,471		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	92,962	46,481	8,417	<b>0,004</b>
Resíduos	15	82,833	5,522		

Tabela 44 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG50), aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	67,180	33,590	35,777	<b>0,000</b>
Resíduos	15	14,023	0,939		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	57,240	28,620	2,974	<b>0,082</b>
Resíduos	15	144,323	9,621		

### 7.2.4.2 Resistência à Tração

Tabela 45 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG0) aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	15,955	7,977	5,896	<b>0,039</b>
Resíduos	6	8,118	1,353		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	38,510	19,255	34,784	<b>0,005</b>
Resíduos	6	3,321	0,553		

Tabela 46 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG25) aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	13,118	6,559	2,784	0,139
Resíduos	6	14,131	2,355		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	4,167	2,083	1,882	0,231
Resíduos	6	6,638	1,106		

Tabela 47 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG50) aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	27,031	13,515	10,800	<b>0,010</b>
Resíduos	6	7,508	1,251		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	15,218	7,609	7,141	<b>0,025</b>
Resíduos	6	6,392	1,065		

### 7.2.4.3 Módulo de Elasticidade

Tabela 48 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG0) aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	46,761	23,380	10,891	<b>0,010</b>
Resíduos	6	12,879	2,146		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	0,496	0,247	0,045	0,956
Resíduos	6	33,092	5,515		

Tabela 49 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG25) aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	30,911	15,455	45,680	<b>0,000</b>
Resíduos	6	2,030	0,338		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	6,233	3,116	0,562	0,597
Resíduos	6	33,292	5,548		

Tabela 50 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (concreto tipo AG50) aos 28 e 91 dias.

<b>TABELA DA ANOVA 28 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	151,360	75,680	75,163	<b>0,000</b>
Resíduos	6	6,041	1,006		
<b>TABELA DA ANOVA 91 DIAS</b>					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P - valor
Teor de adição	2	15,704	7,852	6,436	<b>0,032</b>
Resíduos	6	7,320	1,220		



## 7.2.5 Comparações Múltiplas

### 7.2.5.1 Resistência à compressão axial

Tabela 51 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG0

(Os números em vermelho indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

28 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	5,5385	10,0914	0,0000
0	10	7,1318	11,6847	0,0000
10	5	0,6831	3,8697	0,1974
91 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	2,9170	6,5396	0,0000
0	10	4,0720	7,6946	0,0000
10	5	-0,6563	2,9663	0,2538

Tabela 52 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG25

(Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

28 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	0,9056	2,7323	0,4144
0	10	0,7793	4,4273	0,0055
10	5	0,1339	3,5039	0,0714
91 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	1,4959	8,5440	0,0057
0	10	1,0692	8,1174	0,0107
10	5	3,9507	3,0974	0,9471

Tabela 53 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG50

(Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

28 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	2,1402	5,0464	0,0000
0	10	3,0102	5,9164	0,0000
10	5	0,5831	2,3231	0,2946
91 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	4,2083	5,0950	0,9668
0	10	0,6667	8,6367	0,0991
10	5	1,1100	8,1933	0,1520

### 7.2.5.2 Resistência à tração

Tabela 54 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG0 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

28 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	0,4007	5,4274	0,0847
0	10	0,1425	5,9707	<b>0,0416</b>
10	5	2,3707	3,4574	0,8393
91 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	0,0939	3,6339	0,0605
0	10	3,1327	6,8606	<b>0,0004</b>
10	5	1,3627	5,0906	<b>0,0043</b>

Tabela 55 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG25 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

28 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	1,3747	6,3147	0,2000
0	10	1,2013	6,4880	0,1679
10	5	3,6713	4,0180	0,9895
91 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	3,4651	1,8051	0,6223
0	10	1,7985	3,4718	0,6179
10	5	0,9685	4,3018	0,2079

Tabela 56 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG50 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

28 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	1,3747	6,3147	0,2000
0	10	1,2013	6,4880	0,1679
10	5	3,6713	4,0180	0,9895
91 DIAS				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	3,4651	1,8051	0,6223
0	10	1,7985	3,4718	0,6179
10	5	0,9685	4,3018	0,2079

### 7.2.5.3 Módulo de Elasticidade

Tabela 57 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto AG0 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

<b>28 DIAS</b>				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	1,1691	6,1718	0,1719
0	10	1,9031	9,2444	<b>0,0083</b>
10	5	0,5981	6,7428	0,0935
<b>91 DIAS</b>				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	6,1034	5,6634	0,9927
0	10	5,3340	6,2334	0,9818
10	5	5,3134	6,4534	0,9528

Tabela 58 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG25 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

<b>28 DIAS</b>				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	0,9920	2,8152	0,6480
0	10	2,9731	5,8870	<b>0,0002</b>
10	5	1,6151	4,5295	<b>0,0015</b>
<b>91 DIAS</b>				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	4,4913	7,3113	0,7541
0	10	3,9213	7,8813	0,5870
10	5	5,3313	6,4173	0,9531

Tabela 59 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 e 91 dias do concreto tipo AG50 (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ ).

<b>28 DIAS</b>				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	1,9188	6,9465	<b>0,0039</b>
0	10	7,5091	12,5368	<b>0,0000</b>
10	5	3,0764	8,1041	<b>0,0011</b>
<b>91 DIAS</b>				
Sílica (%)	Sílica (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	5	1,4005	4,1338	0,3491
0	10	0,4561	5,9905	<b>0,0272</b>
10	5	0,9105	4,6238	0,1791