

GUILHERME VICTOR DE OLIVEIRA ALVES

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE MÉTODOS
DE MISTURA MODIFICADOS E ADIÇÃO DE
CINZAS DE CASCA DE ARROZ EM
CONCRETOS DE AGREGADOS RECICLADOS**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, fevereiro de 2020

GUILHERME VICTOR DE OLIVEIRA ALVES

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE MÉTODOS DE MISTURA MODIFICADOS E
ADIÇÃO DE CINZAS DE CASCA DE ARROZ EM CONCRETOS DE AGREGADOS
RECICLADOS**

**Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.**

Orientadora: Prof^a. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali

BELO HORIZONTE

2020

Alves, Guilherme Victor de Oliveira
A474a Avaliação da influência de métodos de mistura modificados em
adição de cinzas de casca de arroz em concretos de agregados reciclados /
Guilherme Victor de Oliveira Alves. – 2020.
158 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Civil.
Orientadora: Flávia Spitale Jacques Poggiali.
Bibliografia: f. 131-142.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Concreto – Mistura – Teses 2. Materiais de construção – Teses.
3. Reaproveitamento – Teses. 4. Resíduos como material de construção –
Avaliação – Teses. 5. Agregados (Materiais de construção) – Teses.
I. Poggiali, Flávia Spitale Jacques. II. Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil.
III. Título.

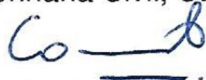
CDD 691.3

GUILHERME VICTOR DE OLIVEIRA ALVES

**AVALIAÇÃO DE INFLUÊNCIA DE MÉTODOS DE MISTURA
MODIFICADOS E ADIÇÃO DE CINZAS DE CASCA DE ARROZ
EM CONCRETOS DE AGREGADOS RECICLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil


Prof^a. Dr^a. Flávia Spitale Jacques Poggiali
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG


Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva
Programa de pós-graduação em engenharia das construções, UFOP

Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2020.

RESUMO

A relevância do uso de resíduos de construção de demolição, também chamados de RCD, vem aumentando principalmente devido a questões econômicas e ambientais. A atual tendência em diversas economias em desenvolvimento é olhar para os RCD como um recurso em potencial para diversos propósitos, inclusive utilizá-los como agregados em concretos. Sua utilização, no entanto, prejudica a resistência mecânica e a trabalhabilidade do concreto. Modificações nos métodos de mistura de concreto e adições de materiais pozolânicos são alternativas que visam mitigar os efeitos negativos decorrentes do uso de RCD. A presente pesquisa busca, por meio da adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e do uso de métodos de mistura de concreto propostos pela literatura, mensurar e analisar a melhoria causada à resistência à compressão, microestrutura e trabalhabilidade do concreto fabricado com resíduos de construção e demolição. Os RCD foram obtidos na estação de Reciclagem de Entulho da Prefeitura de Belo Horizonte. Após obtenção, foram submetidos a um processo de limpeza, retirando os contaminantes identificados. Foi realizada uma análise de método de secagem para uso dos RCD na confecção do concreto. Foram variados os percentuais de adição de RCD (0 e 100%) e utilizadas adições de cinzas de casca de arroz e os métodos de mistura em três fases (*Triple Mixing Method*) e duas fases (*Two-stage mixing approach*), totalizando oito traços de concreto. Foram executados ensaios de resistência à compressão, absorção de água, abatimento de tronco de cone e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os concretos produzidos pelo TM apresentaram melhores níveis de resistência à compressão e maior absorção de água que aqueles produzidos pelo TSMA. A análise da microestrutura apontou maior densificação da ZTI para os concretos produzidos pelo TM, registrando maior presença de produtos de hidratação no local, em especial quando utilizadas cinzas de casca de arroz.

Palavras-chave: concreto de agregados reciclados; método de mistura; resíduos de construção e demolição.

ABSTRACT

The use of construction and demolition waste (C&DW) has become more relevant, especially due to economic and environmental matters. The current trend in developed economies is to treat the C&DW as a potential resource for many purposes, including as aggregates for concrete. Its use as aggregate, however, can worsen the concrete's properties. Some of the alternatives capable of reducing the negative impact of C&DW in concrete are the use of modified concrete mixing methods, and the addition of pozzolans. The purpose of this research is to measure and analyze the improvement to the compressive strength, microstructure and workability of concretes made with C&DW as coarse aggregates, by varying pozzolan additions and concrete mixing methods. The C&DW was obtained from the Belo Horizonte waste recycling station. After the waste was collected, it was submitted to a cleaning process, removing identified sources of contamination. The C&DW initial moisture content was assessed before the concrete was prepared. In total, eight concrete mixtures were prepared with different levels of C&DW as coarse aggregate (0 and 100%), using rice husk ash and with the Triple Mixing Method and Two-stage mixing approach. Compressive strength, slump and water absorption tests were performed. The concrete microstructure was assessed with the use of scanning electron microscopy (SEM). The mixtures manufactured by the TM obtained higher compressive strength and higher water absorption than the mixtures prepared with use of TSMA. The SEM analysis pointed out a denser ITZ in the concrete mixtures manufactured by TM, showing a higher concentration of cement hydration products in the ITZ, especially when rice husk ash was used.

Key-words: recycled aggregate concrete; mixing method; construction and demolition waste.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo aprendizado constante, pelos momentos difíceis e superações e pelas oportunidades que me foram e são dadas.

Agradeço à minha família, em especial meus pais e minha irmã, pelo apoio constante, por serem meu porto seguro e estarem sempre ao meu lado.

Aos professores do Programa de Pós Graduação do CEFET-MG, em especial à minha orientadora Flávia, pela paciência, disponibilidade, por se mostrar sempre solícita e contribuir da melhor forma possível para conclusão deste trabalho.

Agradeço aos funcionários do CEFET-MG, em especial ao Ivan, que foi de grande ajuda durante a execução deste trabalho, sempre disposto a colaborar durante ensaios e concretagens.

Aos colegas do mestrado.

Ao CEFET-MG e à CAPES, pelo auxílio financeiro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Agregado gráúdo natural (a) e agregado gráúdo reciclado (b).....	28
Figura 2 – Foto de agregado reciclado com ZTI e camada de argamassa antiga aderida.	28
Figura 3 - Massa específica de agregados gráúdos naturais e agregados gráúdos reciclados.....	29
Figura 4 - Capacidade de absorção de água de agregados gráúdos naturais e agregados gráúdos reciclados.	30
Figura 5 - Porosidade de agregados gráúdos naturais e agregados gráúdos reciclados.....	30
Figura 6 - Esquema de estrutura do agregado gráúdo reciclado com e sem tratamento em sílica ativa.....	33
Figura 7 - Esquema das duas zonas de transição interfacial em um concreto de agregados reciclados.	35
Figura 8 - Variação da resistência à compressão (28 dias) do concreto de agregados reciclados, conforme teor de AGR.	37
Figura 9 - <i>Double Mixing Method</i>	39
Figura 10 - <i>Single Mixing Method</i>	39
Figura 11 - Método de mistura de concreto convencional (NMA).....	41
Figura 12 - <i>Two Stage Mixing Approach</i> (TSMA).....	41
Figura 13 - Método de mistura TSMA _{p1}	42
Figura 14 - Método de mistura TSMA _{p2}	43
Figura 15 - Método de mistura TSMA _s	44
Figura 16 - Método de mistura TSMA _{sc}	44
Figura 17 - Método de mistura TSMA _{sfc} , desenvolvido por Rajhans; Panda; Nayak, (2018).	46
Figura 18 - <i>Triple Mixing Method</i>	48
Figura 19 - Método de mistura proposto por Li; Xiao; Zhou, (2009).	51
Figura 20 - Método de mistura de concreto de referência em Li; Xiao; Zhou, (2009).....	51
Figura 21 - Britador de Estação de Reciclagem de Entulho de Belo Horizonte, MG.	58

Figura 22 - Britador e resíduos de construção e demolição após britagem, granulometria próxima à da brita nº 1.	58
Figura 23 - Aspecto visual dos agregados reciclados antes e após lavagem e retirada de impurezas.	59
Figura 24 - Composição dos agregados reciclados.....	60
Figura 25 – Resultados de melhora de resistência obtidos por métodos de mistura de concretos de agregados reciclados expostos em 2.4.	64
Figura 26 - Método de mistura em duas etapas (TSMA _{CCA}) utilizado na presente pesquisa.....	68
Figura 27 - Método de mistura TM, adotado no presente estudo.	69
Figura 28 - Amostras retiradas para MEV antes de preparo finalizado.	71
Figura 29 - Fôrmas de silicone e amostras de concreto.....	72
Figura 30 - Amostras preparadas para microscopia eletrônica de varredura, traços de 1 a 8, em ordem crescente, da esquerda para a direita.	72
Figura 31 - Distribuição granulométrica do cimento e da cinza de casca de arroz utilizados na pesquisa.	75
Figura 32 - Distribuição granulométrica dos AGN e AGR e limites superior e inferior de granulometria de agregados graúdos estipulados pela NBR 7211. .	77
Figura 33 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	79
Figura 34 - Trabalhabilidade de concretos produzidos com AGR secos em estufa e secos em ambiente ventilado.....	80
Figura 35 - Abatimento de tronco de cone em concretos produzidos com AGR secos em estufa “a)” e AGR secos em ambiente aberto “b)”.....	81
Figura 36 – Resistência à compressão de concretos produzidos com AGR secos em estufa e secos em ambiente ventilado.....	81
Figura 37 - Resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone e teores de aditivo superplastificante utilizados nas misturas.....	83
Figura 38 - Resistência à compressão dos concretos ensaiados, aos 28 e 91 dias.	84
Figura 39 – Resistência à compressão dos concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes métodos de mistura utilizados (valores médios representados dentro das barras).....	88
Figura 40 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TM-AGR-CCA, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.	89

Figura 41 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TSMA-AGR-CCA, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.	90
Figura 42 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TM-AGN-CCA, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.	91
Figura 43 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TM-AGR, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.	91
Figura 44 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TSMA-AGN, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.	92
Figura 45 – Resistência à compressão de concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes teores de AGR (valores médios representados dentro das barras).	93
Figura 46 - Microscopia eletrônica de varredura, traço produzido com AGR....	94
Figura 47 - Microscopia eletrônica de varredura, traço com AGN.....	95
Figura 48 - Resistência à compressão de concretos aos 28 e 91 dias (valores médios representados dentro das barras).....	97
Figura 49 - Microscopia eletrônica de varredura, traço TM-AGR-CCA, focando zona de transição interfacial	99
Figura 50 - Ampliações da Figura 49, apontando formação de C-S-H na ZTI e CCA agindo como pontos de nucleação para formação de C-S-H.....	100
Figura 51 - Microscopia eletrônica de varredura, TSMA-AGR-CCA, focando zona de transição interfacial	100
Figura 52 - Ampliação da Figura 51, traço TSMA-AGR-CCA, destacando presença de cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição interfacial.	101
Figura 53 – Absorção de água por imersão de concretos aos 28 e 91 dias (valores médios representados dentro das barras).....	110
Figura 54 – Teor de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes métodos de mistura utilizados.	113
Figura 55 – Capacidade de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes teores de AGR utilizados.....	114
Figura 56 - Capacidade de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes idades de execução dos ensaios.....	116
Figura 57 - Capacidade de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes teores de CCA.	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quantidades de água no <i>Triple Mixing Method</i>	48
Quadro 2 - Ensaio em traços de concreto para avaliação de condição de umidade dos AGR	63
Quadro 3 - Variáveis de resposta, ensaios e normas correspondentes	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Panorama global de produção e reciclagem de RCD.	25
Tabela 2 - Traços de concreto utilizados em Rajhans; Panda; Nayak, (2018). ..	46
Tabela 3 - Traços de concreto utilizados em pesquisa de Li; Xiao; Zhou, (2009).	49
Tabela 4 - Características do aditivo superplastificante utilizado na pesquisa.	55
Tabela 5 - Relatório de ensaios do cimento utilizado.	56
Tabela 6 - Análise química do cimento utilizado.	56
Tabela 7 - Traço de concreto de referência adotado durante pesquisa.	61
Tabela 8 - Traço de concreto para avaliação de umidade de agregados reciclados.....	62
Tabela 9 - Teor de umidade de AGR secos em ambiente aberto, tomado logo antes da concretagem.	62
Tabela 10 - Misturas ensaiadas durante pesquisa.	66
Tabela 11 - Traços de concreto segundo misturas desenvolvidas durante pesquisa.....	67
Tabela 12 - Cálculo adições de água W1 e W2, traços produzidos pelo TM com agregados naturais.	69
Tabela 13 - Cálculo adições de água W1 e W2, traços produzidos pelo TM com agregados naturais.	70
Tabela 14 - Parâmetros adotados para ANOVA e teste de Tukey e níveis dos parâmetros.....	73
Tabela 15 - Arranjo das misturas para testes estatísticos.....	73
Tabela 16 - Caracterização das cinzas de casca de arroz.	76
Tabela 17 - Porcentagem acumulada retida de agregados grãos naturais e reciclados em ensaio de granulometria.	76
Tabela 18 - Propriedades físicas dos AGN e dos AGR.	77
Tabela 19 - Porcentagem acumulada retida de agregados miúdos em ensaio de granulometria.	78
Tabela 20 - Propriedades físicas do agregado miúdo.....	79
Tabela 21 - Resultados de análise de variância ANOVA para concretos produzidos com AGR secos em estufa e secos em ambiente ventilado.	82
Tabela 22 - Resultado de análise de variância, resistência à compressão.....	84

Tabela 23 - Teste de Tukey para fatores isolados, na variável de resposta de resistência à compressão.....	87
Tabela 24 - Comparação entre concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, mantendo constante o teor de AGR, teor de CCA e idade.	88
Tabela 25 - Comparação entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes teores de AGR, mantendo constante o teor de CCA, método de mistura e idade.....	93
Tabela 26 - Comparação entre concretos ensaiados em diferentes idades, mantendo constante o teor de AGR, teor de CCA e método de mistura.....	97
Tabela 27 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações em métodos de mistura e teor de AGR.....	98
Tabela 28 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações em métodos de mistura e teor de CCA.....	98
Tabela 29 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações em métodos de mistura e idade.	102
Tabela 30 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações de teor de AGR e teor de CCA.	102
Tabela 31 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações de teor de CCA e idade.....	103
Tabela 32 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações de teor de AGR e idade.	104
Tabela 33 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e teores de CCA.	105
Tabela 34 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com mesmo teor de AGR e diferentes métodos de mistura e teores de CCA.	106
Tabela 35 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de CCA e idades.....	106
Tabela 36 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com mesmo teor de AGR e diferentes métodos de mistura e teores de CCA.	107
Tabela 37 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e idades.....	108

Tabela 38 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes teores de AGR, teores de CCA e idades.....	109
Tabela 39 - Resultado de análise de variância, absorção de água por imersão.	110
Tabela 40 - Teste de Tukey para fatores isolados, na variável de resposta de absorção de água.....	112
Tabela 41 – Absorção de água, concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, mantendo constantes os teores de AGR, teores de CCA e idade.	113
Tabela 42 - Absorção de água, concretos produzidos com diferentes teores de AGR, mantendo constantes o método de mistura, teor de CCA e idade.	115
Tabela 43 - Absorção de água, concretos ensaiados em diferentes idades, mantendo constantes o método de mistura, teor de AGR e teor de CCA.....	116
Tabela 44 - Absorção de água, concretos ensaiados com diferentes teores de CCA, mantendo constantes o método de mistura, teor de AGR e idade.	117
Tabela 45 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com variados métodos de mistura e teores de AGR.	118
Tabela 46 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com variados métodos de mistura e teores de adição de CCA. ...	119
Tabela 47 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com variados métodos de mistura e idades.....	119
Tabela 48 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes teores de AGR e de adição de CCA.	120
Tabela 49 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes teores de CCA em diferentes idades.	120
Tabela 50 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes teores de AGR em diferentes idades.	121
Tabela 51 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e CCA.	122
Tabela 52 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de CCA e idades.....	123
Tabela 53 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos pelo TSMA, em diferentes idades, para teores de AGN e AGR.....	124
Tabela 54 - Comparações entre capacidade de absorção de água de cocnretos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e idade.....	124

Tabela 55 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos com diferentes teores de AGR, teores de CCA e idades.	125
Tabela 56 - Teste de Tukey, fatores isolados para resistência à compressão	144
Tabela 57 - Teste de Tukey considerando método de mistura e teor de AGR.	144
Tabela 58 - Teste de Tukey considerando método de mistura e CCA.....	144
Tabela 59 - Teste de Tukey considerando método de mistura e idade	144
Tabela 60 - Teste de Tukey considerando teor de AGR e CCA	145
Tabela 61 - Teste de Tukey considerando CCA e idade.....	145
Tabela 62 - Teste de Tukey considerando teor de AGR e idade	145
Tabela 63 - Teste de Tukey considerando método de mistura, teor de AGR e CCA	145
Tabela 64 - Teste de Tukey considerando método de mistura, CCA e idade...	146
Tabela 65 - Teste de Tukey considerando método de mistura, teor de AGR e idade.....	147
Tabela 66 - Teste de Tukey considerando teor de AGR, CCA e idade.....	147
Tabela 67 - Resultado do teste de Tukey para resistência à compressão	148
Tabela 68 - Teste de Tukey, fatores isolados para absorção de água.....	152
Tabela 69 - Teste de Tukey considerando método de mistura e teor de AGR.	152
Tabela 70 - Teste de Tukey considerando Método de mistura e CCA	152
Tabela 71 - Teste de Tukey considerando método de mistura e idade	152
Tabela 72 - Teste de Tukey considerando teor de AGR e CCA	153
Tabela 73 - Teste de Tukey considerando CCA e idade.....	153
Tabela 74 - Teste de Tukey considerando Teor de AGR e idade	153
Tabela 75 - Teste de Tukey considerando Método de mistura, teor de AGR e CCA	153
Tabela 76 - Teste de Tukey considerando Método de mistura, CCA e idade...	154
Tabela 77 - Teste de Tukey considerando método de mistura, teor de AGR e idade.....	155
Tabela 78 - Teste de Tukey considerando teor de AGR, CCA e idade.....	156
Tabela 79 - Resultado do teste de Tukey para absorção de água	156

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGN	agregado(s) gráuódo(s) natural(is)
AR	agregado(s) reciclado(s)
AGR	agregado(s) gráuódo(s) reciclado(s)
ARC	agregado(s) de resíduos de concreto
ARM	agregado(s) de resíduos mistos
CAR	Concreto de agregados reciclados
CCA	Cinzas de casca de arroz
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DM	<i>Double mixing method</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NMA	<i>Normal mixing approach</i>
SP	superplastificante
TM	<i>Triple Mixing Method</i>
TSMA	<i>Two stage mixing approach</i>
ZTI	Zona de transição interfacial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Pergunta de pesquisa e objetivos	20
1.1.1. Pergunta de pesquisa	20
1.1.2. Objetivo Geral.....	20
1.1.3. Objetivos Específicos	20
1.2. Justificativa e relevância	21
1.3. Restrições e limitações da pesquisa.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. Características e cenários do uso de Resíduos de Construção e Demolição	24
2.2. Agregados Reciclados.....	27
2.3. Concreto de agregados reciclados.....	33
2.3.1. Propriedades do concreto produzido com AGR	34
2.4. Métodos de mistura para concretos de agregados reciclados	38
2.4.1. <i>Double Mixing Method</i>	38
2.4.2. <i>Two Stage Mixing Approach</i> (TSMA).....	40
2.4.3. TSMA_{p1}, TSMA_{p2}, TSMA_s e TSMA_{sc}	41
2.4.4. TSMA_{sfc}.....	45
2.4.5. <i>Triple Mixing Method</i> (TM).....	47
2.4.6. Efeitos da adição de materiais pozolânicos ao concreto de agregados reciclados.....	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1. Materiais.....	54
3.1.1. Cimento	54
3.1.2. Agregados miúdos e agregados graúdos.....	54
3.1.3. Aditivo superplastificante.....	54
3.1.4. Cinzas de casca de arroz.....	55
3.1.5. Água	55
3.2. Método de procedimentos.....	55
3.2.1. Variáveis de resposta e parâmetros de processo	55
3.2.2. Caracterização do cimento.....	56
3.2.3. Caracterização dos agregados graúdos naturais	57
3.2.4. Caracterização dos agregados graúdos reciclados.....	57

3.2.5. Caracterização dos agregados miúdos naturais.....	60
3.2.6. Caracterização da cinza de casca de arroz.....	60
3.2.7. Dosagem e preparação do concreto	61
3.2.8. Definição da condição de umidade dos AGR	62
3.2.9. Justificativa do método adotado para dosagem e preparo do concreto..	63
3.2.10. Misturas e traços finais de concreto	66
3.2.11. Caracterização do concreto obtido	70
3.2.12. Preparação das amostras para microscopia eletrônica de varredura (MEV)	71
3.2.13. Análise estatística dos resultados obtidos.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1. Cimento e cinzas de casca de arroz	75
4.1.1. Análise granulométrica.....	75
4.1.2. Área superficial e massa específica	75
4.2. Agregado gráúdo natural e agregado gráúdo reciclados.....	76
4.2.1. Granulometria.....	76
4.2.2. Massa específica, massa específica aparente, capacidade de absorção de água, massa unitária e volume de vazios	77
4.3. Agregado miúdo.....	78
4.3.1. Granulometria.....	78
4.3.2. Massa específica, massa unitária e volume de vazios	79
4.4. Concreto	79
4.4.1. Efeito da condição de secagem dos AGR na trabalhabilidade e resistência mecânica do concreto	79
4.4.2. Trabalhabilidade.....	82
4.4.3. Resistência à compressão axial	84
4.4.3.1. Comparação entre concretos com diferentes métodos de mistura	87
4.4.3.2. Comparação entre concretos com diferentes teores de AGR.....	92
4.4.3.3. Comparação entre concretos com diferentes teores de CCA.....	96
4.4.3.4. Comparação entre concretos ensaiados em diferentes idades.....	96
4.4.3.5. Comparação considerando método de mistura e teor de AGR	97
4.4.3.6. Comparações considerando método de mistura e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA)	98

4.4.3.7. Comparações considerando método de mistura e tempo de cura do concreto (Idade)	101
4.4.3.8. Comparações considerando teor de agregados reciclados e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA).....	102
4.4.3.9. Comparações considerando teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade).....	103
4.4.3.10. Comparações considerando teor de agregados reciclados (AGR) e tempo de cura do concreto (Idade).....	104
4.4.3.11. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados (AGR) e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA):.....	104
4.4.3.12. Comparações considerando método de mistura, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade):	106
4.4.3.13. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)	107
4.4.3.14. Comparações considerando teor de agregados reciclados, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)	108
4.4.4. Absorção de água por imersão.....	109
4.4.4.1. Comparação entre concretos com diferentes métodos de mistura: ...	112
4.4.4.2. Comparação entre concretos com diferentes teores de AGR:	114
4.4.4.3. Comparação entre concretos com diferentes idades:.....	115
4.4.4.4. Comparação entre concretos com diferentes teores de CCA:.....	116
4.4.4.5. Comparações considerando método de mistura e teor de agregados reciclados:	117
4.4.4.6. Comparações considerando método de mistura e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA)	118
4.4.4.7. Comparações considerando método de mistura e tempo de cura do concreto (Idade)	119
4.4.4.8. Comparações considerando teor de agregados reciclados e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA).....	120
4.4.4.9. Comparações considerando teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade).....	120
4.4.4.10. Comparações considerando teor de agregados reciclados e tempo de cura do concreto (idade)	121

4.4.4.11. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados (AGR) e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA).....	122
4.4.4.12. Comparações considerando método de mistura, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade).....	123
4.4.4.13. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)	124
4.4.4.14. Comparações considerando teor de agregados reciclados, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)	125
5. CONCLUSÕES.....	127
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
7. REFERÊNCIAS.....	132

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material compósito, composto basicamente por cimento, água, agregados miúdos e graúdos, é o segundo material mais consumido pela humanidade, ganhando destaque na indústria da construção por sua versatilidade, baixo custo de manutenção, resistência às intempéries, facilidade de alteração de propriedades e boa performance estrutural, sendo o mais utilizado dentro do setor (BEHERA *et al.*, 2014a; CSI, 2009; KISKU *et al.*, 2017).

Estimava-se um consumo mundial anual de concreto em torno de 20 bilhões de metros cúbicos até o ano de 2014, valor que tem aumentado substancialmente devido à urbanização. Uma consequência da crescente demanda pelo concreto é o aumento na extração dos recursos naturais, utilizados como matérias primas para sua fabricação (BEHERA *et al.*, 2014a; CAO *et al.*, 2017a).

Os agregados possuem um papel crucial no concreto, ocupando entre 60 e 75% de seu volume. Com o aumento na demanda por concreto, a produção mundial de agregados cresceu de 21 bilhões de toneladas em 2007 para 40 bilhões de toneladas em 2014, sendo este crescimento impulsionado principalmente por China e Índia (BEHERA *et al.*, 2014a; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

A crescente demanda por agregados e a diminuição de suas reservas naturais fazem com que sejam aumentados os custos desses materiais. Associada à crescente escassez de produtos naturais, existe a geração de resíduos de construção e demolição (RCD), fruto do crescente desenvolvimento. Os RCD constituem a maior parte dos resíduos sólidos em diversos países, sendo gerados durante a demolição de antigas construções e durante a construção de novas estruturas. O processo de descarte dos resíduos contribui para a diminuição do tempo de vida de aterros, utilizando cada vez mais terras que poderiam estar voltadas a atividades produtivas como locais de descarte de materiais (BEHERA *et al.*, 2014a; CCANZ, 2011).

A escassez de terrenos para aterros e a alta demanda mundial por agregados naturais têm contribuído para aumentar a relevância do uso de resíduos de construção e demolição na construção civil. A atual tendência em diversas economias é considerar os RCD como um recurso em potencial para diversos propósitos, especialmente aqueles associados à sua reciclagem. É possível reciclá-los e utilizá-

los como agregados, apesar de influenciarem o comportamento do concreto de maneira negativa. (MARZOUK; AZAB, 2014; MCNEIL; KANG, 2013; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Aponta-se uma queda de até 30% na resistência à compressão do concreto produzido com 100% de agregados graúdos reciclados, comparado a um concreto produzido com 100% de agregados naturais, com o mesmo traço (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; RAHAL, 2007).

Frente ao problema de geração e disposição de resíduos de construção e demolição e ao potencial para uso do material, demonstra-se a necessidade de aprofundamento do estudo sobre o mesmo, buscando possibilitar seu uso em diferentes aplicações da construção civil e mitigar os impactos relacionados aos resíduos. A porção graúda dos RCD utilizada como agregados em concretos tem o nome de agregados graúdos reciclados (AGR) (MARZOUK; AZAB, 2014; MCNEIL; KANG, 2013; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Os AGR, quando comparados aos agregados naturais, possuem pior qualidade. O fato se dá, especialmente, devido à camada de argamassa aderida aos agregados reciclados e à fraca zona de transição interfacial (ZTI) entre agregado original e camada de argamassa (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002; BUTLER; WEST; TIGHE, 2011; LIANG *et al.*, 2016; MCNEIL; KANG, 2013; QI *et al.*, 2018; RAO A, 2005; SHI *et al.*, 2016; TOPÇU; GÜNÇAN, 1995; TOPÇU; ŞENGEL, 2004).

Métodos para melhorias das propriedades dos agregados reciclados tem sido desenvolvidos, consistindo em remover a argamassa aderida ao agregado original ou modifica-la, aprimorando suas propriedades (AL-BAYATI *et al.*, 2016; BEHERA *et al.*, 2014a). O uso de materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento e de métodos de mistura modificados são tratamentos de baixo custo associado e que possibilitam ao concreto produzido com agregados reciclados atingir resistência mecânica e durabilidade equiparáveis às de concretos produzidos com agregados naturais (ABD ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012; KONG *et al.*, 2010a; LI; XIAO; ZHOU, 2009a; TAM; GAO; TAM, 2005a, 2006a; TAM; TAM, 2008a; ZHANG *et al.*, 2019a).

Entre os tratamentos envolvendo métodos de mistura de concretos de agregados reciclados e adições pozolânicas, aqueles onde os AGR são encapsulados pelas adições durante a mistura contribuem para maiores ganhos às propriedades

mecânicas e à microestrutura do concreto. O uso de sílica ativa, cinzas volantes e escória de alto forno no concreto de agregados reciclados, junto a métodos de mistura modificados tem sido abordado por diferentes pesquisadores (KONG *et al.*, 2010a; LI; XIAO; ZHOU, 2009a; TAM; TAM, 2008a; ZHANG *et al.*, 2019a). Ainda são poucos os estudos avaliando o uso de cinzas de casca de arroz em substituição ao cimento em concretos de agregados reciclados (PADHI *et al.*, 2018). Não foram encontrados, durante a revisão bibliográfica desta pesquisa, estudos abordando a influência de diferentes métodos de mistura de concreto associados à adição de CCA.

A presente dissertação trata do uso de resíduos de construção e demolição da Classe A, segundo classificação do CONAMA, utilizados como agregados graúdos na fabricação de novos concretos. Frente à escassez de pesquisas relacionadas a adições de cinzas de casca de arroz utilizadas junto a métodos de mistura modificados, a pesquisa aborda o estudo da resistência à compressão, trabalhabilidade, durabilidade e microestrutura de concretos de agregados reciclados, produzidos com diferentes níveis de adição de cinzas de casca de arroz e diferentes métodos de mistura.

1.1. Pergunta de pesquisa e objetivos

1.1.1. Pergunta de pesquisa

Quais os efeitos e alterações na resistência à compressão, trabalhabilidade, capacidade de absorção de água e microestrutura de concretos com agregados graúdos reciclados, adições de cinzas de casca de arroz e diferentes métodos de mistura?

1.1.2. Objetivo Geral

Mensurar e avaliar, por meio de comparações, a resistência à compressão, trabalhabilidade, capacidade de absorção de água e microestrutura de concretos, produzidos com uso do método de mistura em três etapas (*Triple Mixing Method*) e com uso do método de mistura em duas etapas (*Two Stage Mixing Approach*), com variadas concentrações de agregados graúdos reciclados e de adições de cinzas de casca de arroz.

1.1.3. Objetivos Específicos

A presente pesquisa tem por objetivos específicos:

- Mensurar os efeitos à resistência à compressão, trabalhabilidade e capacidade de absorção de água, decorrentes dos métodos de mistura utilizados, do uso de adições de cinzas de casca de arroz e da idade dos ensaios em concretos de agregados graúdos reciclados e agregados graúdos naturais.
- Avaliar, por meio de análise estatística, a interação e os efeitos isolados do uso de métodos de mistura em duas e três etapas, do teor de adição de agregados reciclados, teor de adição de cinzas de casca de arroz e da idade de execução dos ensaios na resistência à compressão e capacidade de absorção de água.
- Analisar e descrever as alterações à microestrutura das misturas de concreto, decorrentes da adição de cinzas de casca de arroz, adição de agregados graúdos reciclados, métodos de mistura utilizados.

1.2. Justificativa e relevância

Os últimos cem anos têm demonstrado um massivo crescimento populacional junto a um rápido advento da industrialização e urbanização em países em desenvolvimento. Diante de tal cenário, a pressão sobre os recursos naturais tem aumentado exponencialmente. O cenário leva, conseqüentemente, a um aumento na geração dos resíduos de construção e demolição (RCD) (KISKU *et al.*, 2017; XIE; GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018).

A maior parte dos resíduos sólidos produzidos no mundo é composta por RCD e destinada a aterros ou disposta ilegalmente, levando à escassez de áreas de aterros e, conseqüentemente, ao aumento dos custos de descarte. A gestão destes detritos tem se tornado uma importante questão relacionada à sustentabilidade, especialmente em economias desenvolvidas, podendo ajudar a conservar recursos naturais e reduzir o consumo de energia (BEHERA *et al.*, 2014a; SHAHIDAN *et al.*, 2017).

Uma possível solução ao problema de disposição dos RCD em aterros é a reciclagem de tais materiais, por meio de britagem, peneiramento e remoção de contaminantes, produzindo agregados alternativos a serem utilizados na produção de concretos (WAGIH *et al.*, 2013). Estudos conduzidos por pesquisadores estrangeiros apontam a possibilidade do uso de RCD em concretos com funções estruturais. Em países como Austrália, Alemanha, China, Japão, Espanha e Coreia do Sul, o uso dos materiais para tal função é regularizado por normas específicas. A aceitação dos RCD em concretos estruturais é dificultada pela alta heterogeneidade dos resíduos, geralmente adotando-se como critério para uso dos RCD o seu índice máximo de absorção de água, a constituição dos agregados e sua densidade. (ANGULO; MUELLER, 2009; BOSTANCI; LIMBACHIYA; KEW, 2016; KONG *et al.*, 2010a; LIMBACHIYA; LEELAWAT; DHIR, 2000; MCNEIL; KANG, 2013). A realidade brasileira difere do que já é executado no exterior. A norma brasileira, NBR 15116 (ABNT, 2004) que trata do uso de resíduos sólidos da construção civil em aplicações do setor, permite a utilização de agregados reciclados apenas em camadas de pavimentação e em concretos sem função estrutural. Segundo a norma, a viabilização da tecnologia para utilização dos agregados reciclados na confecção de concretos com função estrutural depende de mais estudos (ABNT, 2004).

A presente pesquisa é justificada frente o cenário apresentado. Serão abordadas variações no método de mistura de concretos e utilizadas adições de cinzas de casca de arroz, buscando aprimorar a performance do concreto produzido com agregados reciclados e aumentar o conhecimento atual acerca do tema, contribuindo para a futura regularização do uso de RCD em concretos estruturais no Brasil.

1.3. Restrições e limitações da pesquisa

A presente pesquisa limita-se:

- a concretos de agregados reciclados produzidos com agregados graúdos oriundos de resíduos de construção e demolição, com granulometria próxima à da brita nº 1;
- à composição e umidade dos resíduos de construção e demolição utilizados, não sendo os resultados obtidos aplicáveis para RCD de

composição muito distinta à dos utilizados nesta pesquisa, que varia conforme local de obtenção, lote e data de retirada dos agregados;

- a concretos preparados segundo os métodos de mistura utilizados na presente pesquisa;
- a concretos preparados com o mesmo tipo de adição utilizada durante esta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Características e cenários do uso de Resíduos de Construção e Demolição

Resíduos de construção e demolição podem ser provenientes de: estruturas demolidas de concreto, concreto rejeitado durante sua produção, pavimentos quebrados, tijolos demolidos de edifícios, entre outros (MALEŠEV *et al.*, 2010). Os RCD podem conter, entre outras substâncias: concreto, tijolos, cerâmicas, madeira, vidro, plástico, materiais betuminosos, metais, solos e gesso. Sua produção ocorre durante as etapas de construção e de renovação de um empreendimento, podendo ser resultantes de material empregado em excesso ou danificado e de resíduos dos processos de construção e de demolição (TAM *et al.*, 2018).

A resolução 307 do CONAMA classifica os resíduos da construção civil em quatro classes, sendo elas:

- Classe A: resíduos recicláveis, ou reutilizáveis com função de agregados, tais como RCD provenientes de obras de infraestrutura, edificações e do processo de fabricação e demolição de pré-moldados. Abrange materiais como argamassa, concreto, blocos cerâmicos, meios fios e outros.
- Classe B: resíduos recicláveis para demais destinações, como plásticos, papel, metal, papelão, madeiras, gesso.
- Classe C: resíduos cujo processo reciclagem ainda não é viável técnica ou economicamente.
- Classe D: resíduos perigosos provenientes do processo de construção, como tintas, solventes, óleos.

Em sua maior parte, os RCD são recuperáveis, podendo ser reciclados, gerando ganhos econômicos e ambientais (RANDELL *et al.*, 2014). Sua reciclagem é tomada como alternativa para diminuição dos resíduos despejados em aterros e uma proposta sustentável para sua destinação, podendo diminuir a pressão sobre os recursos naturais e o volume de resíduos que necessitam de disposição final (SCHNEIDER; PHILIPPI JR, 2004).

A reciclagem de RCD foi primeiramente empregada após a Segunda Guerra Mundial, na Alemanha. Era necessário cumprir com uma elevada demanda por

materiais de construção e, ao mesmo tempo, remover os destroços das cidades destruídas pela guerra, cujo volume foi estimado entre 400 e 600 milhões de m³. Foram implantadas usinas de reciclagem de resíduos, que produziram agregados de tijolos triturados, removendo em torno de 85% de todos os destroços de construções alemãs (KHALAF *et al.*, 2004).

Nas demais economias desenvolvidas, as primeiras iniciativas de reciclagem e minimização de RCD começaram por volta de década de 80, especialmente na Austrália, Europa Ocidental e América do Norte (TAM *et al.*, 2018).

O Brasil ainda encontra-se longe de políticas abrangentes de reciclagem de resíduos, quando comparado a países europeus e outras nações mais desenvolvidas (JOHN *et al.*, 2000). Em 2011 a Alemanha apresentou uma taxa de reciclagem de RCD em torno de 91%. Os EUA, no mesmo ano, reciclaram 48% dos seus RCD, enquanto o Brasil, em 2014, apresentou um índice de reciclagem de resíduos de construção e demolição inferior a 5% (ABRECON, 2014; RANDELL; PICKIN; GRANT, 2014). A porcentagem de material recuperado pelo processo de reciclagem varia conforme as tradições construtivas de cada local e o nível de aceitação dos construtores à sua utilização. A Tabela 1 demonstra os índices de reciclagem de RCD de diferentes nações e a quantidade de resíduos gerados pelas mesmas.

Tabela 1 - Panorama global de produção e reciclagem de RCD.

(continua)

País	Quantidade anual de RCD gerados (milhões de toneladas)	Porcentagem do total de RCD reciclados (%)	Ano de referência dos dados
Austrália	19	55	2012
Áustria	35	87	2013
<u>Brasil</u>	<u>70</u>	<u>Inferior a 5%</u>	<u>2014</u>
Canadá	9	7	2015
China	1002	-	2012
Coréia do Sul	68	98	2011
Dinamarca	5,6	80	2012
Estônia	2	95	2013
França	247	45	2011
Índia	530	-	2012
Alemanha	201	Superior a 80%	2012
Japão	75	Superior a 90%	2011
Itália	40	75	2012

Holanda	25	75	2013
Noruega	1,84	7	2012
Reino Unido	200	70	2012
Suécia	8	50	2011
Estados Unidos	519	70	2012
(conclusão)			

Fonte: Adaptado de Abrecon, (2014); Akhtar; Sarmah, (2018); Tam; Soomro; Evangelista, (2018).

A maior parte dos RCD no mundo consiste de resíduos de concreto. A título de exemplo: nos Estados Unidos, 67% do volume total de resíduos produzidos (350 milhões de toneladas) é originado do concreto. A reciclagem e o trabalho com tais produtos geraram à economia do país mais de 7 bilhões de dólares ao longo dos anos (AKHTAR; SARMAH, 2018).

Para que a reciclagem de RCD seja realizada de maneira impactante e massiva, o uso da fração mineral desses resíduos é essencial. Tal parte corresponde aos resíduos abrangidos pela Classe A da classificação do CONAMA. Segundo Gonçalves (2001), uma das possibilidades para o uso dos resíduos de construção e demolição, em especial os resíduos de concreto, é utiliza-los como agregados reciclados (AR) na produção de novos concretos. Ao concreto produzido com tais materiais, é dado o nome de concreto de agregados reciclados (CAR).

A aceitação dos agregados reciclados é dificultada devido à falta de confiança associada à atividade de reciclagem, à incerteza da qualidade dos agregados e à falta de normas adequadas, fatores desfavoráveis para a disseminação do uso de tais materiais em aplicações da construção civil (AKHTAR; SARMAH, 2018; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Os obstáculos para implementação do uso de agregados reciclados podem ser superados por meio de um engajamento proativo dos agentes de construção e demolição, apresentando o material como uma alternativa viável. O envolvimento de todos os participantes da cadeia produtiva, controle de qualidade de materiais e uso de métodos como demolição seletiva são essenciais para que se alcance a sustentabilidade de maneira mais efetiva (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017).

A composição dos RCD deve ser analisada durante as atividades de construção e demolição, com intuito de minimizar contaminações e aumentar o valor final do material reciclado. A avaliação dos componentes dos RCD também deve ser

realizada no momento da entrega do material à usina de reciclagem, de modo a determinar os procedimentos mais eficientes, que maximizem a qualidade do produto gerado ao fim do processo. Um controle de qualidade eficiente e a certificação de fornecedores de resíduos de construção e demolição são fatores essenciais para instigar e manter a confiança dos agentes de mercado nesses materiais (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017).

2.2. Agregados Reciclados

Segundo a resolução 307 do CONAMA, agregado reciclado constitui o material que advém do beneficiamento de resíduos de construção e que apresenta características técnicas para ser aplicado em obras de fins diversos, tais como obras de edificação e infraestrutura. (BRASIL, 2002).

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004), os resíduos classificados como reutilizáveis ou recicláveis (Classe A) são categorizados, após beneficiamento, em:

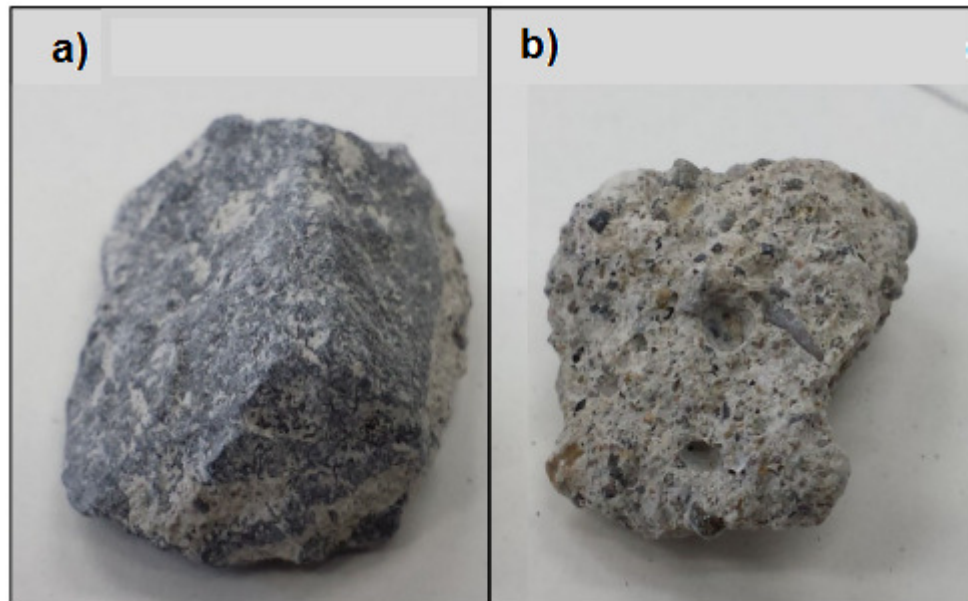
- agregados de resíduos de concreto (ARC): compostos em pelo menos 90% por fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- agregados de resíduo misto (ARM): cujos fragmentos de cimento Portland e rocha constituem uma fração inferior a 90% da composição do agregado.

A fração graúda dos agregados, englobando ARC e ARM, é denominada agregado graúdo reciclado (AGR). Os fragmentos de cimento e rocha que compõem os ARC e ARM são constituídos, em 65 a 70% de seu volume, por agregados graúdos naturais (AGN) e, em 30 a 35% por uma camada de argamassa de cimento, encapsulando os agregados naturais (LEITE *et al.*, 2011).

Os AGR são, de maneira geral, mal graduados, porosos e irregulares, o que se dá devido à má distribuição do tamanho de suas partículas. Sua resistência ao esmagamento, ao impacto e à abrasão e sua densidade são inferiores às dos agregados naturais. Os AGR possuem também maiores teores de absorção de água e porosidade, fatores que prejudicam o desempenho do concreto produzido com uso de tais materiais (AL-BAYATI *et al.*, 2016; LIMBACHIYA; LEELAWAT; DHIR, 2000; LÓPEZ-GAYARRE *et al.*, 2009; MCNEIL; KANG, 2013; SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001).

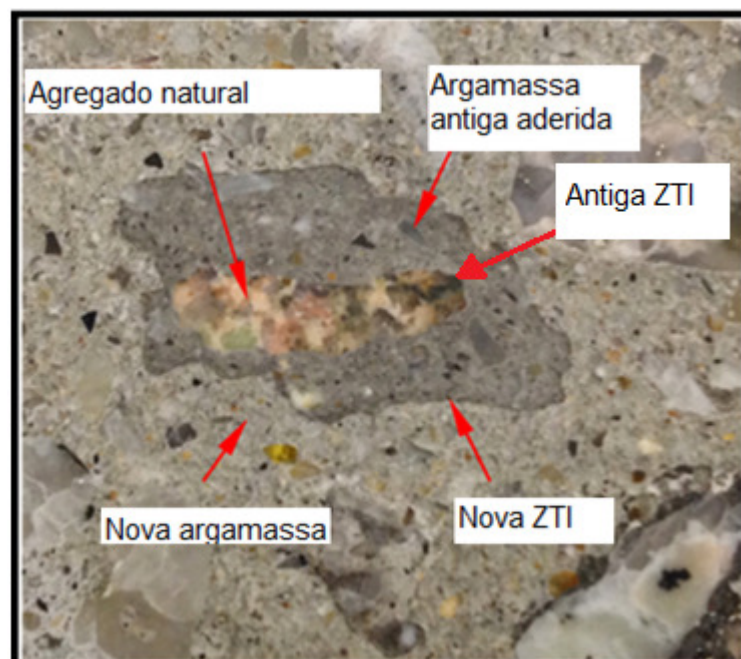
As características dos AGR que ganham maior destaque, quando comparados aos agregados naturais são: a camada de argamassa aderida aos AGR e a zona de transição interfacial (ZTI) entre o agregado original e a camada antiga de argamassa de cimento aderida, que constituem o agregado reciclado (SHI *et al.*, 2016), mostradas na Figura 1 e Figura 2.

Figura 1 - Agregado gráúdo natural (a) e agregado gráúdo reciclado (b).



Fonte: Choi *et al.*, (2016)

Figura 2 – Foto de agregado reciclado com ZTI e camada de argamassa antiga aderida.

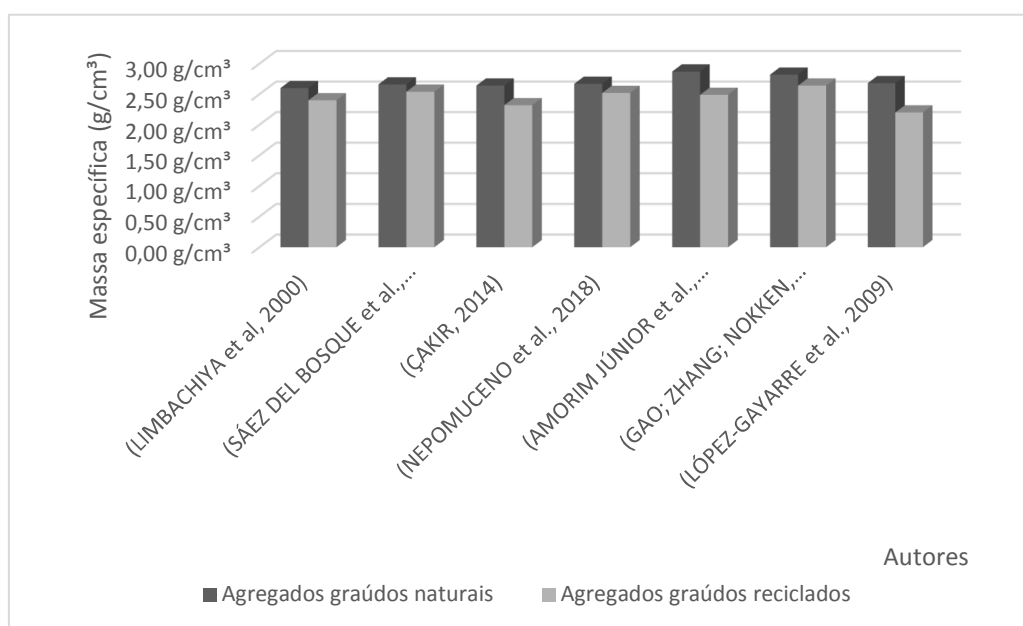


Fonte: Adaptado de Zhan; Xuan; Poon, (2018).

A ZTI antiga, entre agregado original e a velha pasta de cimento, é um dos fatores que prejudicam a resistência mecânica do concreto de agregados reciclados (LI *et al.*, 2012). A presença de argamassa antiga faz com que essa zona possua diversos pequenos poros e fissuras contínuas (KOU; POON, 2012; OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002), constituindo uma zona fraca em um concreto de agregados reciclados (ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006).

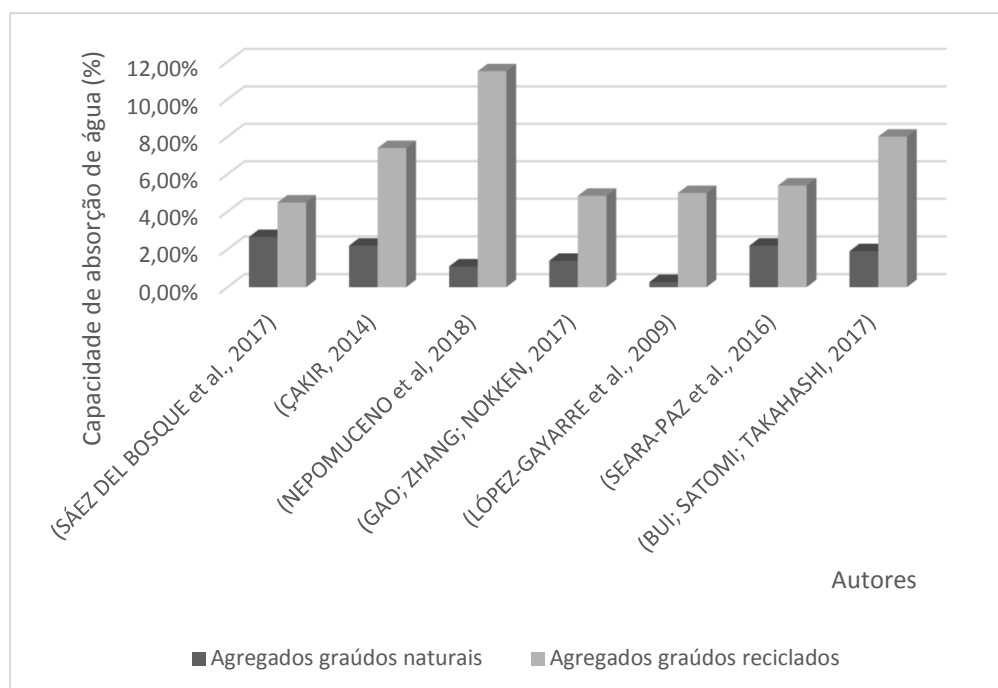
A camada de argamassa aderida aos agregados reciclados ocupa de 30 a 35% de seu volume, contribuindo para que sejam mais porosos, tenham menor massa específica e possuam maior taxa de absorção de água, quando comparados aos agregados naturais (MCNEIL; KANG, 2013; POON; SHUI; LAM, 2004). Uma comparação quantitativa entre AGR e AGN utilizados em diversas pesquisas, em relação à massa específica, porosidade e capacidade de absorção de água, é mostrada pela Figura 3, Figura 4 e Figura 5:

Figura 3 - Massa específica de agregados graúdos naturais e agregados graúdos reciclados.



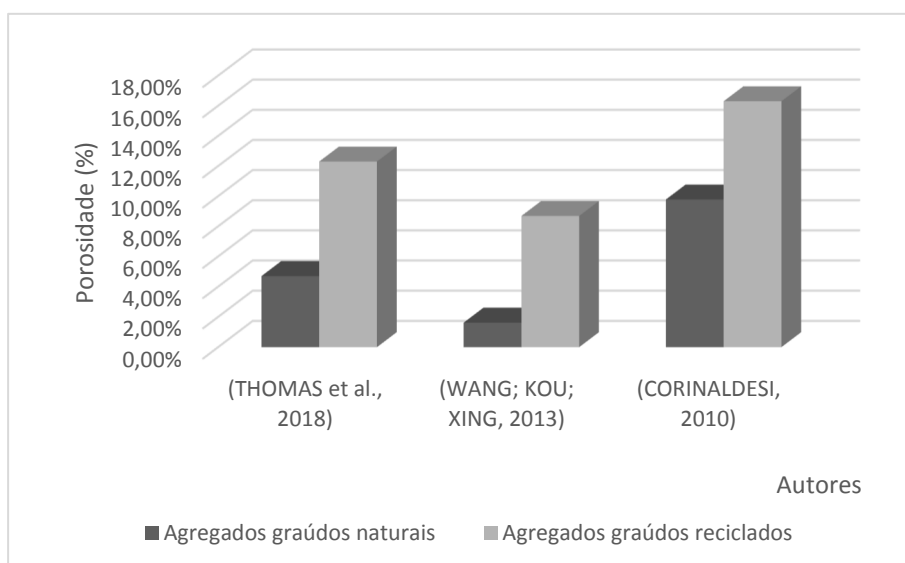
Fonte: Adaptado de: Çakir, (2014); Cao *et al.*, (2017b); Limbachiya; Leelawat; Dhir, (2000); López-Gayarre *et al.*, (2009); Nepomuceno; Isidoro; Catarino, (2018); Sáez Del Bosque *et al.*, (2017a).

Figura 4 - Capacidade de absorção de água de agregados graúdos naturais e agregados graúdos reciclados.



Fonte: Adaptado de: Bui; Satomi; Takahashi, (2017); Çakir, 2014; Cao *et al.*, (2017b); López-Gayarre *et al.*, (2009); Nepomuceno; Isidoro; Catarino, (2018); Sáez Del Bosque *et al.*, (2017b); Seara-Paz *et al.*, (2016).

Figura 5 - Porosidade de agregados graúdos naturais e agregados graúdos reciclados.



Fonte: Adaptado de: Corinaldesi, (2010); Thomas *et al.*, (2018); Wang *et al.*, (2013).

Pesquisadores desenvolveram métodos para melhorias das propriedades dos agregados reciclados, os quais podem ser divididos em duas categorias: há os processos que consistem em remover a argamassa aderida ao componente e aqueles baseados em modificar e melhorar as propriedades da camada antiga de argamassa aderida ao agregado (AL-BAYATI *et al.*, 2016; BEHERA *et al.*, 2014a).

As técnicas de remoção de argamassa envolvem dissolução do agregado em ácido nítrico, métodos de gelo-degelo, expansão térmica, aquecimento por microondas e remoção mecânica da argamassa (AKBARNEZHAD *et al.*, 2011; DE JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; MOVASSAGHI, 2006; TAM; TAM; LE, 2007).

No processo de remoção mecânica da antiga camada de argamassa, os AGR são colocados em um moinho de bolas. O ônus do método é a possibilidade de danificar os agregados, causando a ocorrência de microfissuras (SHI *et al.*, 2016).

Butler *et al.* (2011) avaliaram a eficácia de alguns dos métodos de remoção da camada de argamassa dos AGR. Os autores compararam os resultados obtidos por métodos de gelo-degelo, dissolução com uso de ácido nítrico e expansão térmica. O terceiro método listado provou-se ser o mais eficiente, entre os avaliados, chegando a remover próximo de 100% da argamassa aderida. O método de gelo-degelo apresentou o segundo melhor desempenho entre os métodos avaliados, chegando a remover entre 80 a 90% da camada de argamassa aderida. Apesar de os métodos de remoção influenciarem o comportamento dos AGR de maneira positiva, sua implementação é limitada pelo aumento acarretado ao custo de produção do concreto (SHI *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2019a).

As técnicas desenvolvidas para melhora da qualidade da camada de argamassa aderida dos AGR podem envolver o uso de nanomateriais, imersão dos agregados em água, carbonatação do material, uso de emulsões poliméricas e imersão dos agregados em soluções pozolânicas (antes ou durante o processo de mistura) (AL-BAYATI *et al.*, 2016).

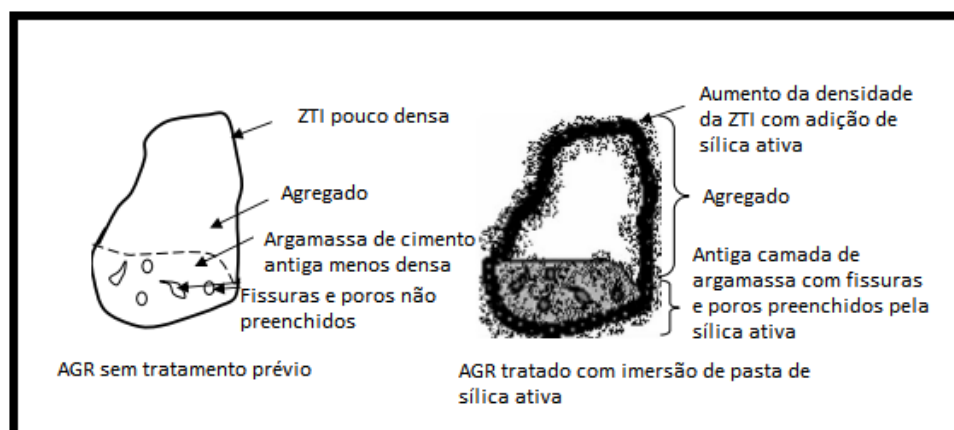
O uso de nanomateriais, tal como nanotubos de carbono, é desencorajado pelo alto custo associado aos componentes e à sua dispersão, o que pode onerar o processo de produção de concretos de agregados reciclados (ZHANG *et al.*, 2019a).

A imersão de agregados reciclados em emulsões poliméricas foi abordada por Kou e Poon, (2010). Após impregnação dos AGR com álcool polivinílico (PVA), foi observada diminuição na capacidade de absorção de água dos mesmos, o que constitui um aspecto positivo. O tratamento dos AGR com uso de polímeros, de maneira geral, melhora a trabalhabilidade dos concretos de agregados reciclados, embora a melhoria não seja observada na resistência à compressão do concreto. Os polímeros podem permear a pasta de cimento do agregado, fazendo com que o material se torne hidrofóbico e a aderência entre agregado e nova pasta de cimento seja enfraquecida, enfraquecendo o concreto produzido (KOU; POON, 2010).

O tratamento de agregados reciclados por carbonatação ocorre por meio da introdução do CO_2 nos poros da argamassa aderida dos AGR, reagindo com o hidróxido de cálcio e o C-S-H e formando carbonato de cálcio (CaCO_3) (CASTELLOTE *et al.*, 2009). Xuan, Zhan e Poon, (2016) realizaram o tratamento de agregados reciclados de concreto com uso da carbonatação, buscando melhorar suas propriedades. Os autores colocaram os agregados em uma câmara de carbonatação, com concentração de 100% de CO_2 . Foi verificada uma diminuição de até 16,7% na capacidade de absorção de água dos agregados carbonatados.

O uso de materiais pozolânicos pode mitigar o efeito negativo dos AGR nas propriedades do concreto. A imersão de agregados reciclados em pastas de materiais pozolânicos, em especial sílica ativa, preenche os poros e vazios na camada de argamassa aderida, reagindo com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) para formar o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aumentando a densidade da ZTI, como ilustrado pela Figura 6. A estrutura da antiga camada de argamassa aderida é fortalecida, assim como a ZTI entre agregado reciclado e nova pasta de cimento, proporcionando maiores valores de resistência mecânica e durabilidade ao concreto produzido com agregados tratados de tal maneira (KATZ, 2004).

Figura 6 - Esquema de estrutura do agregado gráúdo reciclado com e sem tratamento em sílica ativa.



Fonte: Adaptado de Tam e Tam, (2008).

A eficiência do encapsulamento dos AGR com adições é baseada, principalmente, no tamanho das partículas utilizadas, no conteúdo de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na camada de argamassa aderida, na alcalinidade da solução dos poros e na reatividade do material pozzolânico utilizado (SHI *et al.*, 2016).

Estudos indicam que, com uso de adições pozzolânicas (sílica ativa, escória de alto forno, cinzas volantes) e com métodos de mistura alternativos, o concreto produzido com agregados reciclados pode atingir valores de resistência mecânica desejáveis e até em patamares comparáveis aos valores de concretos produzidos com uso de agregados naturais (ABD ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012; KONG *et al.*, 2010a; LI; XIAO; ZHOU, 2009a; TAM; GAO; TAM, 2005a, 2006b; TAM; TAM, 2008a).

Comparados aos outros métodos de tratamentos de agregados reciclados apresentados nesta seção, os métodos de adições pozzolânicas e de misturas alternativas de concreto possuem baixo custo associado e não acarretam ônus aos agregados ou ao concreto (ZHANG *et al.*, 2019a).

2.3. Concreto de agregados reciclados

Os ganhos ambientais decorrentes do uso de concretos de agregados reciclados vão além da reutilização de resíduos e diminuição da pressão sobre recursos naturais. O concreto de agregados reciclados apresenta menor quantidade de CO_2 incorporado à sua confecção, comparado ao concreto de agregados naturais,

podendo apresentar um índice de redução de 37,7% de CO₂ incorporado (LIU *et al.*, 2018).

Apesar de possuírem qualidade inferior aos agregados naturais e terem influência negativa no concreto em que são utilizados, os agregados reciclados já podem ser utilizados no concreto com finalidade estrutural em alguns países. As características desse tipo de material são bastante variadas conforme sua origem, o que faz com que exista espaço para maiores pesquisas (MCNEIL; KANG, 2013).

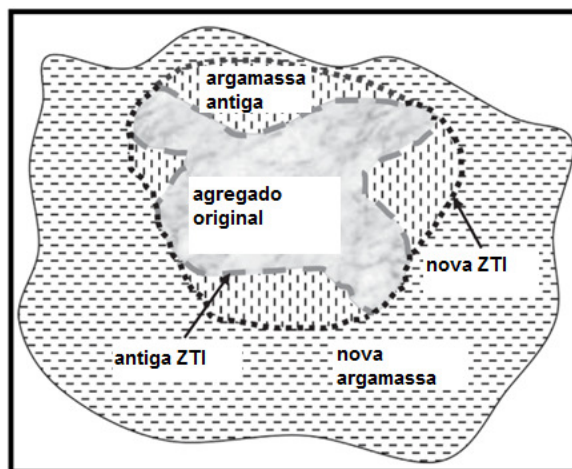
Diversos estudos foram realizados buscando avaliar as propriedades dos concretos feitos com agregados reciclados. Seu uso, em algumas nações, tem se mostrado viável econômica e tecnicamente, tanto para aplicações não estruturais quanto para aplicações estruturais (BEHERA *et al.*, 2014a). Em países como Alemanha, Suíça e Austrália, já acontece a comercialização do concreto com agregados reciclados (CSI, 2009). No Brasil, o uso de agregados oriundos de RCD em concretos com função estrutural ainda não é regulamentado.

2.3.1. Propriedades do concreto produzido com AGR

A utilização dos agregados reciclados no concreto pode afetar negativamente as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto, quando comparados aos agregados naturais (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002; BUTLER; WEST; TIGHE, 2011; LIANG *et al.*, 2016; MCNEIL; KANG, 2013; QI *et al.*, 2018; RAO A, 2005; TOPÇU; GÜNÇAN, 1995; TOPÇU; ŞENGEL, 2004).

A microestrutura do concreto de agregados reciclados é mais complexa que a do concreto convencional, em especial em relação à zona de transição interfacial, esquematizada pela Figura 7 (TAM; GAO; TAM, 2005a). A estrutura consiste de três fases, sendo elas a argamassa, os agregados e suas duas zonas de transição interfaciais (BEHERA *et al.*, 2014a), uma delas entre a nova matriz e agregado reciclado e a outra entre agregado reciclado e a argamassa antiga a ele aderida (TAM; GAO; TAM, 2005a).

Figura 7 - Esquema das duas zonas de transição interfacial em um concreto de agregados reciclados.



Fonte: Kisku *et al.*, (2017).

Quando agregados com diferentes propriedades, tais como porosidade, são usados na preparação de concretos, a microestrutura da interface entre cimento e agregado é diferente para cada tipo de agregado (POON; SHUI; LAM, 2004).

A piora ocasionada às propriedades mecânicas do concreto, decorrente da substituição dos agregados naturais pelos reciclados, ocorre principalmente devido à fraca zona de transição interfacial entre agregado reciclado e argamassa residual aderida. Devido à presença de poros e fissuras, a ZTI torna-se o fator limitante da resistência à compressão no concreto de agregados reciclados (BUTLER; WEST; TIGHE, 2013; KOU; POON, 2012; MCNEIL; KANG, 2013; OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002). A ZTI possui, geralmente, entre 10 μm e 50 μm de largura (POON; SHUI; LAM, 2004).

O fato é menos presenciado em concretos com elevados fatores água/cimento, onde a nova zona de transição interfacial, entre nova pasta de cimento e AGR, tende a ser mais fraca que a antiga, devido à alta concentração de água (OTSUKI; MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003).

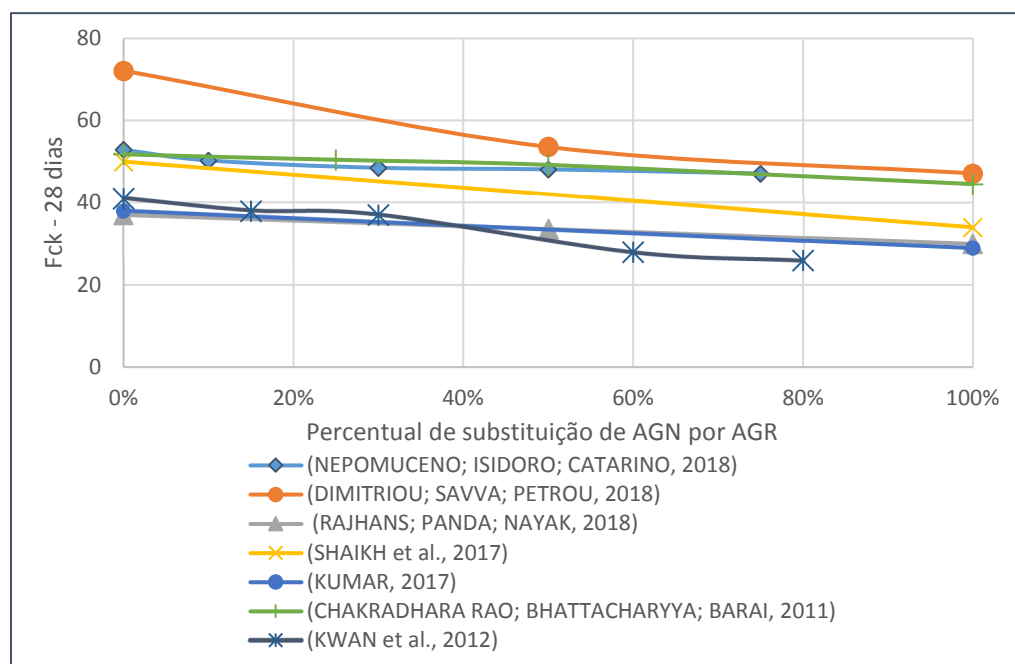
Os poros e fissuras presentes nos agregados reciclados contribuem também para aumento no consumo da água utilizada no preparo do concreto, levando a uma diminuição da água disponível para hidratação nas zonas de transição interfacial (TAM; GAO; TAM, 2005a).

A resistência à compressão do concreto de agregados reciclados depende, principalmente, de fatores como a qualidade do agregado utilizado, suas propriedades mecânicas, tipo de agregado utilizado, o teor de substituição de agregados naturais pelos reciclados, fator água/cimento do concreto e o teor de umidade desses agregados (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002; MALEŠEV; RADONJANIN; MARINKOVIĆ, 2010; POON; SHUI; LAM, 2004; SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001).

De maneira geral, o aumento da concentração dos AGR no concreto acarreta queda na resistência à compressão do concreto, como mostrado por dados de diferentes pesquisas, resumidos na Figura 8. Entretanto, a inclusão de agregados graúdos reciclados em níveis de substituição de até 25% não afeta, de maneira significativa, a resistência à compressão do concreto. (ABD ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012; BEHERA *et al.*, 2014a; KWAN *et al.*, 2012; LI, 2008; TABSH; ABDELFAH, 2009; TOPÇU; ŞENGEL, 2004).

Estudos indicam níveis de redução na resistência à compressão de 12 a 25% para concretos de agregados reciclados produzidos com 100% de AGR, quando comparados a concretos feitos inteiramente com agregados naturais (ABD ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012; CORINALDESI; MORICONI, 2009; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; LI, 2008; MATIAS *et al.*, 2013). Outras pesquisas apontam quedas de até 30% no referido comportamento para concretos com 100% de agregados reciclados (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; KEUN-HYEOK YANG AND ASHRAF F. ASHOUR, 2008; RAHAL, 2007).

Figura 8 - Variação da resistência à compressão (28 dias) do concreto de agregados reciclados, conforme teor de AGR.



Fonte: Adaptado de: Chakradhara Rao; Bhattacharyya; Barai, (2011); Dimitriou; Savva; Petrou, (2018); Kwan *et al.*, (2012); Nepomuceno; Isidoro; Catarino, (2018); Rajhans; Panda; Nayak, 2018; Shaikh, (2017).

O fator água/cimento a ser utilizado no CAR depende de diversos fatores como: capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, umidade dos agregados e quantidade de argamassa a eles aderida. É observado que a grande variedade de resultados nos testes com concreto de agregados reciclados pode ocorrer devido à variedade de fatores água/cimento empregados e à variabilidade da qualidade dos agregados utilizados (BEHERA *et al.*, 2014a).

É necessária adição de maiores quantidades de água para manter a trabalhabilidade no concreto de agregados reciclados. Butler, West e Tighe (2011) apontam que foi necessária adição de 9,4% de água ao concreto de AGR, em comparação ao concreto de agregados naturais, para atingir mesma trabalhabilidade. O fato é corroborado pelos estudos de Kou e Poon (2009); Malešev, Radonjanin e Marinković, 2010; Poon *et al.* (2004) e Chakradhara Rao, Bhattacharyya e Barai (2011). Kumar e Dhinakaran (2012) apontam que a quantidade de água necessária para manter a trabalhabilidade do concreto de agregados reciclados pode ser reduzida, por meio de adições de cinzas volantes e aditivos superplastificantes.

Com relação à mecânica da fratura, concretos produzidos com AGR são mais frágeis do que concretos de agregados naturais. A energia da fratura e resistência à propagação de fissuras do concreto de agregados reciclados diminui conforme há aumento do teor de substituição de AGN por AGR. Tal queda relaciona-se ao aumento da porosidade do concreto, decorrente do aumento do teor de agregados reciclados. As fissuras passam pelo agregado reciclado, enquanto em concretos de agregados naturais as fissuras correm pela pasta de cimento ao redor dos AGN (GHORBEL; WARDEH, 2017).

A retração de concretos de agregados reciclados aumenta consideravelmente para teores de substituição superiores a 50%, resultado da argamassa e pasta de cimento aderidas aos AGR (MALEŠEV; RADONJANIN; MARINKOVIĆ, 2010).

A aderência do concreto ao aço é outro parâmetro afetado pela adição de AGR. São verificados níveis de redução de 10% da aderência entre aço e concreto para concretos produzidos com 100% de agregados de concreto reciclado (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002; NAMARAK; TANGCHIRAPAT; JATURAPITAKKUL, 2018).

Butler, West e Tighe (2011) constataram a existência de uma relação entre a resistência mecânica do agregado graúdo reciclado e a resistência de aderência do concreto. Segundo os autores, quanto pior o desempenho mecânico do agregado utilizado, menor a aderência entre o aço e o concreto.

2.4. Métodos de mistura para concretos de agregados reciclados

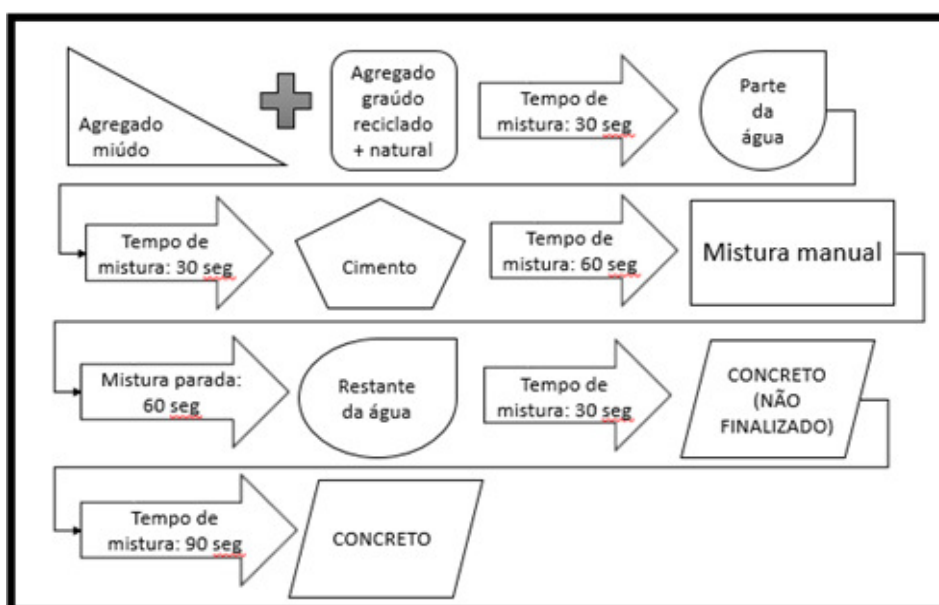
O uso de métodos de mistura diferenciados e de adições de materiais pozolânicos ao concreto de agregados reciclados são capazes de melhorar as características mecânicas e a microestrutura do concreto. Esta seção apresenta diferentes métodos de mistura de concretos de agregados reciclados, utilizando diferentes adições e os resultados obtidos pelo uso de tais técnicas

2.4.1. *Double Mixing Method*

Otsuki *et al.* (2003) examinaram a influência do emprego de agregados graúdos reciclados na zona de transição interfacial, resistência mecânica, resistência à penetração de cloretos e à carbonatação de concretos produzidos com uso de tais agregados. Após avaliação das propriedades relacionadas, foi proposto um método

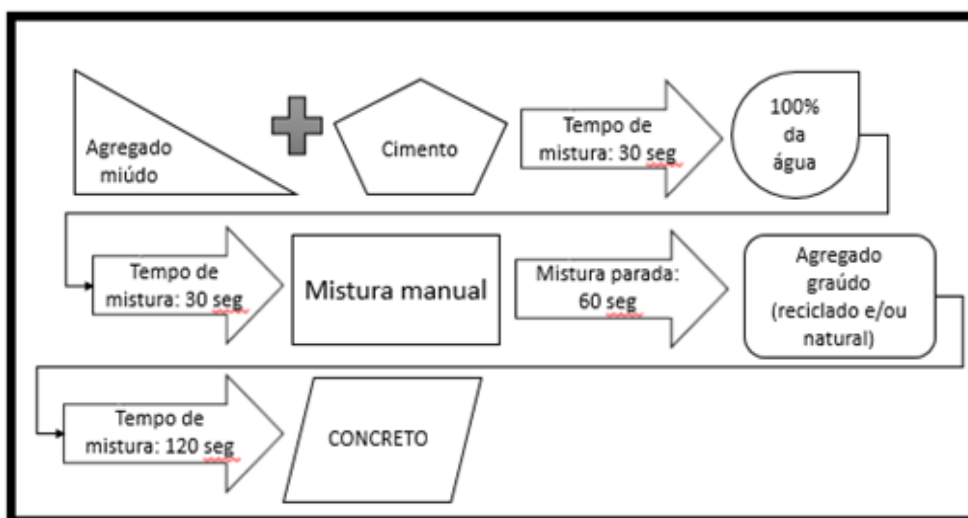
de mistura denominado *Double Mixing Approach*. Os autores buscaram aplicar o método a concretos de agregados reciclados, procurando obter melhorias em seu comportamento. Durante o estudo foram comparados concretos produzidos segundo o *Double Mixing Approach*, ilustrado pela Figura 9, e concretos produzidos segundo outro método de mistura, onde a água de mistura é adicionada de uma só vez, chamado de *Single Mixing Method* (Figura 10) (OTSUKI; MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003).

Figura 9 - Double Mixing Method.



Fonte: Adaptado de Otsuki *et al.* (2003).

Figura 10 - Single Mixing Method.



Fonte: Adaptado de Otsuki *et al.* (2003).

Foram observadas melhoras na zona de transição interfacial entre agregado reciclado e matriz de concreto, em decorrência do método de mistura em duas etapas (*Double Mixing Method*), que foram refletidas em melhoras no comportamento mecânico e na durabilidade do concreto de agregados reciclados, comparando-se ao concreto de agregados reciclados produzido pelo *Single Mixing Method*. A resistência à compressão aos 28 dias do concreto foi melhorada em até 12,9% em decorrência do método empregado (OTSUKI; MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003).

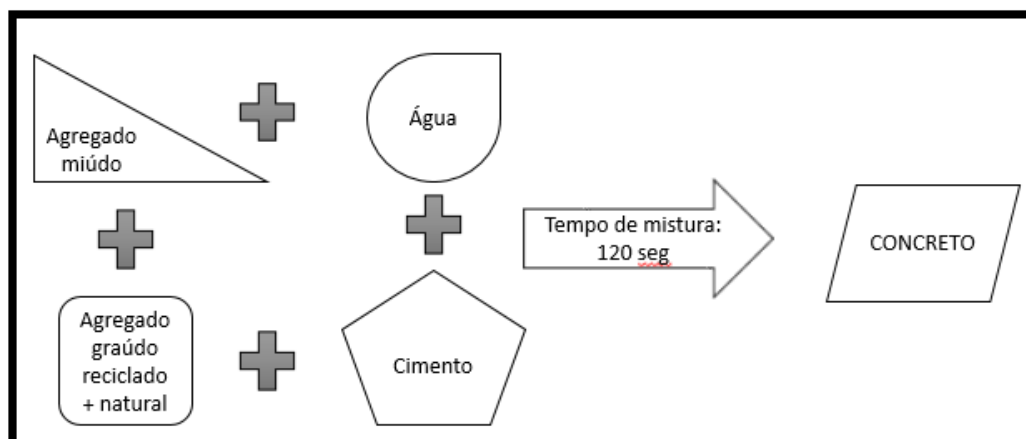
2.4.2. Two Stage Mixing Approach (TSMA)

O método foi inicialmente proposto por Tam *et al.* (2005), no intuito de compensar as falhas do agregado reciclado (alta porosidade, alta quantidade de fissuras), melhorando as características do concreto de agregados reciclados produzido. O processo consiste em adicionar água à mistura do concreto em duas etapas distintas, semelhante ao *Double Mixing Method*. A primeira metade de água da concretagem é utilizada na formação de uma fina camada de cimento e de agregados miúdos na superfície dos agregados graúdos, que acaba por permear os poros da superfície dos AGR, preenchendo antigos vazios e fissuras. O restante da água é adicionada em uma segunda etapa, para completar o processo de mistura do concreto (TAM; GAO; TAM, 2005a).

Os concretos produzidos por meio do método proposto (TSMA) e o método de mistura convencional, ou *normal mixing approach* (NMA), tiveram sua microestrutura e as propriedades mecânicas avaliadas. O TSMA e o processo de preparação de concreto convencional (NMA) são ilustrados pela Figura 11 e a Figura 12.

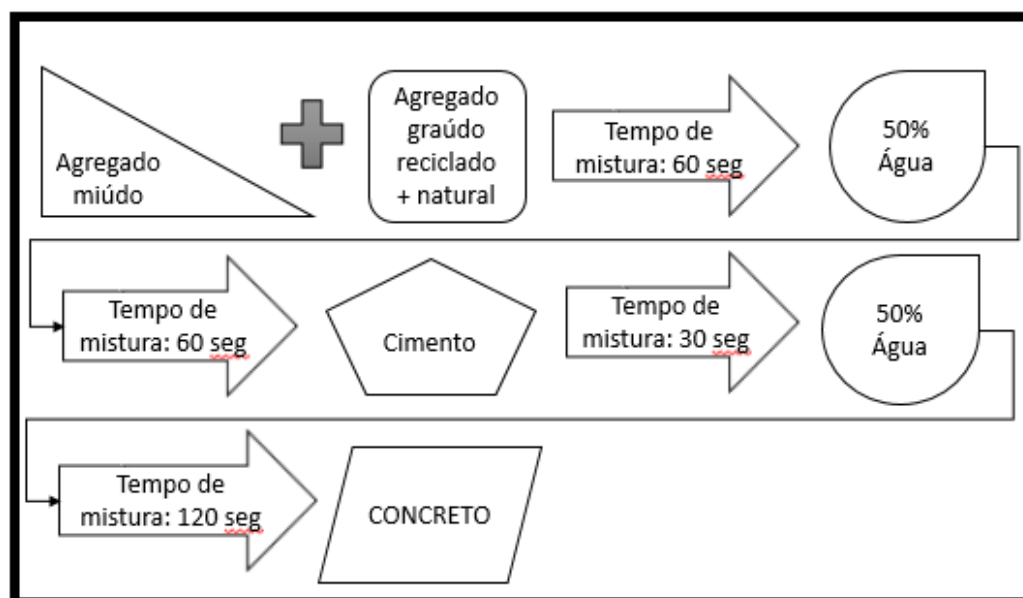
Foram executadas misturas com níveis de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados em níveis de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% (TAM; GAO; TAM, 2005a). Os concretos originados do TSMA, devido ao fortalecimento da zona de transição interfacial, obtiveram resistência à compressão aos 28 dias até 21,19% superior aos concretos de agregados reciclados produzidos pelo método convencional de mistura (TAM; GAO; TAM, 2005a).

Figura 11 - Método de mistura de concreto convencional (NMA).



Fonte: Adaptado de Tam; Gao; Tam, (2005).

Figura 12 - Two Stage Mixing Approach (TSMA).



Fonte: Adaptado de Tam; Gao; Tam, (2005).

Os experimentos indicaram aumento da densidade da zona de transição interfacial do concreto produzido pelo TSMA. Foi verificado que o método possibilita a entrada de partículas de cimento na ZTI, preenchendo rachaduras e poros do agregado reciclado (TAM; GAO; TAM, 2005a).

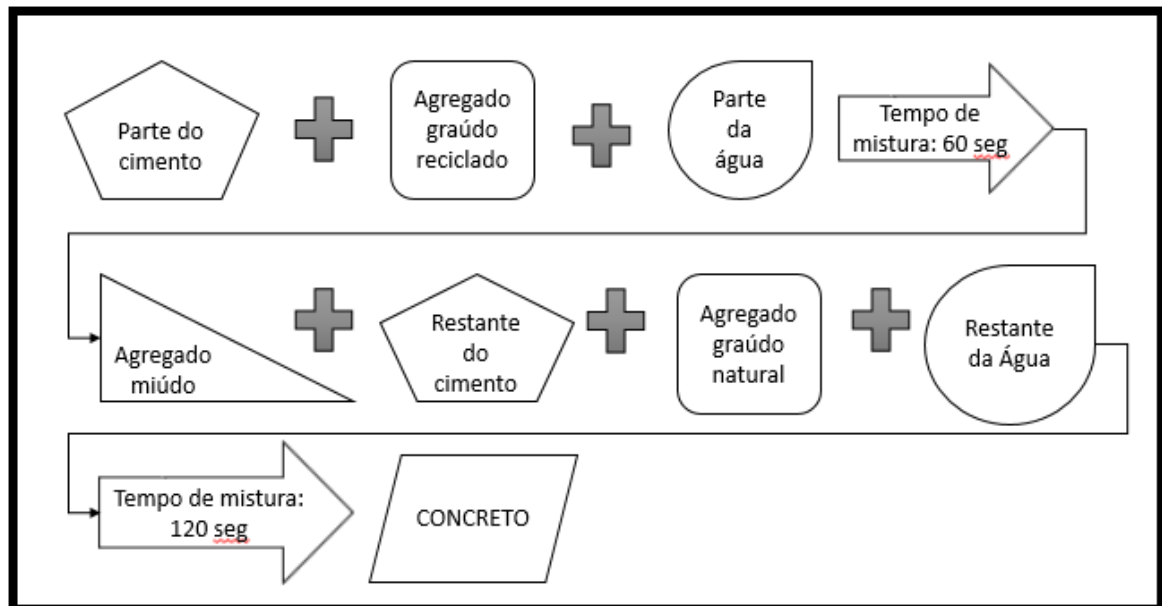
2.4.3. TSMA_{p1}, TSMA_{p2}, TSMA_s e TSMA_{sc}

Tam, Gao e Tam, (2006) e Tam e Tam, (2008) elaboraram quatro diferentes métodos de mistura em duas etapas, utilizando o mesmo traço de concreto que a pesquisa de Tam, Gao e Tam, (2005) e agregados reciclados da mesma origem. Para

todos os quatro métodos de mistura descritos foram produzidas misturas de concreto com teores de 5, 10, 15, 20, 30 e 35% de AGR. O fator água/cimento utilizado nos concretos foi de 0,45 (TAM; GAO; TAM, 2006b; TAM; TAM, 2008a).

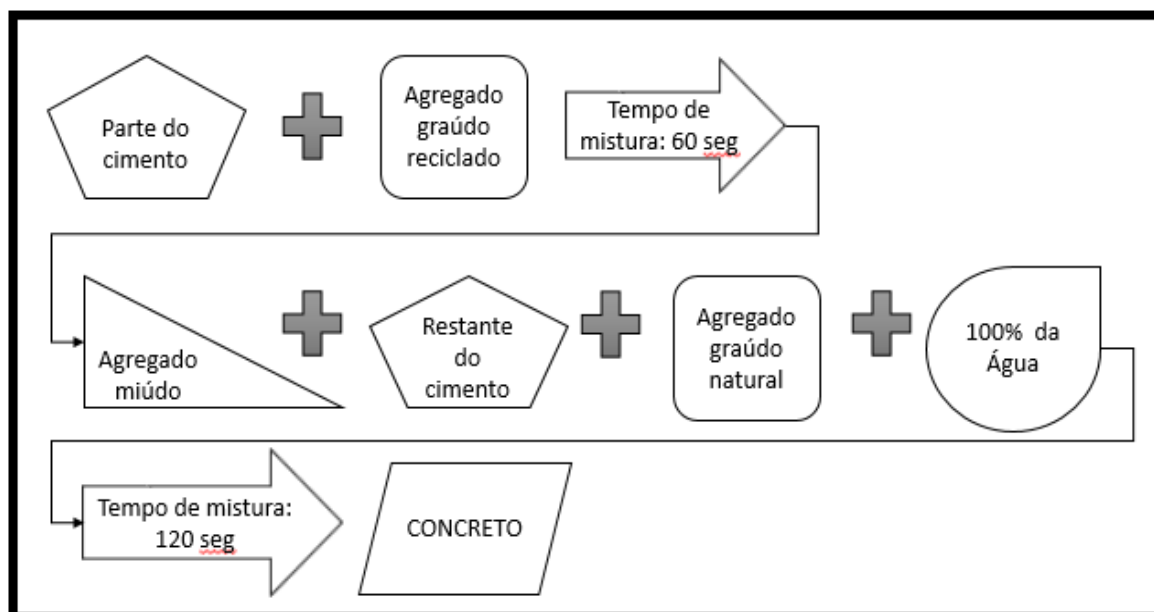
Os métodos de mistura estudados em 2006 são denominados TSMA_{p1} (proporcional 1) e TSMA_{p2} (proporcional 2) e os métodos de 2008 são denominados TSMA_s (sílica), e TSMA_{sc} (sílica e cimento). O TSMA_{p1} e o TSMA_{p2} propõem a adição de cimento e/ou água em diferentes proporções, conforme a porcentagem de agregados reciclados utilizados no concreto. Os esquemas da Figura 13 e Figura 14 ilustram o processo adotado. A diferença entre ambos os métodos propostos no estudo de 2006 e o método de mistura TSMA é o uso da camada de pasta de cimento para cobrir apenas a superfície dos AGR, ao contrário do TSMA, onde a pasta de cimento do primeiro processo de mistura é utilizada para cobrir tanto agregados miúdos naturais e AGN quanto agregados reciclados (TAM; GAO; TAM, 2006b; TAM; TAM, 2008a).

Figura 13 - Método de mistura TSMA_{p1}.



Fonte: Adaptado de Tam; Gao; Tam, (2006).

Figura 14 - Método de mistura TSMA_{p2}.

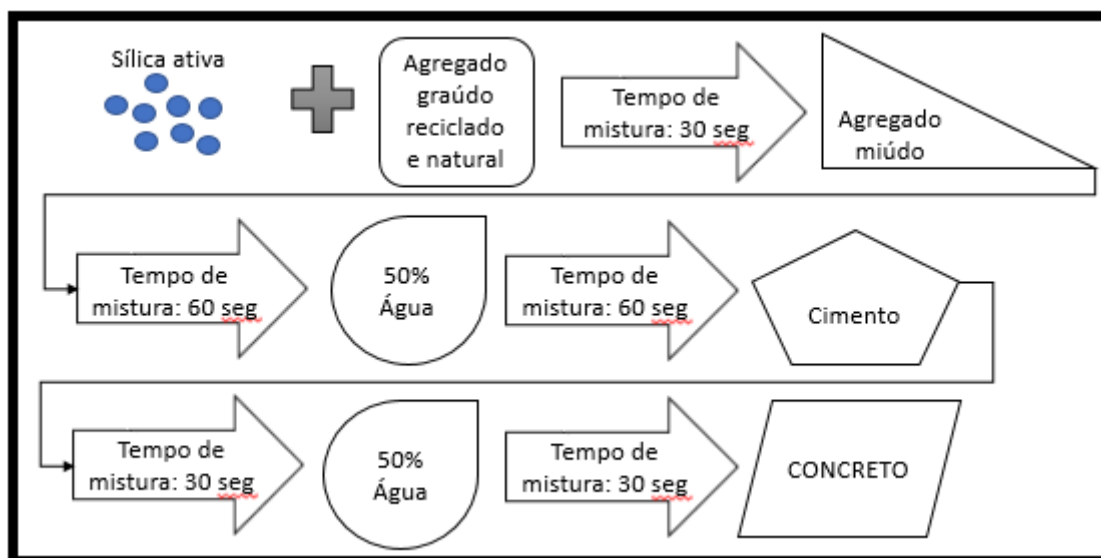


Fonte: Adaptado de Tam; Gao; Tam, (2006).

A diferença entre os dois métodos de mistura propostos por Tam, Gao e Tam, (2006) é a não adição de água, no TSMA_{p2}, à primeira etapa de mistura do concreto, formando uma camada de pasta de cimento ao redor apenas dos agregados reciclados com um menor fator a/c ao redor do agregado, quando comparado ao TSMA_{p1} (TAM; GAO; TAM, 2006b).

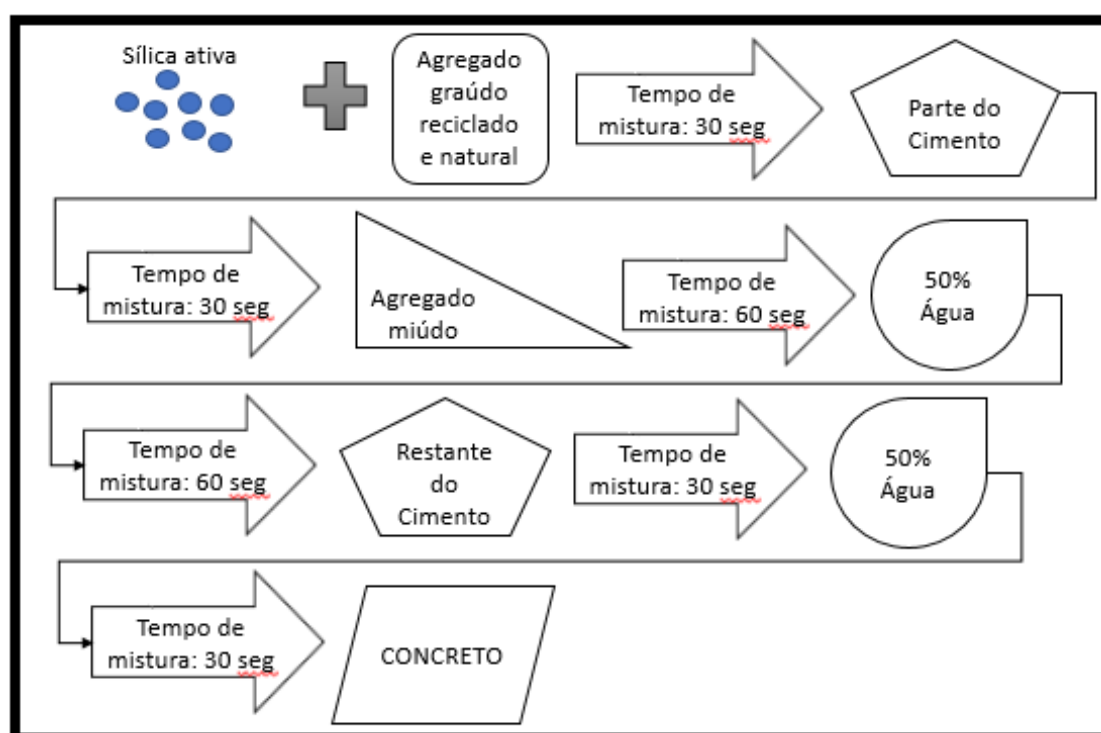
Foram alcançadas melhoras na resistência à compressão aos 28 dias de até 11,47% e 19,75% pelo TSMA_{p1} e TSMA_{p2}, respectivamente, comparados a um concreto de referência, produzido pelo método de mistura convencional (Figura 11). O TSMA_{p2} apresentou melhores resultados que o TSMA_{p1}, o que, segundo os autores, ocorreu devido ao menor fator a/c na zona de transição interfacial entre agregados reciclados e nova matriz cimentícia (TAM; GAO; TAM, 2006b). Os métodos TSMA_s e TSMA_{sc} propõem adições de material pozolânico ao traço de concreto, dividindo também a água de mistura. O TSMA_s adiciona sílica ativa, misturada aos agregados reciclados em um processo de pré mistura do concreto, substituindo 2% do cimento em peso. A outra abordagem, TSMA_{sc}, é realizada adicionando cimento e sílica ativa (2% do peso do cimento) durante o processo de pré mistura (TAM; TAM, 2008a). A Figura 15 e a Figura 16 ilustram ambas as abordagens.

Figura 15 - Método de mistura TSMA_s.



Fonte: Adaptado de Tam; Tam, (2008).

Figura 16 - Método de mistura TSMA_{sc}.



Fonte: Adaptado de Tam; Tam, (2008).

Os agregados reciclados foram cobertos por camadas de sílica ativa, resultando em uma mudança na microestrutura do concreto. A adição do material é responsável por diminuir a porosidade na zona de transição interfacial do concreto e proporcionar uma maior aderência entre agregado graúdo e pasta de cimento. Tais

fatores, segundo os autores, são responsáveis pela melhoria no comportamento mecânico dos concretos produzidos por TSMA_s e TSMA_{sc} (TAM; TAM, 2008a).

A adição de cimento junto à sílica ativa pelo método TSMA_{sc}, durante o processo de pré mistura do concreto, proporcionou a obtenção de uma zona de transição interfacial ainda mais densa ao redor dos agregados reciclados, comparando-se à ZTI obtida nos concretos produzidos pelo TSMA_s.

Por meio de ambos os métodos propostos foram alcançadas, comparando-se ao concreto de referência produzido pelo NMA, melhoras na resistência à compressão (28 dias) de até 19,5% e 19,73%, para o TSMA_s e o TSMA_{sc}, respectivamente. Os melhores resultados obtidos foram para os níveis de 25% de substituição de AGN por AGR (TAM; TAM, 2008a).

2.4.4. TSMA_{sfc}

Rajhans; Panda; Nayak, (2018) desenvolveram um estudo apresentando mudanças e melhorias na microestrutura e nas propriedades mecânicas de concretos auto adensáveis, produzidos com uso de AGR. Os autores desenvolveram um método de mistura de concretos de agregados reciclados denominado TSMA_{sfc}.

Para confecção dos concretos foram utilizados agregados graúdos reciclados provenientes de resíduos de concreto, britados e peneirados durante o estudo, agregados miúdos naturais, cimento Portland, cinzas volantes provenientes de carvão betuminoso (cinzas classe F), sílica ativa, água e aditivo superplastificante de éter poli carboxílico modificado. Foram produzidos cinco diferentes traços de concretos auto adensáveis, conforme a Tabela 2.

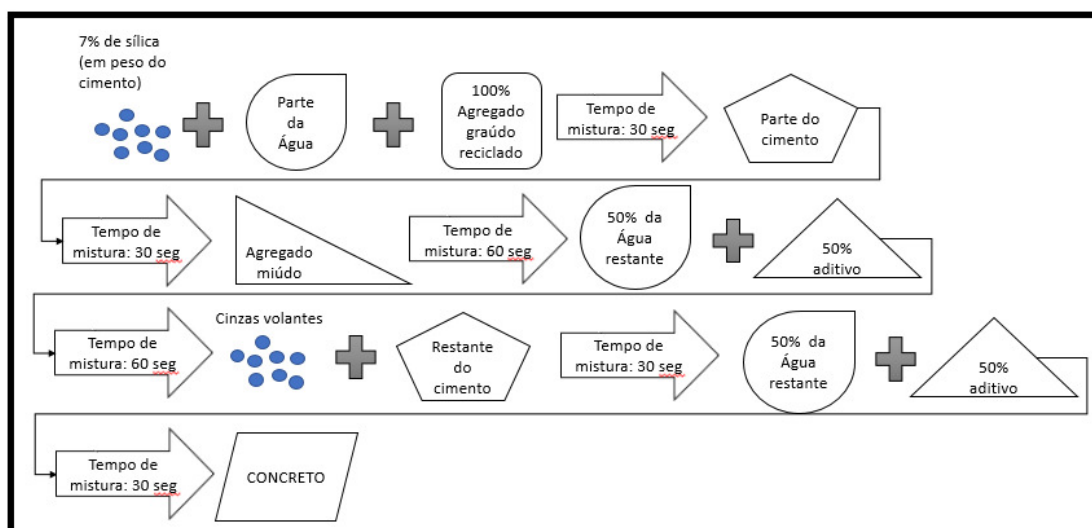
Tabela 2 - Traços de concreto utilizados em Rajhans; Panda; Nayak, (2018).

Substituição de AGN por AGR	Nome da mistura	Cimento (kg/m³)	Agregados miúdos naturais (kg/m³)	Agregados graúdos (kg/m³)		Cinzas volantes (kg/m³)	Água (kg/m³)	Superplastificante (kg/m³)
				Naturais	Reciclados			
0%	SCVAC	300	826	815	-	160	194	4,6
20%	SCRAC-20	300	826	640	147	160	194	4,6
40%	SCRAC-40	300	826	480	294	160	194	4,6
60%	SCRAC-60	300	826	320	442	160	194	4,6
100%	SCRAC-100	300	826	-	737	160	194	4,6

Fonte: Adaptado de: Rajhans; Panda; Nayak, (2018).

Durante a pesquisa foram utilizados três tipos de métodos de mistura de concreto: convencional (Figura 11), TSMA (Figura 12), TSMA_{sfc} (Figura 17). Os dois primeiros métodos citados foram detalhados anteriormente.

Figura 17 - Método de mistura TSMA_{sfc}, desenvolvido por Rajhans; Panda; Nayak, (2018).



Fonte: Adaptado de Rajhans; Panda; Nayak, (2018).

O método TSMA_{sfc}, desenvolvido pelos pesquisadores, consiste em adicionar, em uma primeira etapa, 7% de sílica ativa em peso do cimento e uma porcentagem do cimento empregado no traço de concreto aos agregados graúdos reciclados. No segundo estágio da mistura são adicionados o restante do cimento, cinzas volantes,

água, areia e aditivo superplastificante. Foi alcançada uma melhora de até 30% na resistência à compressão aos 28 dias dos concretos preparados por tal método, para o traço com 100% de AGR. A resistência à compressão obtida pelo traço com 100% de AGR, chegou a 90,77% da resistência à compressão do concreto produzido pelo mesmo método, com 100% de AGN. O método de mistura TSMA_{sfc} também mostrou-se superior ao TSMA, em relação à resistência mecânica dos concretos fabricados (RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018).

Os concretos produzidos tiveram sua microestrutura avaliada por meio de micro análise com sonda de elétrons (EPMA). Foi identificada uma redução nos poros e fissuras do concreto, em comparação a concretos produzidos segundo o NMA, quando adotados os métodos de mistura TSMA e TSMA_{sfc}. O tamanho e a quantidade dos poros tiveram sua maior redução em concretos produzidos segundo o TSMA_{sfc}. O resultado observado é atribuído à utilização da sílica ativa em processo de pré mistura, preenchendo fissuras e poros no concreto, criando um empacotamento mais denso entre agregado e pasta de cimento e preenchendo os poros da própria pasta de cimento (RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018).

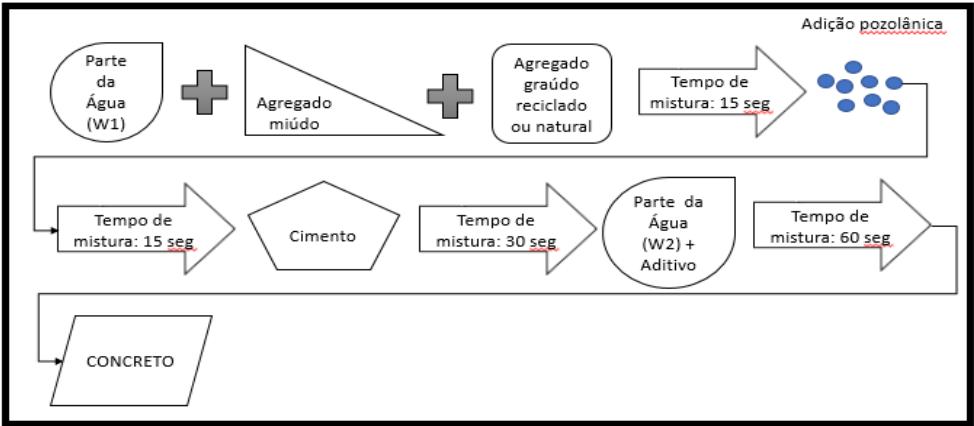
2.4.5. *Triple Mixing Method* (TM)

Com o uso de métodos de mistura melhorados, como o *Double Mixing Method* e o *Two-Stage Mixing Approach*, ocorre o preenchimento de poros e fissuras dos agregados reciclados, causando um efeito positivo ao concreto. Entretanto, mesmo após uso de tais métodos, a zona de transição interfacial nos agregados ainda constitui um ponto fraco devido à presença de cristais de $\text{Ca}((\text{OH}))_2$ nos poros do material. O uso de materiais amorfos e de alta área superficial, como a sílica ativa, preenche os pequenos poros nos agregados reciclados, reagindo com os cristais de $\text{Ca}((\text{OH}))_2$, formando o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), fortalecendo a ZTI e, consequentemente, beneficiando as propriedades mecânicas do concreto produzido (SHAIKH *et al.*, 2017).

Kong *et al.* (2010) propuseram um método de mistura em três etapas para concretos de agregados reciclados denominado *Triple Mixing Method* (TM), otimizando o método proposto por Tam; Gao; Tam, (2005) e baseando-se no estudo conduzido por Li; Xiao; Zhou, (2009), exposto na seção 2.4.6. O procedimento

consiste em encapsular a superfície dos AGR com materiais pozolânicos, no intuito de aprimorar a zona de transição interfacial e, conseqüentemente, as propriedades do concreto produzido. A água utilizada na produção do concreto é dividida de maneira diferente do TSMA, levando em conta a água absorvida pelos agregados miúdos e graúdos, tanto naturais quanto reciclados. Um esquema do TM é ilustrado pela Figura 18.

Figura 18 - Triple Mixing Method.



Fonte: Adaptado de Kong *et al.*, (2010).

O traço foi projetado para ter um conteúdo de água livre (W_f) fixo. Ou seja, a água total utilizada na mistura é igual à água livre estipulada, no caso um fato a/c de 0,50, somada à água absorvida por todos os agregados utilizados. A água total é então adicionada à concretagem em dois momentos distintos. O cálculo das quantidades de água W_1 e W_2 , assim como da quantidade total de água considerada pelo método é mostrado no Quadro 1 (KONG *et al.*, 2010a).

Quadro 1 - Quantidades de água no Triple Mixing Method.

Sigla	Cálculo	Significado
Wt	$W_t = W_f + W_{abs}$	Água total utilizada no traço de concreto
Wabs	$W_{abs} = \text{peso agregados} \times \text{capacidade de absorção}$	Água absorvida por agregados graúdos e miúdos
Wf	Estipulada no traço, Kong <i>et al.</i> (2010) utilizaram 210 kg/m^3	Água livre para mistura, não absorvida por agregados
W1	$W_1 = 1,2 \times (W_t - W_f)$	Quantidade de água adicionada em primeiro processo de mistura
W2	$W_2 = W_t - W_1$	Quantidade de água adicionada ao final da mistura

Fonte: Adaptado de Kong *et al.*, (2010).

Kong *et al.* (2010) utilizaram, durante o estudo, adições de cinzas volantes e escória de alto forno. Os traços ensaiados continham 20% do peso do cimento substituído em uma das adições. Os concretos produzidos segundo o *Triple Mixing Method* com adição de 20% de escória de alto forno alcançaram os maiores níveis de resistência à compressão, havendo uma melhora de até 30,75%, quando comparados a concretos produzidos pelo método de mistura convencional, e de até 25,73%, comparados a concretos produzidos pelo método de mistura em duas etapas (TSMA). A utilização do TM produziu concretos de agregados reciclados cuja resistência à compressão alcançou de 96% a 99,5% da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados naturais (KONG *et al.*, 2010a).

2.4.6. Efeitos da adição de materiais pozzolânicos ao concreto de agregados reciclados

Li; Xiao; Zhou, (2009) abordaram, em seu estudo, o método de preparo do concreto de agregados reciclados em duas etapas (TSMA), combinando-o com adições de diferentes materiais pozzolânicos. As pozolanas utilizadas foram cinzas volantes, sílica ativa e escória de alto-forno. A quantidade de pozolanas por traço e os traços produzidos são detalhados pela Tabela 3:

Tabela 3 - Traços de concreto utilizados em pesquisa de Li; Xiao; Zhou, (2009).

(continua)							
Nome do traço	Cimento (kg/m³)	Adição (em % do peso de cimento)			Agregado graúdo reciclado (100%) (kg/m³)	Agregado miúdo (areia) (kg/m³)	Fator a/c
		Cinza volante	Sílica ativa	Escória de alto forno			
RC00A (concreto de referência)	500	-	-	-	1152	594	0,44
RC00B (concreto de referência)	500	-	-	-	1152	594	0,44
RC01A	400	-	20%	-	1094	564	0,55
RC01B	400	-	20%	-	1094	564	0,55
RC02A	400	20%	-	-	1008	519	0,55
RC02B	400	20%	-	-	1008	519	0,55

RC03A	400	-	-	20%	1017	524	0,55
RC03B	400	-		20%	1017	524	0,55
RC04A	400	10%	10%	-	1051	542	0,55
RC04B	400	10%	10%	-	1051	542	0,55
RC05A	400	-	10%	10%	1056	544	0,55
RC05B	400	-	10%	10%	1056	544	0,55
RC06A	400	10%	-	10%	1012	522	0,55
RC06B	400	10%	-	10%	1012	522	0,55

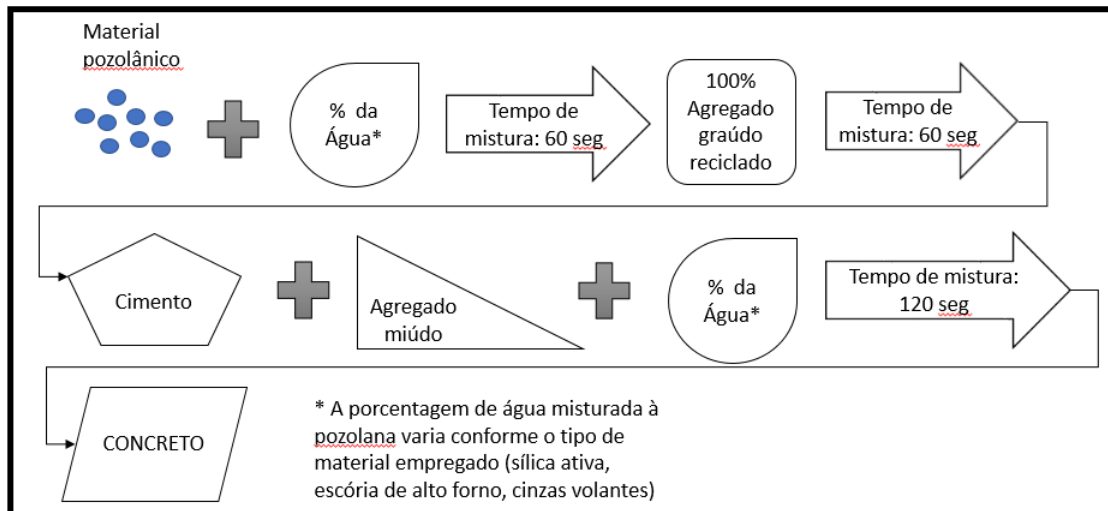
(conclusão)

Fonte: Adaptado de Li; Xiao; Zhou, (2009).

Os agregados reciclados utilizados durante a pesquisa foram obtidos de uma antiga calçada de concreto, passando por um método de britagem em dois estágios. O concreto retirado foi colocado em um britador de mandíbula e peneirado. O material passante foi colocado em um britador de impacto, peneirado e o material passante foi utilizado como agregado gráudo reciclado na pesquisa. Os concretos foram todos preparados e ensaiados com 100% de AGR, não existindo, na pesquisa, comparação de resultados com concretos de agregados naturais (LI; XIAO; ZHOU, 2009a).

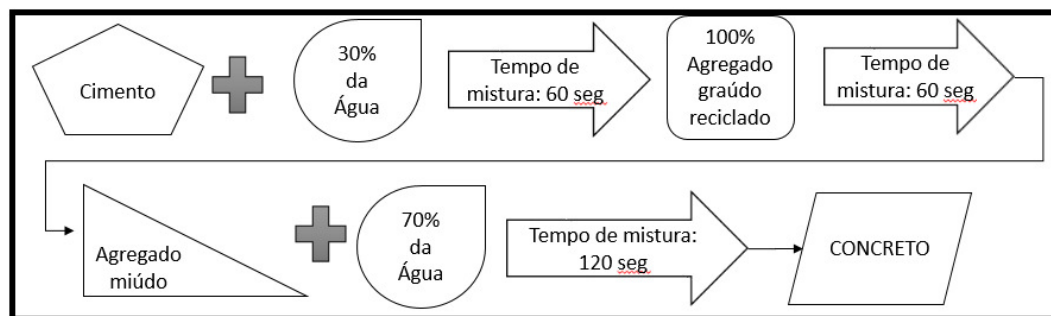
O método proposto pelos autores consiste em, durante o preparo do concreto, misturar o material pozzolânico escolhido (escória de alto forno, cinza volante, sílica ativa) e parte da água do traço, formando uma pasta com fator a/c relativamente baixo. Os agregados reciclados são envoltos por tal pasta e então são adicionados os demais componentes do concreto. Foram ensaiados diferentes traços, com concentrações distintas de material pozzolânico em substituição ao cimento, em peso. Os traços com final A foram produzidos conforme a Figura 19, exceto o traço RC0A, que foi produzido conforme a Figura 20, por não possuir adição de materiais pozzolânicos. Para efeito de comparação, os traços de concreto com final B foram produzidos segundo método de mistura convencional (NMA), demonstrado pela Figura 11 (LI; XIAO; ZHOU, 2009a).

Figura 19 - Método de mistura proposto por Li; Xiao; Zhou, (2009).



Fonte: Adaptado de Li; Xiao; Zhou, (2009).

Figura 20 - Método de mistura de concreto de referência em Li; Xiao; Zhou, (2009).



Fonte: Adaptado de Li; Xiao; Zhou, (2009).

Os autores constataram um melhor comportamento mecânico e maior trabalhabilidade para os concretos produzidos segundo a Figura 19, que tiveram os agregados reciclados envolvidos pelas adições de pozolanas, quando comparados ao concreto de referência e aos traços produzidos segundo o método de mistura NMA (LI; XIAO; ZHOU, 2009a).

Ao comparar-se a trabalhabilidade obtida nos concretos produzidos com AGR envolvidos apenas pela pasta de cimento, verificou-se a influência positiva de envolvê-los em uma pasta composta por cimento e pozolanas, tendo em vista a melhora na trabalhabilidade (LI; XIAO; ZHOU, 2009a).

Segundo Li, Xiao e Zhou (2009), os materiais utilizados como adições pozolânicas tendem a flocular, devido a sua alta área de superfície específica, quando

adicionados ao concreto em métodos de mistura convencionais. Com uso da técnica de mistura adotada pelo artigo Figura 19, a presença de água na pasta que envolve os agregados reduz a floculação das partículas das pozolanas utilizadas como adição, contribuindo para atingir níveis satisfatórios de trabalhabilidade do concreto.

A combinação de adições de 10% de sílica ativa e 10% de cinzas volantes em processo de pré mistura com os AGR produziu os concretos com maiores valores de resistência à compressão. A melhora obtida pelo processo de mistura com encapsulamento dos AGR para a combinação descrita foi de 31,49%, comparada ao concreto de agregados reciclados produzido sem adição de pozolanas e sem encapsulamento dos AGR (LI; XIAO; ZHOU, 2009a).

De acordo com Li, Xiao e Zhou, (2009), a melhora ocorreu devido ao aumento da densidade da zona de transição interfacial entre agregados e matriz cimentícia. O uso de cinzas volantes e sílica ativa proporcionou uma maior densidade de empacotamento de partículas, dada a distribuição granulométrica mais extensa dos dois tipos de adições. O emprego do método de mistura conforme Figura 19 e o uso de adições pozolânicas possibilitou a obtenção de uma ZTI mais densa, composta, principalmente, por géis de silicato de cálcio hidratado (CSH). O método de mistura convencional, sem encapsulamento dos agregados, deu origem a um concreto com ZTI's compostas por uma grande quantidade de cristais de $\text{Ca}((\text{OH}))_2$ e com a presença de fissuras.

Foi realizada na pesquisa uma avaliação da densidade de empacotamento de partículas dos constituintes das pastas que enveloparam os agregados reciclados em processo de pré mistura. Os maiores valores de densidade de empacotamento foram obtidos para sílica ativa, apontando o material como o mais eficiente dentre os três para aumentar a densidade da zona de transição interfacial entre agregados e matriz cimentícia (LI; XIAO; ZHOU, 2009a).

Outra pesquisa, conduzida por Abd Elhakam; Mohamed; Awad, (2012), avaliou o impacto da adição de sílica ativa em 10% do peso de cimento utilizado no traço, combinado a um método de mistura semelhante ao TSMA. Os agregados reciclados utilizados na pesquisa foram obtidos por meio da britagem manual e peneiramento de corpos de prova de concreto já descartados, originados de outras pesquisas.

Foi utilizado por Abd Elhakam; Mohamed; Awad, (2012) o mesmo princípio do método proposto por Li; Xiao; Zhou, (2009), envolvendo os agregados reciclados por materiais pozzolânicos e, neste caso, a pasta de cimento, em um primeiro estágio.

O efeito da adição de 10% de sílica em peso do cimento ocasionou melhora de até 37,2% de resistência à compressão do concreto, a adição também teve efeito positivo na porosidade do concreto e aderência concreto-aço, consequência da melhora na ZTI do concreto causada pelo material (ABD ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012).

Verificou-se, de maneira geral, que o concreto de agregados reciclados apresentou os melhores resultados quando foram utilizadas adições de sílica ativa durante o preparo, em substituição a parte do cimento. Os resultados são mais evidenciados quando os AGR são encapsulados pelo material (ABD ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012; LI; XIAO; ZHOU, 2009a; RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018; TAM; TAM, 2008a).

O método de mistura utilizado durante o preparo do concreto é um fator que possui influência na sua microestrutura e comportamento mecânico. O uso de métodos de mistura modificados, como o TSMA, TM e o encapsulamento dos agregados reciclados com adições pozzolânicas são técnicas que, quando aplicadas à preparação do concreto, proporcionam ganhos ao mesmo, comparando-se a situações de concretos produzidos por métodos de mistura convencionais. O ganho se dá, especialmente, devido à ação das adições utilizadas, que agem como microfiller, preenchendo a ZTI entre a superfície do agregado e matriz cimentícia (KONG *et al.*, 2010a; LI; XIAO; ZHOU, 2009a; TAM; GAO; TAM, 2005a, 2006a; TAM; TAM, 2008b; ZHANG *et al.*, 2019b).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Esta seção apresenta uma breve descrição dos materiais utilizados durante a pesquisa. Para produção dos corpos de prova de concreto foram utilizados: cimento CPV, cinzas de casca de arroz, areia natural lavada média, brita gnaiss nº 1, resíduos de construção e demolição britados equivalentes à brita nº 1 e aditivo superplastificante. Os materiais aqui descritos foram ensaiados conforme exposto em Métodos.

3.1.1. Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento CP V – ARI, por possuir, entre os cimentos comercializados, o menor teor permitido de adições em sua composição, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018).

3.1.2. Agregados miúdos e agregados graúdos

Foram utilizados agregados miúdos naturais, agregados graúdos naturais e agregados graúdos reciclados na produção dos traços de concreto, ensaiados conforme descrito em método de procedimentos.

Os agregados graúdos e miúdos naturais foram fornecidos pelas empresas Martins Lanna Mineração e Brasmic Mineração Areia e Brita Ltda, respectivamente.

Os agregados graúdos reciclados foram fornecidos pela Superintendência de Limpeza Urbana (SLU), da cidade de Belo Horizonte, sendo obtidos na Estação de Reciclagem de Entulho da Prefeitura de Belo Horizonte, localizada na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos, à BR-040, km 531, bairro Jardim Filadélfia.

3.1.3. Aditivo superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante Fluxer 7350, fornecido pelo Grupo Erca. O produto será utilizado nas misturas de concreto, no intuito de tornar adequada a trabalhabilidade do concreto. As características do aditivo, fornecidas pelo fabricante, estão expostas na Tabela 4:

Tabela 4 - Características do aditivo superplastificante utilizado na pesquisa.

Propriedade	Valor/Especificação
Nome	FLUXER RMX 7350
Natureza química	Solução aquosa de policarboxilato modificado
Aspecto a 25°C	Líquido castanho claro
pH	4,5 a 6,5
Ponto de ebulição	acima de 100°C
Densidade (25°C)	1,080 a 1,120 g/cm³
Dosagem sugerida	0,5% a 1,1%

Fonte: O autor (2019).

3.1.4. Cinzas de casca de arroz

As cinzas de casca de arroz utilizadas nas misturas de concreto foram fornecidas pela empresa Sílica Verde do Arroz Ltda.

3.1.5. Água

A água utilizada para lavagem dos agregados, ensaios de caracterização e confecção do concreto foi fornecida pelo sistema de abastecimento municipal da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais.

3.2. Método de procedimentos

3.2.1. Variáveis de resposta e parâmetros de processo

Foram determinadas variáveis, passíveis de mensuração, denominadas variáveis de resposta, no intuito de atender aos objetivos estipulados pelo presente estudo. Foram avaliadas as seguintes variáveis de resposta:

- resistência à compressão axial: obtida por ensaio realizado aos 28 e 91 dias de idade;
- abatimento por tronco de cone (slump): obtida pelo ensaio de consistência pelo abatimento tronco de cone realizado no momento da concretagem, durante moldagem dos corpos de prova;
- absorção de água: variável obtida em ensaio realizado 28 e 91 dias após concretagem.

Os parâmetros de processo são variáveis que, quando alteradas podem ter algum efeito sobre as variáveis de resposta. Na presente pesquisa foram definidos os seguintes parâmetros de processo, cuja alteração e efeito causado às variáveis de resposta foram quantificados e analisados:

- teores de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados: 0% e 100%;
- teores de cinzas de casca de arroz em substituição ao cimento: teores de 0% e 20% de cinzas de casca de arroz utilizados nos traços ensaiados;
- método de mistura de concretos de agregados reciclados: foram ensaiados concretos produzidos pelos métodos de mistura TSMA_{sc} e TM;
- tempo de cura de corpos de prova, submersos em tanque com água: 28 e 91 dias após concretagem.

3.2.2. Caracterização do cimento

A análise química do cimento obtido foi realizada pelo fornecedor, por relatório técnico. O relatório técnico, exposto pela Tabela 5 e a Tabela 6, fornece informações sobre tempos de pega inicial e final do cimento e resistência à compressão da pasta de cimento em diferentes idades.

Tabela 5 - Relatório de ensaios do cimento utilizado.

Ensaio	Norma	Valor médio
Início de pega (min)	NBR NM 65	134
Fim de pega (min)	NBR NM 65	inferior a 600 min
Finura Blaine (cm ² /g)	NBR 16372	4600
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	NBR 7215	51,2

Fonte: Adaptado de Lafarge/Holcim (2019).

Tabela 6 - Análise química do cimento utilizado.

Composto	Ensaio	13/11/2018 07/12/2018	11/12/2018 04/01/2019	05/02/2019 01/03/2019	Limites NBR 16697/2018
SiO ₂	NBR 14656	18,14	17,51	17,48	
R.I	NBR NM15	0,95	0,76	0,61	≤ 3,5
Al ₂ O ₃	NBR 14656	4,9	5,11	4,9	
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,99	3,03	2,87	

CaO	NBR 14656	64,58	64,17	63,81	
MgO	NBR 14656	0,76	0,78	0,95	
SO ₃	NBR 14656	2,73	2,48	2,72	≤ 4,5
CO ₂	NBR NM 20	4,87	4,77	4,47	≤ 5,5
K ₂ O	NBR 14656	0,78	0,73	0,69	
C ₃ A (Teórico)	Equação Bogue	6,88	7,67	7,59	

Fonte: Lafarge/Holcim (2019).

A análise granulométrica do cimento foi realizada por meio de difração a laser, com uso do equipamento CILAS Particle Size Analyzer.

3.2.3. Caracterização dos agregados gráudos naturais

Os agregados gráudos naturais utilizados foram caracterizados pelos ensaios de: granulometria, por meio da NM 248 (ABNT, 2003); massa unitária e volume de vazios, de acordo com NM 45 (ABNT, 2006); massa específica, capacidade de absorção de água e massa específica aparente, conforme NM 53 (ABNT, 2009a).

3.2.4. Caracterização dos agregados gráudos reciclados

Dentro da Estação de Reciclagem o processo de tratamento dos RCD começa por sua recepção na estação de reciclagem, onde são inspecionados e é verificado seu teor de contaminação. São considerados contaminantes materiais como gesso, tintas e outros. O material aceito para triagem é classificado em resíduos de Classe A e B, conforme classificação do CONAMA. Os resíduos selecionados são transportados até o britador de impacto, sendo então separados por sua granulometria e estocados em pilhas.

A Figura 21 e a Figura 22 ilustram o britador da estação de reciclagem e a pilha de RCD com granulometria semelhante à da brita nº 1.

Figura 21 - Britador de Estação de Reciclagem de Entulho de Belo Horizonte, MG.



Fonte: O autor (2019).

Figura 22 - Britador e resíduos de construção e demolição após britagem, granulometria próxima à da brita nº 1.



Fonte: O autor (2019).

Os agregados reciclados utilizados na pesquisa foram retirados da pilha mostrada pela Figura 22, ensacados e transportados até o local dos ensaios.

Foi realizada lavagem dos materiais com uso de jato de água de alta pressão, com os agregados colocados sobre uma peneira, removendo partículas de solo e outros materiais aderidos. Em seguida foi realizada a inspeção visual dos agregados e retirada de impurezas. O material foi então peneirado e estendido sobre lona, para secagem durante cinco dias em ambiente coberto e ventilado, sujeito à temperatura ambiente.

Foram consideradas impurezas os materiais não pertencentes às classes A e B de resíduos sólidos, conforme classificação do CONAMA, tais como restos de gesso, compostos orgânicos, massa corrida e partículas de solo. Os agregados reciclados, antes e após limpeza, são ilustrados na Figura 23:

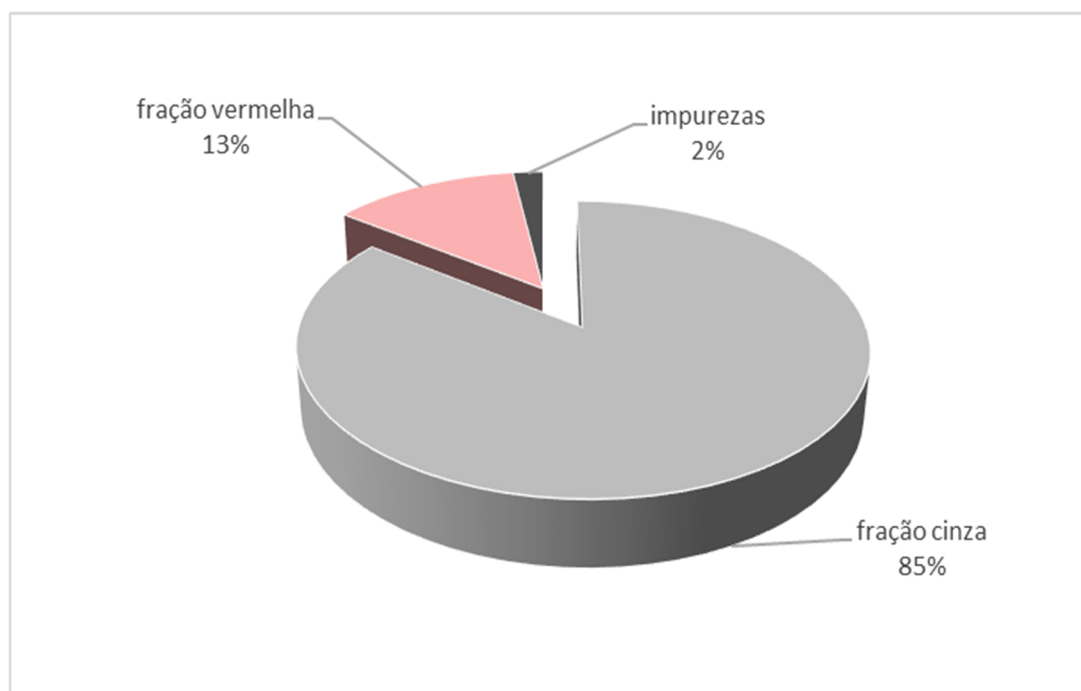
Figura 23 - Aspecto visual dos agregados reciclados antes e após lavagem e retirada de impurezas.



Fonte: O autor (2019).

Após lavagem, avaliou-se a composição dos agregados reciclados, separando e pesando as frações do material, resultando na composição apontada pela Figura 24. Os AGR utilizados nesta pesquisa foram agregados reciclados mistos, tendo em sua constituição parte cerâmica e parte cinza, originada de restos de argamassa e concreto. Os AGR tiveram a mesma origem e composição semelhante àqueles utilizados nos estudos de Gomes (2019) e Salles (2018), realizados também no CEFET-MG.

Figura 24 - Composição dos agregados reciclados.



Fonte: O autor (2019).

As características dos agregados reciclados foram obtidas por meio dos ensaios de: granulometria, por meio da NM 248 (ABNT, 2003); massa unitária e volume de vazios, de acordo com NM 45 (ABNT, 2006); massa específica, capacidade de absorção de água e massa específica aparente, conforme NM 53 (ABNT, 2009a).

3.2.5. Caracterização dos agregados miúdos naturais

O agregados miúdos foram avaliados segundo: massa específica, conforme NBR 9776 (ABNT, 1987); massa unitária e volume de vazios, segundo NM 45 (ABNT, 2006); granulometria, de acordo com NM 248 (ABNT, 2003).

3.2.6. Caracterização da cinza de casca de arroz

Foram executados ensaios de: granulometria por meio de difração a laser, com uso do equipamento CILAS Particle Size Analyzer 1090; picnometria com gás hélio (para determinação de densidade) com uso do Quantachrome Multipycnometer; adsorção de nitrogênio (para determinação de área superficial específica), com a metodologia BET, utilizando o equipamento NOVA 2200e, Quantachrome Instruments.

3.2.7. Dosagem e preparação do concreto

O método de dosagem escolhido para o concreto produzido foi o do *American Concrete Institute* (ACI). O método, além de ser nacionalmente difundido, ao ser comparado a outros métodos de mistura convencionais, é o que se mostra mais apropriado e gera melhores resultados para concretos de agregados reciclados (BAIRAGI; VIDYADHARA; RAVANDE, 1990).

Deseja-se produzir concretos de agregados reciclados cujas características possibilitem seu uso em aplicações convencionais, como em construções residenciais ou comerciais, localizadas em ambientes urbanos.

Os traços ensaiados na presente pesquisa foram dosados na intenção de atender à Classe de agressividade II (moderada), segundo NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) e à Classe de Resistência C35, de acordo com a NBR 8953:2015 (ABNT, 2015). A classe de agressividade escolhida limita o fator a/c utilizado nos traços a, no máximo, 0,60. A resistência alvo escolhida durante dosagem pelo método foi de 35 MPa.

Após o uso da metodologia do ACI para dosagem do concreto, foram moldados corpos de prova com um traço experimental de concreto. Durante a concretagem, o consumo de água do traço experimental foi ajustado por meio dos resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone, resultando no traço mostrado na Tabela 7, utilizado durante a pesquisa:

Tabela 7 - Traço de concreto de referência adotado durante pesquisa.

	Cimento	Areia	Agregado graúdo natural	Água
traço em kg/m ³	427	734,96	918,45	193,9
traço em volume	1	1,72	2,15	0,45

Fonte: O autor (2019).

Os corpos de prova foram moldados e curados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando moldes metálicos cilíndricos com 10 cm de diâmetro de base e 20 cm de altura. Antes da concretagem foi aplicado desmoldante aos moldes, no intuito de evitar danos e facilitar a retirada dos corpos de prova. O adensamento do concreto após lançamento nos moldes foi realizado em mesa vibratória.

3.2.8. Definição da condição de umidade dos AGR

Foi realizada uma análise da condição de umidade dos agregados reciclados utilizados na pesquisa e seu efeito na trabalhabilidade e resistência mecânica do concreto, semelhante ao executado por Brand, Roesler e Salas, (2015). Os AGR usados nos traços experimentais de concreto foram utilizados de duas maneiras distintas: secos em ambiente ventilado por 5 dias, como descrito em 3.2.4 e secos em estufa, à temperatura de 100°C, durante 24 horas, em período anterior à concretagem, retirando toda umidade retida nos AGR. A dosagem adotada para análise de umidade dos agregados reciclados foi a mesma para ambos os casos de secagem e é representada pela Tabela 8. O método de mistura empregado durante a avaliação da umidade foi o TSMA (*Two-stage mixing approach*).

Tabela 8 - Traço de concreto para avaliação de umidade de agregados reciclados.

Traços	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	AGR (kg/m³)	Água (kg/m³)	*SP (% peso do cimento)
Avaliação umidade	427	734,96	880,04	193,9	1%
*SP: Aditivo superplastificante					

Fonte: O autor (2019).

Foi quantificado o teor de umidade dos agregados reciclados após secagem em ambiente ventilado, antes do período de concretagem. Pesou-se uma amostra de 1000,08 g dos mesmos, denominada M_{amb} e, em seguida, colocou-se a amostra em estufa à temperatura de 100°C durante 24 horas. A amostra seca (M_s) obtida foi pesada para cálculo do teor de umidade, obtido segundo a Equação 1.

$$\frac{M_{amb} - M_s}{M_s} = \text{Teor de umidade (\%)} \quad (1)$$

Tabela 9 - Teor de umidade de AGR secos em ambiente aberto, tomado logo antes da concretagem.

M_{amb} (g)	M_s (g)	Teor de umidade (%)
1000,08	969,06	3,1

Fonte: O autor (2019).

Os AGR secos em ambiente apresentaram teor de umidade de umidade de 3,1%, como demonstrado na Tabela 9. Os AGR foram utilizados na confecção do concreto com tal teor de umidade, sem que a quantidade de água em seu interior fosse descontada na água adicionada ao traço de concreto.

O objetivo da análise de umidade dos AGR foi verificar como esta condição afeta a trabalhabilidade e resistência mecânica do concreto, para, em seguida, adotar o método com melhores resultados na confecção dos traços da pesquisa. Os traços executados foram submetidos aos ensaios descritos no Quadro 2.

Quadro 2 - Ensaios em traços de concreto para avaliação de condição de umidade dos AGR.

Variável analisada e unidade de mensuração	Ensaio	Norma Correspondente	Quantidade de corpos de prova moldados	Idade dos ensaios realizados (dias)
Slump (mm)	Consistência - abatimento de tronco de cone	NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)	-	No momento da concretagem
Resistência à compressão axial (MPa)	Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos	NBR 5739:2018 (ABNT, 2018)	3	28 dias

Fonte: O autor (2019).

Foi realizada análise de variância dos dados de resistência à compressão axial obtidos após ensaios com uso do software R, procurando identificar se a condição de umidade dos AGR teve influência na resistência à compressão dos concretos produzidos, para um nível de confiança de 95%. Os resultados da análise de umidade estão descritos em 4.4.1. Conforme apontado na seção, o uso dos AGR secos em local ventilado, à temperatura ambiente, proporcionou melhores condições de trabalhabilidade ao concreto, sem afetar, de maneira negativa, a resistência à compressão. De tal maneira, os traços seguintes preparados na pesquisa foram confeccionados com agregados reciclados secos local ventilado, sem uso de estufa.

3.2.9. Justificativa do método adotado para dosagem e preparo do concreto

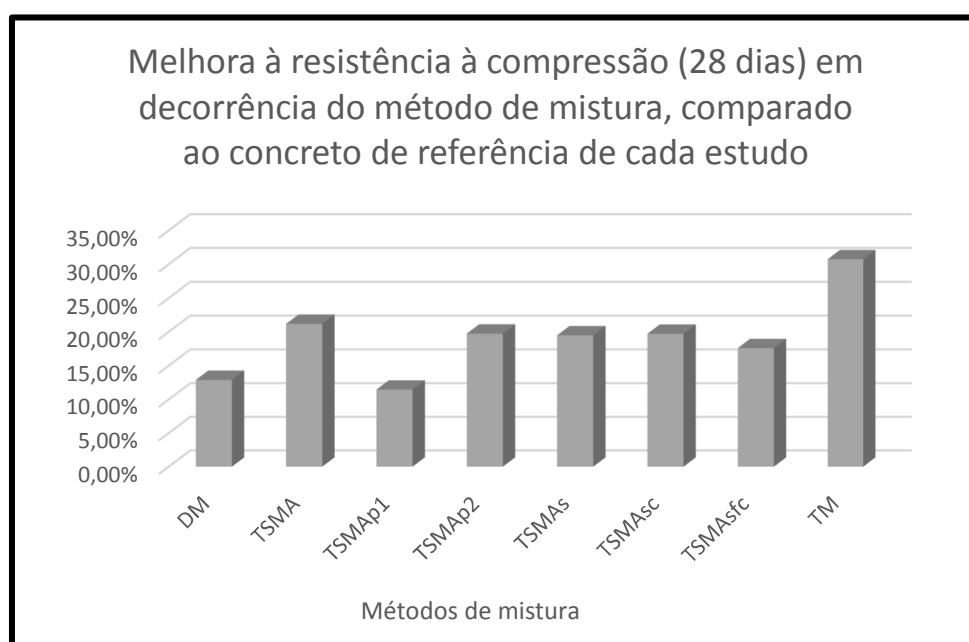
As pesquisas abordadas na revisão teórica deste trabalho procuram viabilizar a utilização de concretos com 100% de agregados reciclados por meio de melhoras

nas propriedades mecânicas e reológicas do concreto, procurando aproximar o comportamento do CAR ao comportamento de um concreto produzido com 100% de AGN. A viabilização do uso dos agregados reciclados no concreto pode ser realizada de duas maneiras, conforme exposto em 2.2: remoção da camada de argamassa ao redor dos AGR ou melhoria das qualidades da camada de argamassa aderida.

O fortalecimento da camada de argamassa aderida por meio da modificação dos métodos de mistura de concreto e do uso de adições são meios válidos de otimizar a performance do concreto de agregados reciclados, tendo em vista os ganhos ambientais e baixos custos associados aos processos (BEHERA *et al.*, 2014b).

Não há, ainda, adoção de um método de mistura de concreto de agregados reciclados padronizado. O tema é explorado na comunidade acadêmica e as pesquisas indicam melhoras decorrentes do emprego de métodos modificados em relação aos métodos de mistura convencionais. A Figura 25 resume a melhora na resistência à compressão obtida por variações nos métodos de mistura de concretos de agregados reciclados, comparados aos concretos de referência, preparados por métodos convencionais, das pesquisas apresentadas na seção 2.4.

Figura 25 – Resultados de melhora de resistência obtidos por métodos de mistura de concretos de agregados reciclados expostos em 2.4.



Fonte: Adaptado de Kong *et al.*, (2010); Rajhans; Panda; Nayak, (2018); Otsuki *et al.*, (2003); Tam *et al.* (2005); Tam, Gao e Tam, (2006); Tam e Tam, (2008).

Conforme a Tabela 10, foram escolhidos dois métodos de mistura para os concretos produzidos neste estudo. A escolha do método TSMA_{sc}, ilustrado pela Figura 26, deu-se devido à sua aceitação acadêmica para mistura de concretos com AGR e aos melhores resultados obtidos, quando comparado ao método de mistura convencional (Figura 11), conforme descrito na seção 2.4.1 e na seção 2.4.2. Como neste estudo foram utilizadas cinzas de casca de arroz no encapsulamento dos AGR e não sílica ativa, como no TSMA_{sc}, deu-se o nome de TSMA_{CCA} para o método de mistura em duas etapas utilizado.

O outro método adotado, *Triple Mixing Method* (TM), ofereceu os maiores índices de melhora de resistência à compressão, em relação a um concreto produzido pelo método de mistura convencional, como retratado pela Figura 25. O método foi escolhido para ser adotado na presente pesquisa face aos resultados obtidos por Kong *et al.*, (2010), onde concretos com 100% de agregados graúdos reciclados obtiveram resistência à compressão muito próximas (até 99,6%) às de concretos de referência com 100% de agregados naturais. Os AGR utilizados por Kong *et al.*, (2010) foram agregados reciclados de concreto, produzidos a partir da britagem de um concreto de 40 MPa.

A comparação entre melhoras obtidas por cada pesquisa foi adotada para escolha do método de mistura face à variabilidade do tipo de AGR utilizado e dos traços de concreto empregados nas pesquisas avaliadas, o que invalida a comparação direta de valores de resistência à compressão. A melhora na resistência à compressão obtida pelos métodos de mistura pode também ser afetada pela variabilidade dos AGR e dos traços de concreto utilizados.

Como apontado por Kong *et al.* (2010), o uso do método de mistura em três etapas (TM) pode aprimorar ainda mais os ganhos ao concreto, em relação aos métodos de mistura em duas etapas, como o TM e o TSMA. A melhora ocasionada ao concreto pelo uso do TM deve-se, principalmente à formação de uma fina película composta pelas adições pozolânicas ao redor dos agregados reciclados, decorrentes do primário estágio de mistura do TM. A película formada pelas adições, reage com os cristais de hidróxido de cálcio presentes nos poros dos AGR, formando novos produtos de hidratação e fortalecendo a ZTI, especialmente em idades tardias.

Li, Xiao e Zhou (2009) avaliaram a influência de adições de sílica ativa, cinzas volantes e escória de alto-forno em concretos de agregados reciclados, em níveis de substituição de 10% e 20% do peso do cimento. Os autores verificaram que a adição de 10% de sílica ativa junto a 10% de cinzas volantes, em substituição ao cimento, proporcionou maiores ganhos ao comportamento mecânico do concreto de agregados reciclados, em comparação aos traços ensaiados com diferentes adições em diferentes teores. Abd Elhakam, Mohamed e Awad (2012) também encontraram os maiores ganhos ao comportamento do concreto de agregados reciclados quando utilizadas adições de sílica ativa.

Baseado na literatura apresentada pela revisão teórica, verifica-se a melhora das propriedades mecânicas do concreto de agregados reciclados ao serem utilizadas adições de materiais um pozzolânicos, tendo como base a premissa de envolver os agregados nas pozolanas. O uso dos materiais em substituição ao cimento também origina concretos mais sustentáveis, com menores teores de cimento e, conseqüentemente, menos CO₂ incorporado.

Não foi verificado, na literatura internacional, o uso de cinzas de casca de arroz combinado a métodos de mistura modificados de concretos de agregados reciclados, sendo identificada uma possibilidade pesquisas. Procurou-se, neste trabalho, verificar o comportamento do concreto de agregados reciclados, substituindo a adição de cinzas volantes, presentes nas pesquisas de Li; Xiao; Zhou, (2009) e Abd Elhakam; Mohamed; Awad, (2012), por adições de cinzas de casca de arroz.

3.2.10. Misturas e traços finais de concreto

Definido o traço experimental, foram variados os parâmetros de controle da pesquisa, obtendo diferentes tipos de misturas. As misturas ensaiadas e suas combinações de parâmetros de processos são ilustradas pela Tabela 10.

Tabela 10 - Misturas ensaiadas durante pesquisa.

(continua)				
Número	Nome da mistura	Agregados graúdos reciclados (%)	Cinza de casca de arroz (%)	Método de mistura
1	TM-AGR-CCA	100	20	TM
2	TM-AGR	100	0	TM
3	TSMA-AGR-CCA	100	20	TSMA _{CCA}

4	TSMA-AGR	100	0	TSMA _{CCA}
5	TM-AGN-CCA	0	20	TM
6	TM-AGN	0	0	TM
7	TSMA-AGN-CCA	0	20	TSMA _{CCA}
8	TSMA-AGN	0	0	TSMA _{CCA}

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

O traço experimental da pesquisa, mostrado na Tabela 7, refere-se a concretos sem adição de cinzas e com 100% de agregados naturais. O traço foi adaptado para as misturas mostradas na Tabela 10, resultando nos traços ilustrados pela Tabela 11.

Tabela 11 - Traços de concreto segundo misturas desenvolvidas durante pesquisa.

Traços	Cimento (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	AGN (kg/m ³)	AGR (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	*SP (% peso do cimento)
1	341,6	85,4	734,96	-	880,04	193,9	1%
2	427	-	734,96	-	880,04	193,9	1%
3	341,6	85,4	734,96	-	880,04	193,9	1%
4	427	-	734,96	-	880,04	193,9	0,80%
5	341,6	85,4	734,96	918,45	-	193,9	0,40%
6	427	-	734,96	918,45	-	193,9	0,20%
7	341,6	85,4	734,96	918,45	-	193,9	0,40%
8	427	-	734,96	918,45	-	193,9	0,30%

*SP: Aditivo superplastificante

Fonte: O autor (2019).

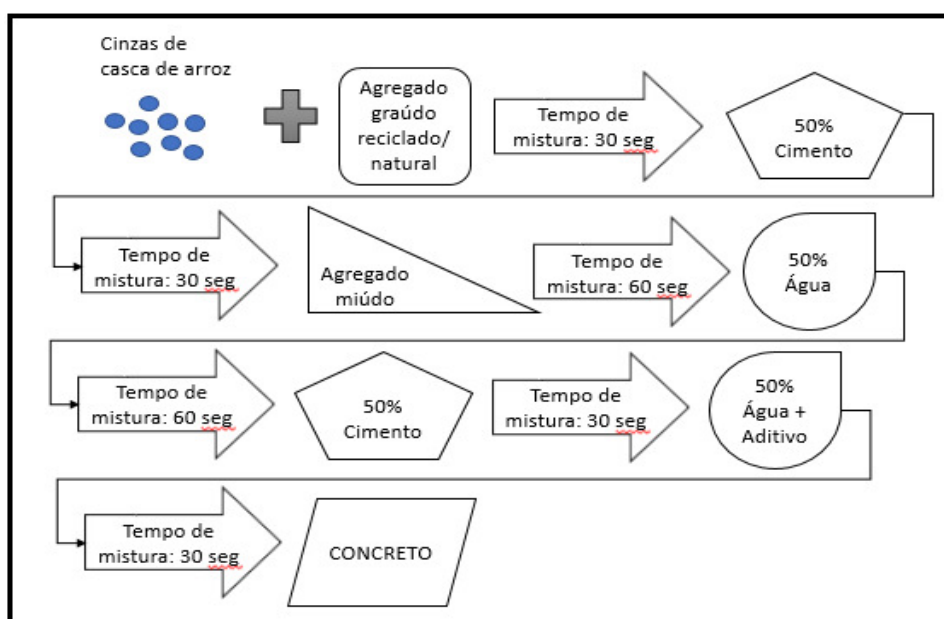
Os AGN foram substituídos pelos AGR em volume, segundo sua massa específica seca. Devido à menor massa específica dos AGR, foi utilizada menor massa dos mesmos em substituição aos AGN (PACHECO-TORGAL, 2013). Foi adotado o teor de 20% de cinzas de casca de arroz em substituição ao peso do cimento, procurando-se adotar o mesmo nível de adições que contribuíram para os maiores níveis de ganhos de resistência à compressão, segundo pesquisa de Li, *et al.* (2009).

O consumo de superplastificante foi definido como um percentual do peso de cimento utilizado. A dosagem de superplastificante foi ajustada mediante ensaios prévios, onde utilizou-se a dosagem de 1% para traços com agregados reciclados e agregados naturais. A mistura produzida com agregados naturais e 1% de aditivo apresentou elevada trabalhabilidade, sendo necessário reduzir o consumo de aditivo

quando utilizados agregados graúdos naturais no concreto. Em concretos produzidos com agregados reciclados, foi utilizado teor de 1% de SP, em peso do cimento, e teor de 0,8% de SP no traço 4, ajustado durante concretagem. Para as misturas produzidas com agregados naturais foi utilizado teor de SP próximo de 0,4% para traços produzidos com cinzas de casca de arroz, devido ao impacto do material na trabalhabilidade do concreto. Os traços sem adição de CCA tiveram o teor de SP ajustado durante concretagens, de modo a obter níveis de abatimento de tronco de cone próximos.

Os traços com método de mistura identificado por TSMA foram produzidos de maneira semelhante ao TSMA_{sc}, descrito na seção 2.4.3. O método denominado TSMA_{CCA}, utilizado nos traços desta pesquisa difere-se do TSMA_{sc} pela adição pozolânica utilizada, onde sílica ativa foi trocada pela cinza de casca de arroz. As etapas do TSMA_{CCA} foram realizadas conforme a Figura 26.

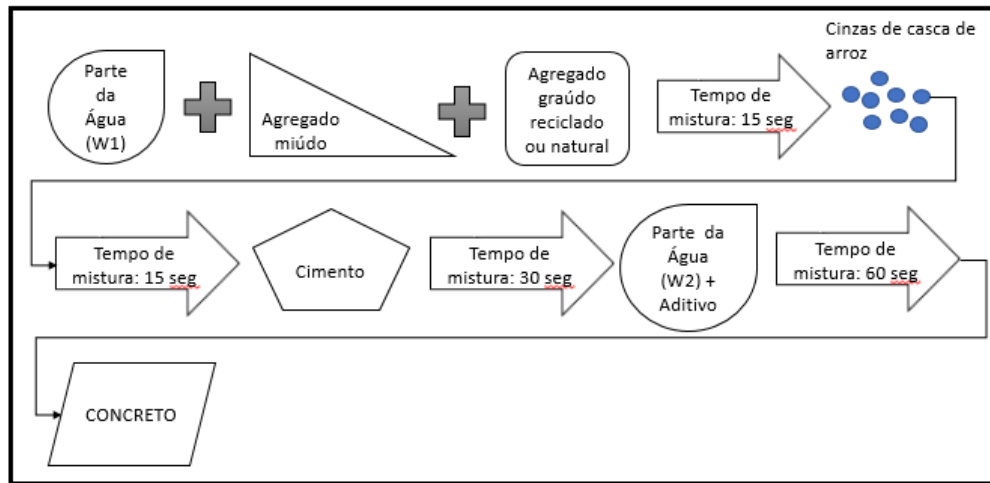
Figura 26 - Método de mistura em duas etapas (TSMA_{CCA}) utilizado na presente pesquisa.



Fonte: Adaptado de Tam; Tam, (2008).

O outro método de mistura proposto, denominado TM e utilizado nos traços 1, 2, 3 e 4 da Tabela 10, é baseado no método de Kong *et al.*, (2010). Suas etapas de mistura são ilustradas pela Figura 27.

Figura 27 - Método de mistura TM, adotado no presente estudo.



Fonte: Adaptado de Kong *et al.*, (2010).

As quantidades de adição de água (W1 e W2) foram calculadas considerando-se a absorção de água dos agregados utilizados, tanto graúdos quanto miúdos, conforme Quadro 1. Não foi adotada a quantidade de água livre (W_f) como na pesquisa de Kong *et al.* (2010), dado que o teor de água total (W_t) foi estipulado pelo método de dosagem ACI e pelos ajustes do traço experimental executado. As quantidades de adição de água calculadas para traços com 100% de AGR e 100% AGN estão presentes na Tabela 12 e na Tabela 13.

Tabela 12 - Cálculo adições de água W1 e W2, traços produzidos pelo TM com agregados naturais.

Cálculo W1 e W2 - traços 2 e 4 (Tabela 11)			
Material	Quantidade no traço (kg/m³)	Absorção de água (%)	Água absorvida - kg/m³ (capacidade de absorção x quantidade no traço)
Água	193,9	-	-
Areia	734,96	2,40%	17,64
AGN	918,45	0,48%	4,41
Total água absorvida no traço (kg/m³)			22,05
W1 (1,2 x água absorvida) (kg/m³)			26,46
W2 (água no traço - W1) (kg/m³)			167,44

Fonte: O autor (2019).

Tabela 13 - Cálculo adições de água W1 e W2, traços produzidos pelo TM com agregados naturais.

Cálculo W1 e W2 - traços 1 e 3 (Tabela 11)			
Material	Quantidade no traço (kg/m³)	Absorção de água (%)	Água absorvida - kg/m³ (capacidade de absorção x quantidade no traço)
Água	193,9	-	-
Areia	734,96	2,40%	17,64
AGR	880,04	10,39%	91,44
Total água absorvida no traço (kg/m³)			109,08
W1 (1,2 x água absorvida) (kg/m³)			130,89
W2 (água no traço - W1) (kg/m³)			63,01

Fonte: O autor (2019).

3.2.11. Caracterização do concreto obtido

As características dos concretos produzidos foram analisadas estatisticamente por meio da obtenção das variáveis de resposta mostradas em 3.2.1. Os respectivos ensaios, normas regentes e equipamentos necessários, quantidade de corpos de prova e idade dos ensaios para cada variável abordada são demonstrados conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Variáveis de resposta, ensaios e normas correspondentes.

Variável analisada e unidade de mensuração	Ensaio	Norma Correspondente	Quantidade de corpos de prova moldados	Idade dos ensaios realizados (dias)
Slump (mm)	Consistência - abatimento de tronco de cone	NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)	-	No momento da concretagem
Resistência à compressão axial (MPa)	Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos	NBR 5739:2018 (ABNT, 2018)	3	28 e 91 dias
Absorção de água (%)	Absorção de água por imersão	NBR 9778:2005 (ABNT, 2005)	3	28 e 91 dias
Microestrutura do concreto	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Não há	1	-

Fonte: O autor (2019).

O concreto teve sua microestrutura analisada por uso do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram colhidas de corpos de prova ao longo do tempo de cura, conforme descrito na seção 3.2.12.

3.2.12. Preparação das amostras para microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A qualidade das imagens obtidas na microscopia eletrônica de varredura depende, principalmente, do preparo das amostras e da competência do operador do equipamento. A preparação das amostras obtidas foi realizada de maneira semelhante ao realizado por Melo (2000), Silva (2004), Silva e Liborio, (2002).

Inicialmente os corpos de prova foram retirados do tanque de cura e as amostras de concreto foram obtidas com uso de serra circular. Foram cortadas cerca de nove peças com, aproximadamente, 1 cm de largura x 1 cm de comprimento x 1 cm de espessura para cada um dos oito traços de concreto rodados em betoneira, como ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Amostras retiradas para MEV antes de preparo finalizado.



Fonte: O autor (2019).

As amostras cortadas foram então imersas em álcool isopropílico por 20 minutos para remoção de água livre dos capilares, procurando interromper o processo de hidratação. Em seguida, as peças foram armazenadas em sacos plásticos, numeradas pelo traço do qual foram retiradas, até o momento de serem colocadas em estufa. Todas as amostras obtidas foram colocadas em estufa, em temperatura de 60°C, durante 24 horas, como realizado por Silva (2004), Silva e Liborio, (2002). Após o processo de secagem, foi escolhida uma amostra para cada traço de concreto para embutimento em resina acrílica autopolimerizável, com uso de fôrmas de silicone (Figura 29). Até o momento do embutimento, as peças foram colocadas em sacos plásticos, impedindo-as de terem contato com a umidade do ambiente.

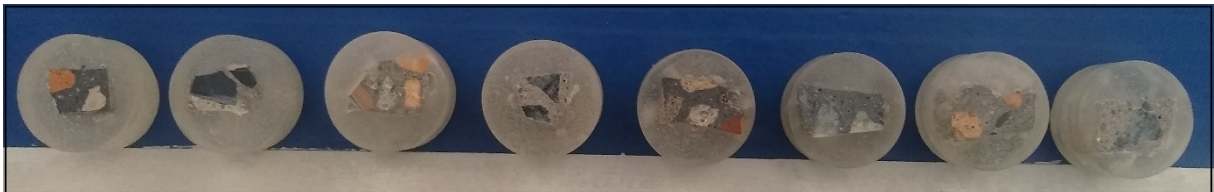
Figura 29 - Fôrmas de silicone e amostras de concreto.



Fonte: O autor (2019).

Após secagem da resina, foi executado lixamento de cada uma das oito amostras embutidas. O processo foi executado com uso de politrizes de disco rotativo, por via úmida, com uso de água. O lixamento foi executado numa sequência gradual, durante 2 minutos para cada lixa, com lixas de carbeto de silício de grãos de 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000. O polimento final das amostras foi executado com pasta de diamante. As amostras, após finalizado o preparo, são ilustradas Figura 30:

Figura 30 - Amostras preparadas para microscopia eletrônica de varredura, traços de 1 a 8, em ordem crescente, da esquerda para a direita.



Fonte: O autor (2019).

A microscopia eletrônica foi realizada com uso de microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo da marca Hitachi, modelo TM3000, aceleração de elétrons de 15kV.

3.2.13. Análise estatística dos resultados obtidos

Para análise dos resultados obtidos cada mistura executada foi considerada como sendo uma população diferente. As médias populacionais obtidas para as variáveis de resposta (resistência à compressão e absorção de água) foram submetidas à análise de variância (ANOVA). Os fatores, ou tratamentos, da análise de variância, foram os parâmetros de processo adotados durante a pesquisa (teor de substituição de AGN por AGR, teor de adição de CCA, idade dos ensaios e método de mistura). Os parâmetros e seus níveis adotados estão presentes na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros adotados para ANOVA e teste de Tukey e níveis dos parâmetros.

Parâmetros	Níveis	
Teor de substituição de AGN por AGR	0	100%
teor de adição de CCA em substituição ao cimento	0	20%
Método de mistura empregado	TSMA _{CCA}	TM
Tempo de cura do concreto (Idade)	28 dias	91 dias

Fonte: O autor (2019).

Foi adotado o nível de significância de 0,05 ($\alpha=5\%$). Por meio da ANOVA foi possível testar a igualdade das médias populacionais, utilizando-se a hipótese nula de igualdade entre as médias. Para todo p-valor inferior a 0,05 obtido na análise, foi rejeitada a hipótese nula e o fator avaliado foi considerado como tendo influência estatística na variável de resposta abordada pelo teste.

Após a análise de variância, foi executado o teste de Tukey, para comparação entre grupos e das médias, duas a duas, identificando quais podem ser consideradas estatisticamente diferentes. Por meio do teste de Tukey foi possível identificar qual o efeito dos parâmetros, isolados e em conjunto, nas variáveis de resposta. Foi adotado o nível de significância de 0,05 ($\alpha=5\%$). O software utilizado para execução dos testes descritos é o software R. Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água foram organizados para a ANOVA e o teste de Tukey conforme a Tabela 15.

Tabela 15 - Arranjo das misturas para testes estatísticos.

(continua)				
Mistura	Idade	Método de mistura	Agregado graúdo	CCA
TM-AGR-CCA-28d	28	TM	AGR	20%
TM-AGN-CCA-28d	28	TM	AGN	20%
TM-AGR-28d	28	TM	AGR	0
TM-AGN-28d	28	TM	AGN	0
TSMA-AGR-CCA-28d	28	TSMA _{CCA}	AGR	20%
TSMA-AGN-CCA-28d	28	TSMA _{CCA}	AGN	20%
TSMA-AGR-28d	28	TSMA _{CCA}	AGR	0
TSMA-AGN-28d	28	TSMA _{CCA}	AGN	0
TM-AGR-CCA-91d	91	TM	AGR	20%
TM-AGN-CCA-91d	91	TM	AGN	20%

TM-AGR-91d	91	TM	AGR	0
TM-AGN-91d	91	TM	AGN	0
TSMA-AGR-CCA-91d	91	TSMA _{CCA}	AGR	20%
TSMA-AGN-CCA-91d	91	TSMA _{CCA}	AGN	20%
TSMA-AGR-91d	91	TSMA _{CCA}	AGR	0
TSMA-AGN-91d	91	TSMA _{CCA}	AGN	0

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

O teste de Tukey efetuou combinações entre as 16 misturas da Tabela 15, comparando-as duas a duas, havendo variação de um ou mais parâmetros, dependendo da combinação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

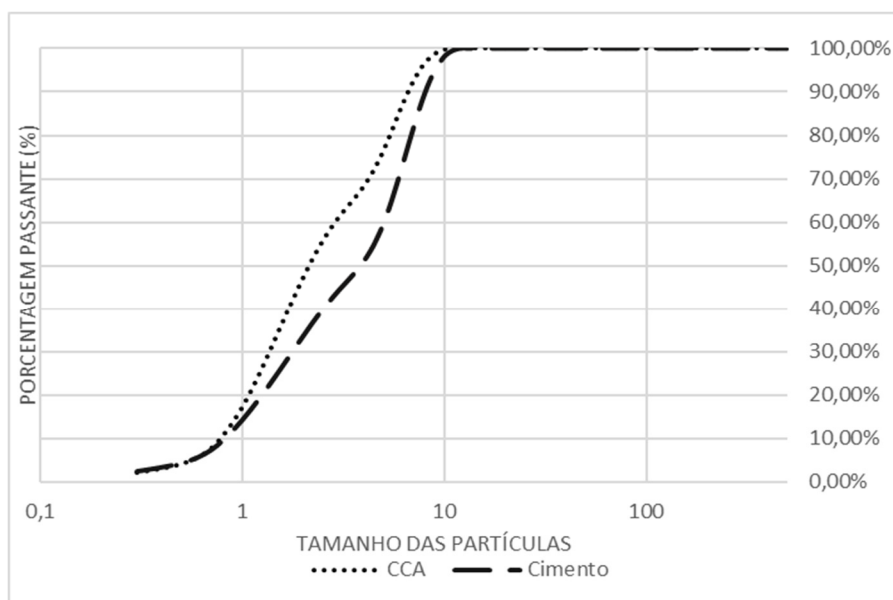
Esta seção apresenta os resultados dos ensaios realizados, a análise estatística dos resultados quantitativos e a microestrutura dos traços produzidos, contribuindo para justificar os resultados obtidos e análises.

4.1. Cimento e cinzas de casca de arroz

4.1.1. Análise granulométrica

A Figura 31 apresenta o resultado da distribuição granulométrica do cimento utilizado, por meio do CILAS Particle Size Analyzer. Visto que parte do cimento é substituída por cinzas de casca de arroz, a curva granulométrica das CCA utilizadas foi colocada junto à do cimento na Figura 31, permitindo uma comparação entre a granulometria dos materiais. A granulometria de ambos os materiais é próxima, sendo que a CCA possui maior quantidade de partículas mais finas, entre 1 e 5 μm .

Figura 31 - Distribuição granulométrica do cimento e da cinza de casca de arroz utilizados na pesquisa.



Fonte: O autor (2019).

4.1.2. Área superficial e massa específica

A área superficial, obtida por adsorção de nitrogênio e a densidade da CCA, obtida por picnometria com gás hélio estão representadas na Tabela 16. Os valores

de massa específica e área superficial obtidos para a CCA utilizada neste estudo foram semelhantes aos encontrados por Gomes (2019).

Tabela 16 - Caracterização das cinzas de casca de arroz.

Propriedades físicas	CCA
Massa específica (g/cm ³)	2,481
Área superficial (m ² /kg)	11,203

Fonte: O autor (2019).

4.2. Agregado gráúdo natural e agregado gráúdo reciclados

4.2.1. Granulometria

A Tabela 17 apresenta a porcentagem retida de material acumulado em cada uma das peneiras após agitação mecânica para os AGN e os AGR.

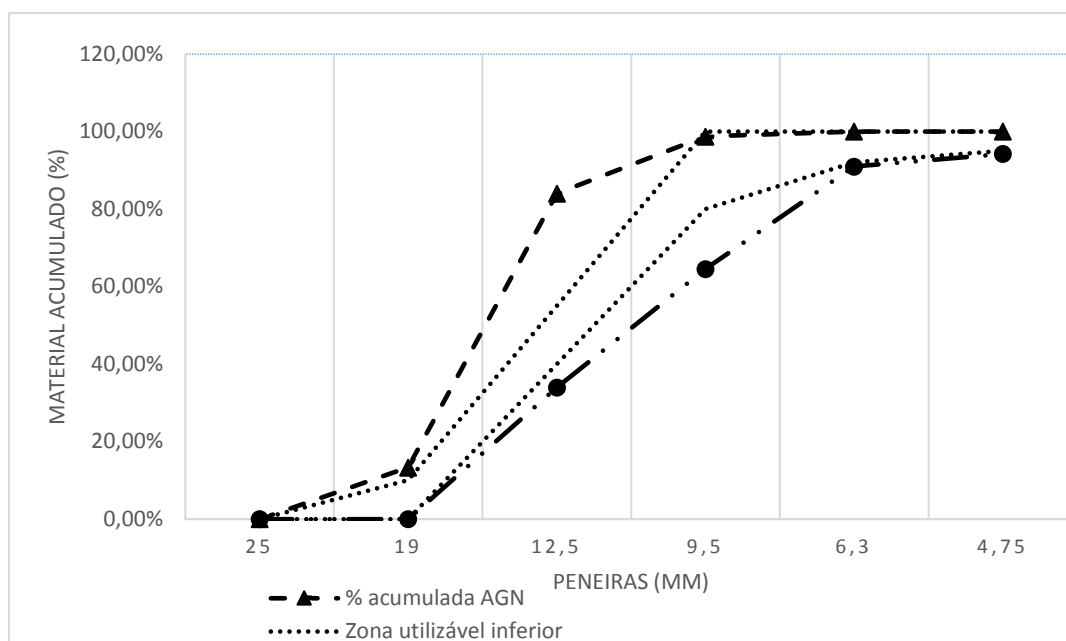
Tabela 17 - Porcentagem acumulada retida de agregados gráúdos naturais e reciclados em ensaio de granulometria.

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem acumulada de material retido (AGN)	Porcentagem acumulada de material retido (AGR)
25	0	0
19	13,33%	0
12,5	84,00%	33,99%
9,5	98,67%	64,55%
6,3	100,00%	90,93%

Fonte: O autor (2019).

A Figura 32 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos agregados gráúdos, obtidas após os ensaios de granulometria, e os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009b), para classificação da brita 1.

Figura 32 - Distribuição granulométrica dos AGN e AGR e limites superior e inferior de granulometria de agregados graúdos estipulados pela NBR 7211.



Fonte: O autor (2019).

As distribuições granulométricas de ambos os agregados encontram-se fora das curvas de zonas utilizáveis, determinadas pela NBR 7211. Os AGR apresentam maior quantidade de partículas mais finas que os AGN, com diâmetro entre 12,5 mm e 4,75 mm, como apontado pela Figura 32.

4.2.2. Massa específica, massa específica aparente, capacidade de absorção de água, massa unitária e volume de vazios

Os resultados obtidos para as propriedades (massa específica, massa unitária, porosidade e absorção de água) dos AGN e dos AGR estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18 - Propriedades físicas dos AGN e dos AGR.

Propriedade	AGN	AGR
Massa específica do agregado seco	2,634 g/cm ³	2,521 g/cm ³
Massa específica do agregado saturado superfície seca	2,614 g/cm ³	2,206 g/cm ³
Massa específica aparente	2,601 g/cm ³	1,998 g/cm ³
Massa unitária	1,350 g/cm ³	0,965 g/cm ³
Absorção de água	0,48%	10,39%
Porosidade aparente	1,25%	20,75%

Fonte: O autor (2019).

Conforme apontado pela tabela, os AGR possuem menor massa específica e massa unitária que os AGN. Os agregados reciclados também possuem maior capacidade de absorção de água e porosidade aparente. A menor massa específica e unitária e maior porosidade e absorção de água dos AGR também foi apontada por outros autores: Bui; Satomi; Takahashi, (2017); Çakir, 2014; Cao *et al.*, (2017b); López-Gayarre *et al.*, (2009); Nepomuceno; Isidoro; Catarino, (2018); Sáez Del Bosque *et al.*, (2017b); Seara-Paz *et al.*, (2016).

4.3. Agregado miúdo

4.3.1. Granulometria

A Tabela 19 apresenta a porcentagem retida de material acumulado em cada uma das peneiras após agitação mecânica.

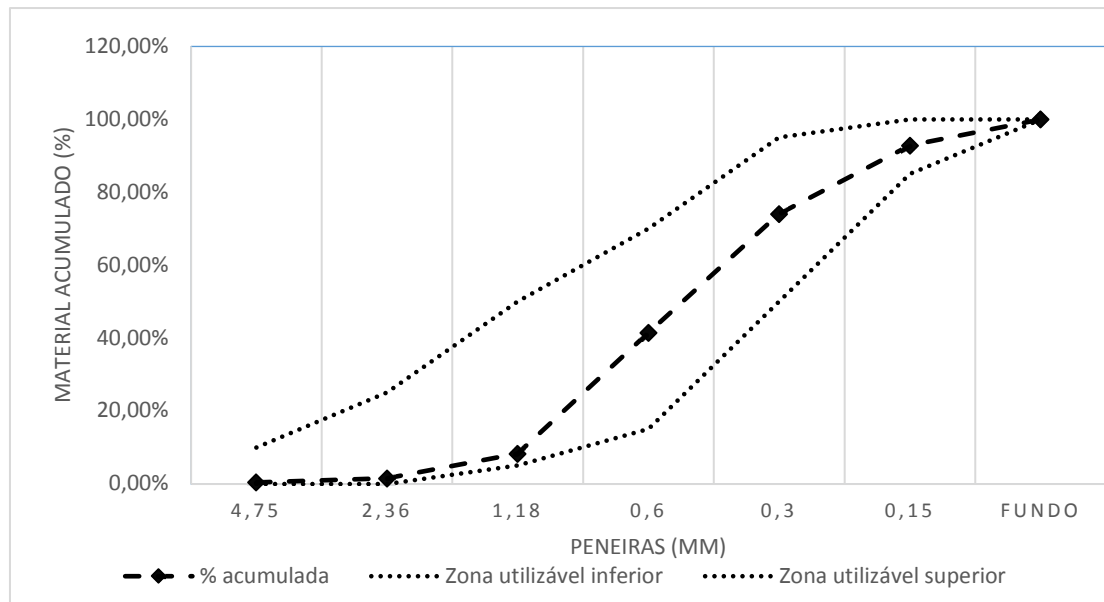
Tabela 19 - Porcentagem acumulada retida de agregados miúdos em ensaio de granulometria.

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem acumulada de material retido
6,3	0
4,75	0,43%
2,36	1,51%
1,18	8,23%
0,6	41,48%
0,3	74,05%
0,15	92,82%
Fundo	100,00%

Fonte: O autor (2019).

A Figura 33 apresenta as curvas de distribuição granulométrica do agregado miúdo, obtidas após o ensaio, e os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009b). A distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado na pesquisa encontra-se dentro dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211.

Figura 33 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: O autor (2019).

4.3.2. Massa específica, massa unitária e volume de vazios

Os resultados obtidos para massa unitária, massa específica e volume de vazios do agregado miúdo são representados na Tabela 20. Os resultados obtidos para caracterização da areia utilizada são semelhantes aos encontrados por Gomes (2019) e Salles (2018).

Tabela 20 - Propriedades físicas do agregado miúdo.

Propriedade	Resultado
Massa específica	2564,10 kg/m ³
Massa unitária	1490,41 kg/m ³
Índice de vazios	41,87 %

Fonte: O autor (2019).

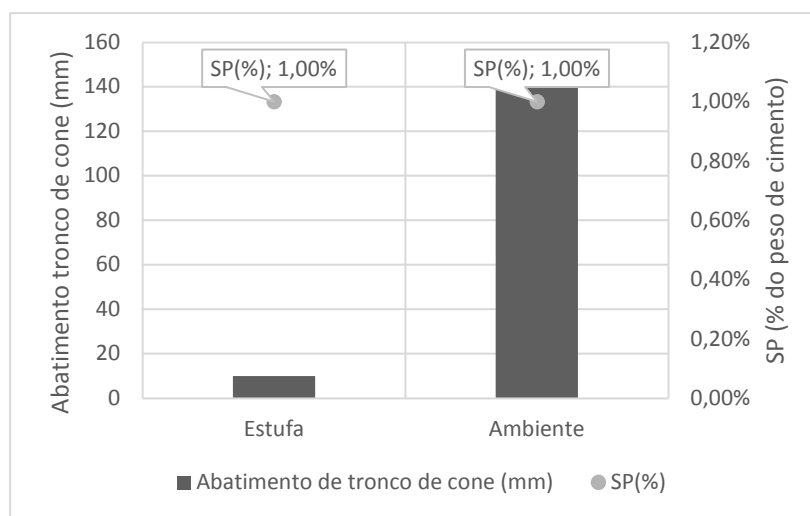
4.4. Concreto

4.4.1. Efeito da condição de secagem dos AGR na trabalhabilidade e resistência mecânica do concreto

Os resultados do abatimento de tronco de cone para as condições de umidade dos agregados reciclados e teor de aditivo superplastificante utilizado estão dispostos na Figura 34. Conforme exposto em 3.2.8, os AGR utilizados na avaliação do efeito

do teor de umidade no concreto foram secos, após sua limpeza, de duas maneiras distintas. Os AGR com condição de secagem denominada ambiente foram secos em local ventilado, durante período de 5 dias, deixando algum teor de umidade residual. Os AGR com condição de secagem “estufa” foram secos em estufa à temperatura de 100°C durante 24 horas, eliminando qualquer umidade residual dos AGR.

Figura 34 - Trabalhabilidade de concretos produzidos com AGR secos em estufa e secos em ambiente ventilado.

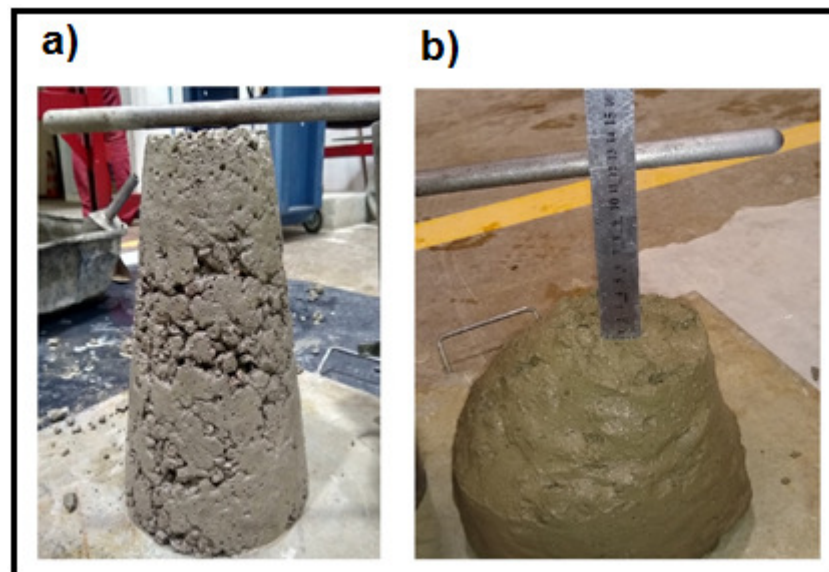


Fonte: O autor (2019).

Os traços foram produzidos com a mesma quantidade de aditivo superplastificante, conforme Figura 34. O abatimento obtido para o concreto produzido com agregados reciclados secos em estufa foi de 10 mm, enquanto para o concreto produzido com AGR secos em ambiente aberto, foi obtido abatimento de 130 mm. A umidade residual dos agregados reciclados secos em ambiente aberto pareceu aumentar a trabalhabilidade do concreto, em comparação a quando foram utilizados AGR sem nenhuma umidade.

A Figura 35 ilustra os testes de abatimento de tronco de cone para os traços executados, segundo as duas condições de umidade dos AGR: em “a)” o concreto produzido com agregados secos em estufa e em “b)” o concreto produzido com agregados secos em ambiente aberto.

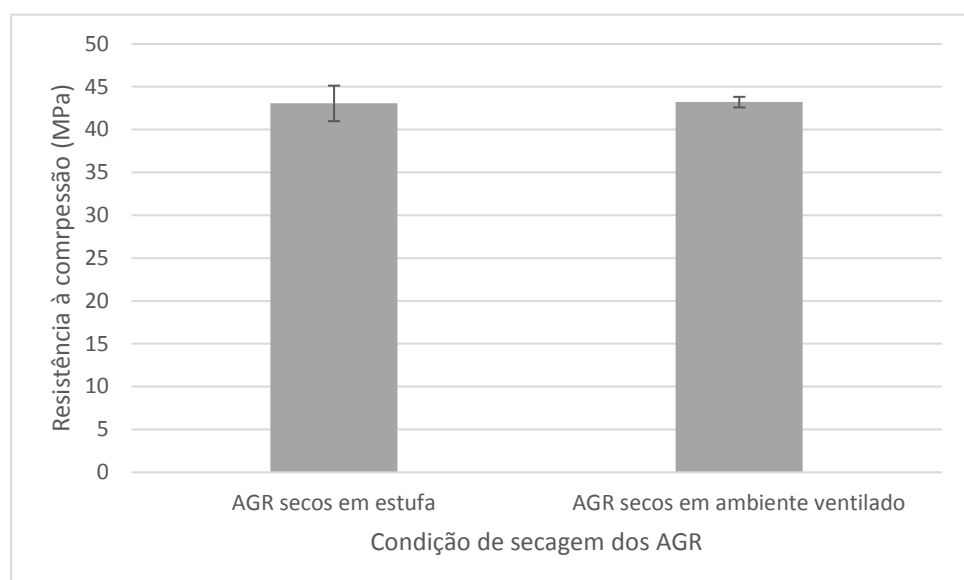
Figura 35 - Abatimento de tronco de cone em concretos produzidos com AGR secos em estufa “a)” e AGR secos em ambiente aberto “b)”.



Fonte: O autor (2019).

Os resultados de ambos os traços para ensaios de resistência à compressão axial, realizados 28 dias após concretagem, estão dispostos na Figura 36.

Figura 36 – Resistência à compressão de concretos produzidos com AGR secos em estufa e secos em ambiente ventilado.



Fonte: O autor (2019).

A partir dos resultados de resistência à compressão obtidos, foi realizada a análise de variância ANOVA, com uso do software R estatística. Os resultados da análise são ilustrados pela Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados de análise de variância ANOVA para concretos produzidos com AGR secos em estufa e secos em ambiente ventilado.

Fatores	G.L	Soma Quad	Quad.med.	F	P-valor
Condição de secagem dos AGR	1	0,025	0,0246	0,011	0,923
Resíduos	4	9,349	2,3372		
Soma Quad.: Soma dos quadrados					
G.L: Graus de liberdade					
Quad.med.: Quadrado médio					

Fonte: O autor (2019).

A análise de variância ANOVA parte de uma hipótese denominada “hipótese nula”, que simboliza a igualdade entre os parâmetros avaliados. Neste caso foi adotada a hipótese nula de que a resistência à compressão é igual para os concretos preparados com AGR secos em estufa e AGR secos em ambiente ventilado.

O valor p obtido (p-valor), representado pela coluna “Pr(>F)” é maior do que 0,05 (5%), o que valida a hipótese nula. Ou seja, a resistência à compressão dos concretos de agregados reciclados ensaiados é igual para as duas diferentes condições de secagem de AGR abordadas.

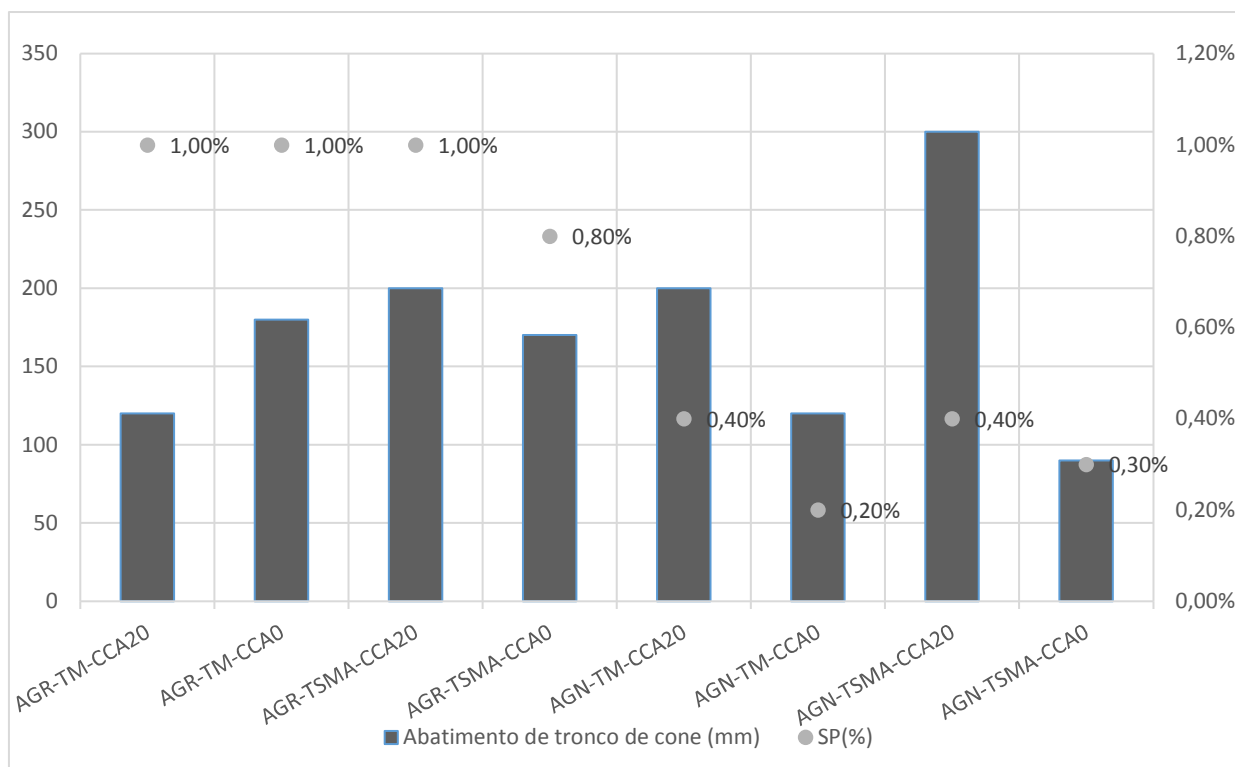
Os AGR secos em ambiente proporcionaram ao concreto melhor trabalhabilidade, verificada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone. A umidade presente nos AGR não alterou a resistência à compressão do concreto produzido, conforme teste ANOVA. Optou-se, então, pela produção de traços de concreto com uso de AGR secos em ambiente, sem a secagem dos AGR em estufa antes da concretagem.

4.4.2. Trabalhabilidade

Os resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone para as misturas executadas durante o estudo foram divididos em concretos de agregados reciclados e concretos de agregados naturais e estão presentes na Figura 37. A trabalhabilidade dos concretos variou em função da quantidade de aditivo superplastificante, método de mistura, teor de AGR e teor de adição de cinzas de casca de arroz. Foi adicionada

maior quantidade de aditivo superplastificante aos concretos produzidos com agregados reciclados, devido à sua maior capacidade de absorção de água, o que possui impacto negativo na trabalhabilidade do concreto. Todos os traços ensaiados atingiram níveis de abatimento de tronco de cone superiores ou iguais a 8 mm.

Figura 37 - Resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone e teores de aditivo superplastificante utilizados nas misturas.



Fonte: O autor (2019).

Para o manuseio do concreto, foi necessário o uso de maiores teores de SP, entre 1,0% e 0,8%, nos traços onde foram empregados 100% de agregados reciclados. Os traços produzidos com agregados naturais tiveram teor de SP variando entre 0,4% e 0,2%, em função do teor de CCA utilizado e do método de mistura empregado. A adição de cinzas de casca de arroz foi outro parâmetro que reduziu a trabalhabilidade do concreto. Padhi *et al.* (2018) também verificaram perda de trabalhabilidade do concreto com aumento do teor de adição de CCA.

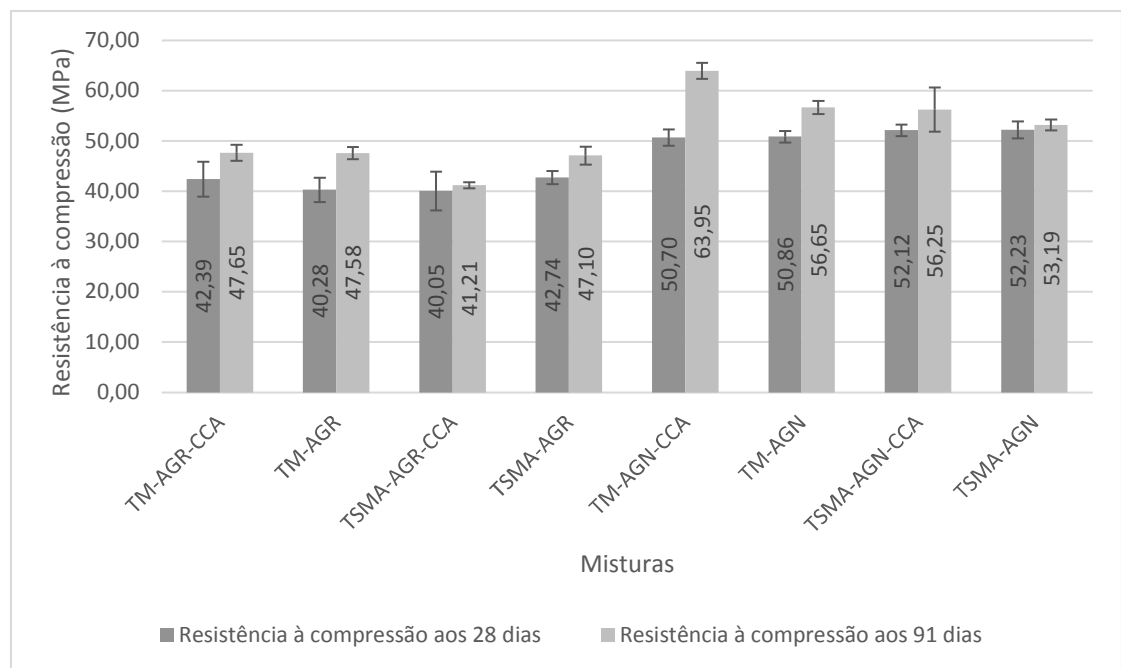
A análise estatística dos resultados de abatimento de tronco de cone não foi realizada, visto que a trabalhabilidade foi medida no momento da concretagem, por

abatimento de tronco de cone, coletando-se apenas um valor de abatimento por traço concretado.

4.4.3. Resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão axial do concreto para as idades de 28 e 91 dias estão representados na Figura 38.

Figura 38 - Resistência à compressão dos concretos ensaiados, aos 28 e 91 dias.



Fonte: O autor (2019).

O resultado da análise de variância (ANOVA) para as misturas apresentadas na Tabela 15 está presente na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultado de análise de variância, resistência à compressão.

Fatores	G.L	Soma Quad	Quad.med.	F	P-valor
Método de mistura	1	43,1	43,1	9,3	0,00463
Agregado reciclado	1	1418,1	1418,1	304,8	< 2e-16
Cinzas	1	2,6	2,6	0,6	0,46236
Idade	1	334,2	334,2	71,8	1,1e-09
Método de mistura:Agregado reciclado	1	0,5	0,5	0,1	0,75508
Método de mistura:Cinzas	1	41,9	41,9	9,0	0,00516
Método de mistura:Idade	1	82,6	82,6	17,8	0,00019
Agregado reciclado:Cinzas	1	51,1	51,1	11,0	0,00230
Cinzas:Idade	1	5,5	5,5	1,2	0,28600

Agregado reciclado:Idade	1	6,9	6,9	1,5	0,23329
Método de mistura:Agregado reciclado:Cinzas	1	8,1	8,1	1,7	0,19648
Método de mistura:Cinzas:Idade	1	5,6	5,6	1,2	0,28164
Método de mistura:Agregado reciclado:Idade	1	8,9	8,9	1,9	0,17599
Agregado reciclado:Cinzas:Idade	1	47,1	47,1	10,1	0,00323
Método de mistura:Agregado reciclado:Cinzas:Idade	1	1,8	1,8	0,4	0,53414
Resíduos	32	149	5		
Soma Quad.: Soma dos quadrados					
G.L: Graus de liberdade					
Quad.med.: Quadrado médio					

Fonte: O autor (2019).

Os valores da última coluna da Tabela 22 (P-valor), foram comparados com o nível de significância adotado na pesquisa (5%), marcando em negrito aqueles menores que 5%. Os fatores ou a interação entre fatores cujas linhas apontam p-valor inferior a 5% na Tabela 22 possuem influência estatística na resistência à compressão do concreto, sendo eles:

- método de mistura adotado;
- teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados (representado pelo fator agregado reciclado),
- tempo de cura do concreto, ou idade de rompimento dos corpos de prova (representado pelo fator idade).

O parâmetro de adição de cinzas de casca de arroz (representado pelo fator cinzas), quando avaliado isoladamente, não mostrou ter influência estatística significativa na resistência à compressão.

Algumas interações entre os fatores mostraram ter influência sobre a variável de resposta avaliada, sendo elas as interações entre:

- método de mistura adotado e teor de adição de CCA;
- método de mistura adotado e idade de rompimento dos corpos de prova;
- teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados e teor de adição de CCA;

- teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados, teor de adição de CCA e idade de rompimento dos corpos de prova.

A partir da identificação pela ANOVA dos fatores que influenciam a resistência à compressão dos concretos produzidos, foi executado o teste de Tukey. O teste indica entre quais grupos a diferença de médias é significativa, comparando as médias entre os grupos, ou seja, entre fatores, e comparando duas a duas as médias de resistência à compressão das misturas listadas na Tabela 15.

Para valores de p (P-valor) inferiores a 5%, considera-se que a comparação entre as misturas ou fatores analisados indica diferença. Os valores de p inferiores a 5% foram destacados em negrito, buscando facilitar sua identificação, nas tabelas dispostas ao longo desta seção.

A coluna com o nome “Dif.” das tabelas dispostas a seguir, demonstra a diferença entre os dois fatores analisados na respectiva linha. É feita a operação do fator 2 menos fator 1. No caso da Tabela 23 a coluna “Dif.” representa a operação “nível 2” menos “nível 1”.

O resultado do teste de Tukey para resistência à compressão está presente na Tabela 56 à Tabela 67 do Apêndice A.

As tabelas presentes nesta seção foram adaptadas dos resultados do teste de Tukey presentes nos apêndices deste trabalho. Foram destacados em negrito os fatores que variam de uma mistura para outra, na mesma linha, buscando facilitar a interpretação dos resultados. As linhas onde utilizou-se o símbolo de “=” entre os dois fatores analisados apontam que a diferença entre ambos não é estatisticamente significativa, ou seja, $p\text{-valor} > 0,05$ para o teste de Tukey. Onde utilizou-se os símbolos “<” e “>” indica-se que há diferença estatística entre os fatores ($p\text{-valor}$ inferior a 0,05), com o símbolo indicando qual o nível ou mistura que apresenta maior valor para a variável de resposta.

Na Tabela 27 as colunas indicando nível 1 e nível 2 referem-se aos níveis adotados para cada fator. A título de exemplo, o fator método de mistura, na linha 1 da Tabela 27 possui dois níveis: TM e TSMA_{CCA}, que foram os métodos utilizados durante a pesquisa.

A Tabela 23 indica a influência isolada de cada fator e dos níveis adotados sobre a resistência à compressão. Considerando-se apenas os métodos de mistura, os concretos produzidos pelo *Triple Mixing Method* (TM) obtiveram resistência à compressão superior àqueles produzidos pelo *Two Stage Mixing Approach* (TSMA_{CCA}), em média 1,89 MPa, conforme a linha 1 da Tabela 23.

Tabela 23 - Teste de Tukey para fatores isolados, na variável de resposta de resistência à compressão.

Linha	Fator	Nível 1	Comparação	Nível 2	Dif. (Mpa)
1	Método de mistura	TSMA _{CCA}	<	TM	-1,896
2	Teor de AGR	AGR	<	AGN	-10,871
3	Teor de CCA	Sem adição	=	20% CCA	-0,463
4	Idade	91d	>	28d	5,277

Fonte: O autor (2019).

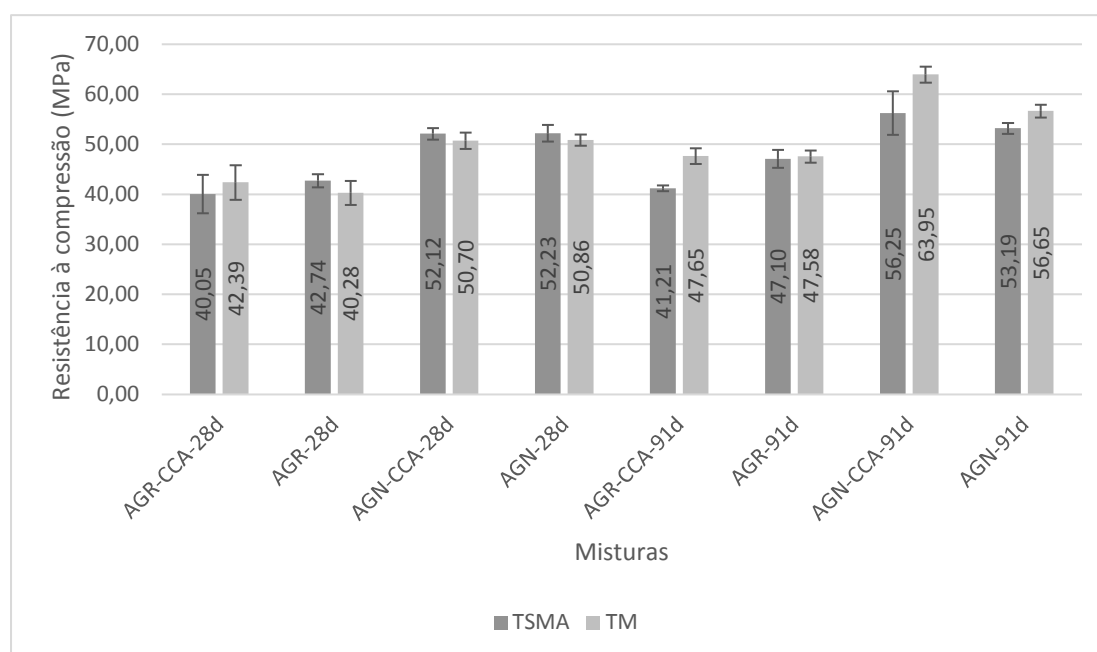
A Figura 39 e a Tabela 24 apontam as diferenças entre os traços ensaiados, separados pelo método de mistura adotado. A resistência à compressão não foi afetada aos 28 dias pela variação no método de mistura (linhas 1, 2, 3 e 4, Tabela 24). Aos 91 dias, a resistência foi afetada pelo uso de diferentes métodos de mistura, quando utilizada no traço a CCA (linhas 7 e 5, da Tabela 24).

4.4.3.1. Comparação entre concretos com diferentes métodos de mistura

Ambos os métodos de mistura utilizados nesta pesquisa possuem como fundamento o encapsulamento dos agregados graúdos com material pozolânico, como adotado nas pesquisas de Kong *et al.* (2010); Li, Xiao, Zhou (2009); Tam e Tam (2008) e Zhang *et al.* (2019)

O p-valor obtido pela comparação da linha 5 foi ligeiramente maior que o nível de significância de 5% adotado, podendo ser considerada significativa a diferença entre as misturas.

Figura 39 – Resistência à compressão dos concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes métodos de mistura utilizados (valores médios representados dentro das barras).



Fonte: O autor (2019).

Tabela 24 - Comparação entre concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, mantendo constante o teor de AGR, teor de CCA e idade.

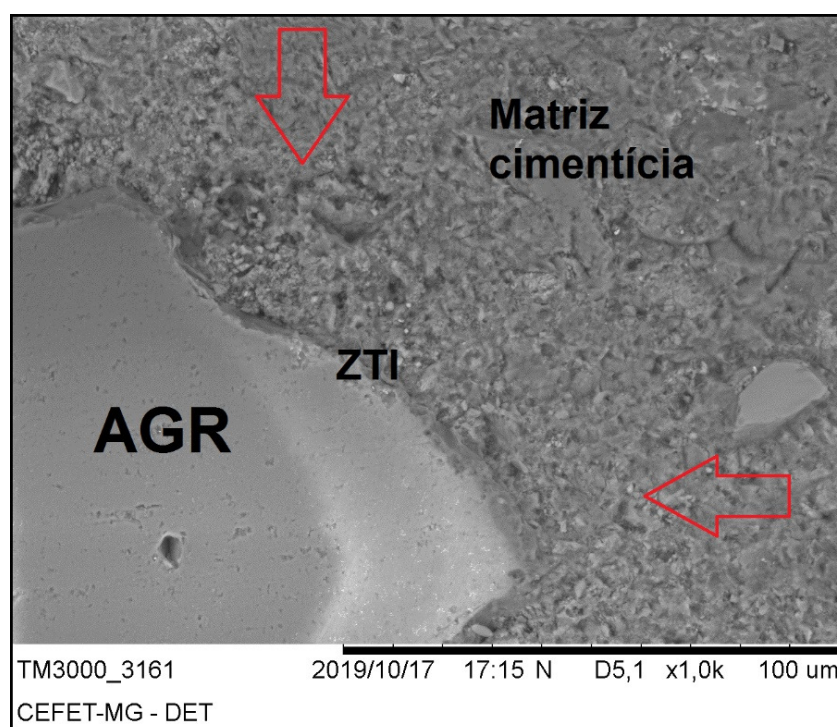
Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	P-valor
1	TSMA-AGR-CCA-28d	=	TM-AGR-CCA-28d	0,991446
2	TSMA-AGR-28d	=	TM-AGR-28d	0,986146
3	TSMA-AGN-CCA-28d	=	TM-AGN-CCA-28d	0,999969
4	TSMA-AGN-28d	=	TM-AGN-28d	0,999998
5	TSMA-AGR-CCA-91d	<	TM-AGR-CCA-91d	0,0560841**
6	TSMA-AGR-91d	=	TM-AGR-91d	1
7	TSMA-AGN-CCA-91d	<	TM-AGN-CCA-91d	0,009513
8	TSMA-AGN-91d	=	TM-AGN-91d	0,827567

Fonte: O autor (2019).

Foram obtidos maiores valores de resistência à compressão para uso do TM, em comparação ao TSMA quando utilizadas cinzas de casca de arroz e aos 91 dias. A maior resistência à compressão, obtida pelo uso do TM aos 91 dias com a adição de CCA, pode ser explicada pela reação pozolânica em idades mais elevadas das cinzas de casca de arroz e pelo aumento da densidade da zona de transição interfacial proporcionado pelo TM. Ao serem comparadas as imagens obtidas dos traços de

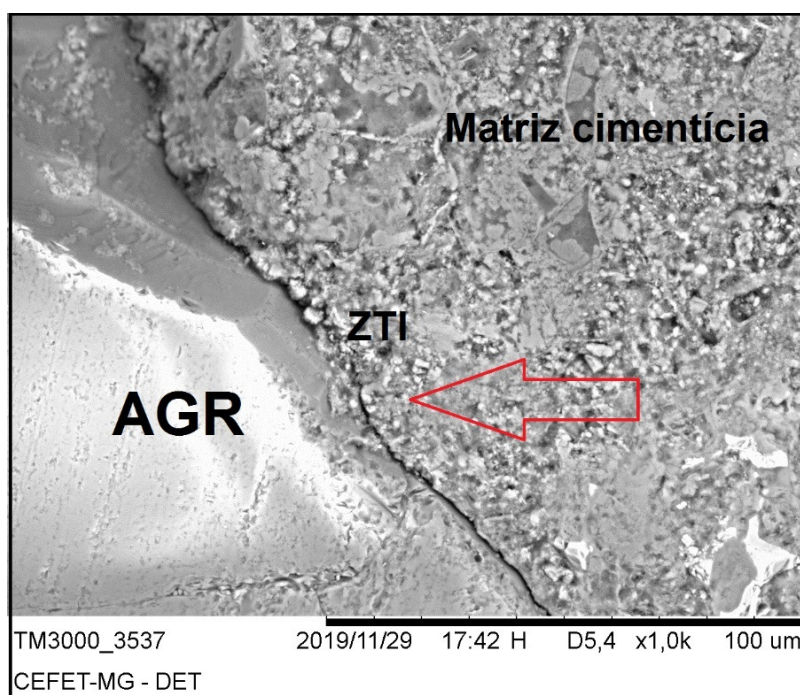
concreto produzidos pelos métodos de mistura TM e TSMA, ambos com adição de CCA, aparentemente há um aumento da densidade da ZTI, podendo indicar maior presença de material pozolânico e cristais de C-S-H no local, como verificado por Kong *et al.* (2010). A Figura 40 é o resultado do MEV direcionado à ZTI, com as setas apontando para a zona de transição, do traço TM-AGR-CCA em idade próxima aos 91 dias. A Figura 41 é o resultado da microscopia do traço TSMA-AGR-CCA em idade próxima aos 91 dias. Ambas as imagens foram ampliadas em 1000 vezes, como apontado na Figura 40 e Figura 41.

Figura 40 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TM-AGR-CCA, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.



Fonte: O autor (2019).

Figura 41 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TSMA-AGR-CCA, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.

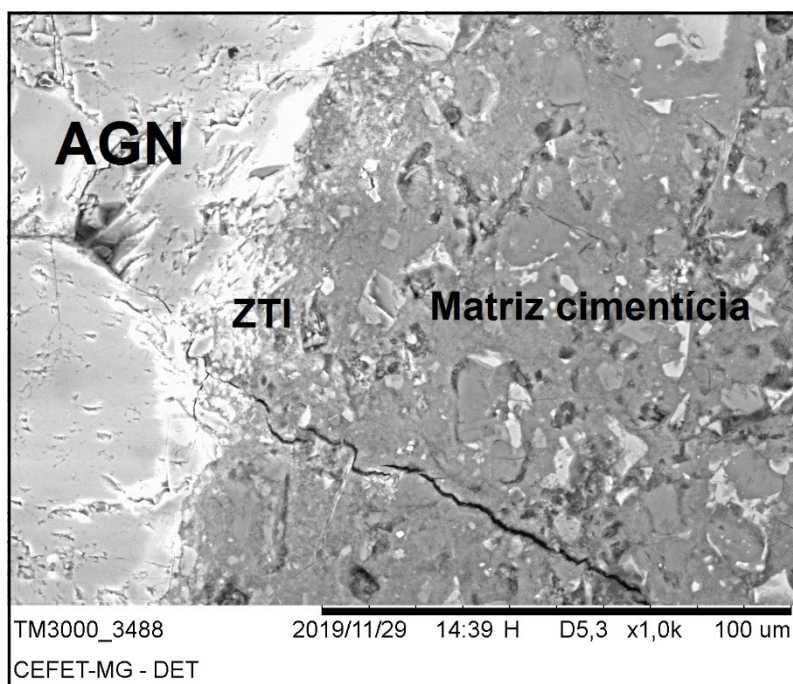


Fonte: O autor (2019).

O uso do TM, associado à adição de 20% de CCA no concreto com 100% de AGR, parece ter proporcionado uma separação menos distinta entre AGR e pasta cimentícia, conforme Figura 40. O uso do TSMA_{CCA} nas mesmas condições não promoveu uma integração tão densa entre AGR e matriz, como apontado pela Figura 41, onde é mais nítida a separação entre AGR e ZTI.

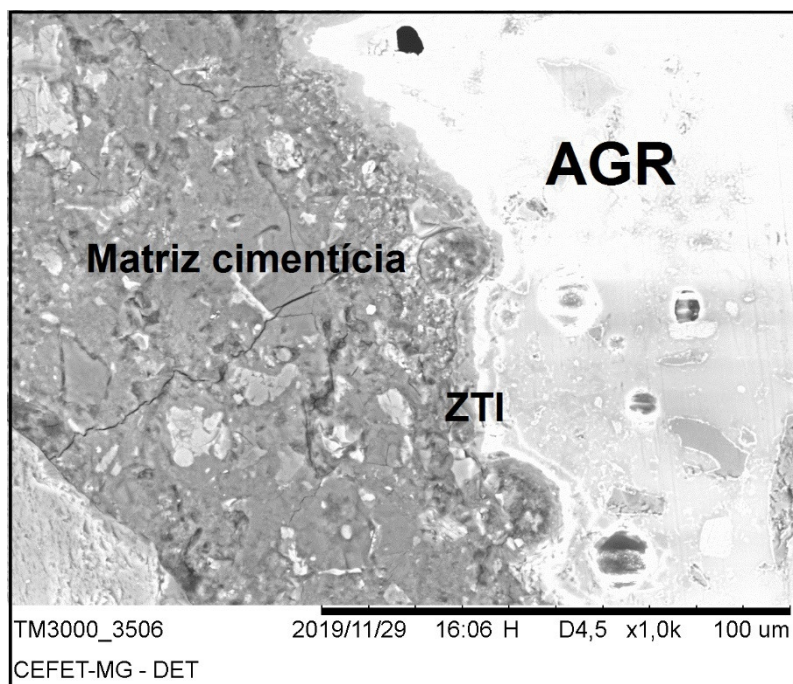
O método de mistura em três etapas (TM) também parece ter promovido um aumento na densidade da ZTI quando utilizados agregados reciclados sem adição de CCA (traço TM-AGR) e agregados naturais com adição de CCA (TM-AGN-CCA), como mostrado na Figura 42 e Figura 43, respectivamente. A separação mais nítida entre matriz cimentícia e agregado quando utilizado o TSMA_{CCA} também pode ser visualizada na Figura 44.

Figura 42 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TM-AGN-CCA, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.



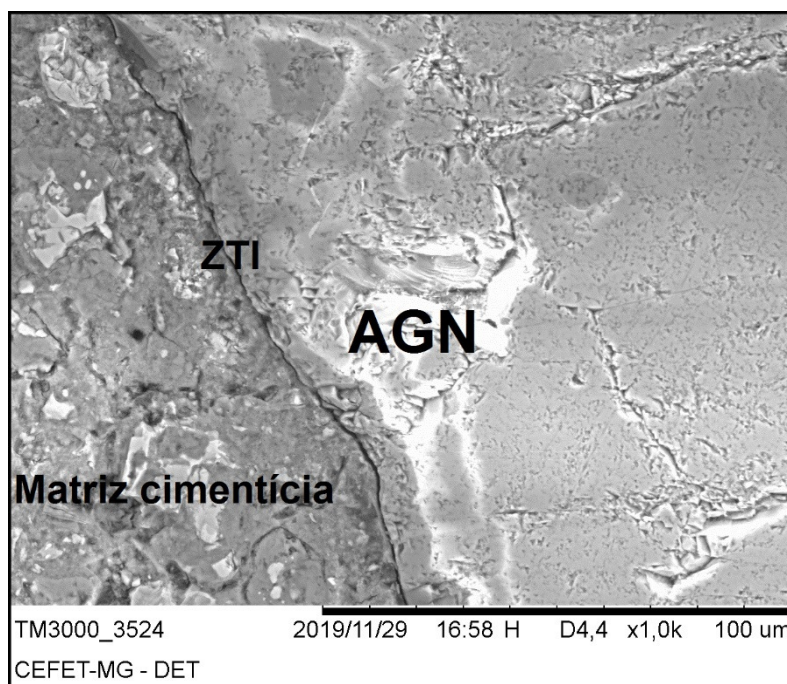
Fonte: O autor (2019).

Figura 43 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TM-AGR, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.



Fonte: O autor (2019).

Figura 44 - Microscopia eletrônica de varredura, mistura TSMA-AGN, direcionada à ZTI entre agregado reciclado e matriz cimentícia.



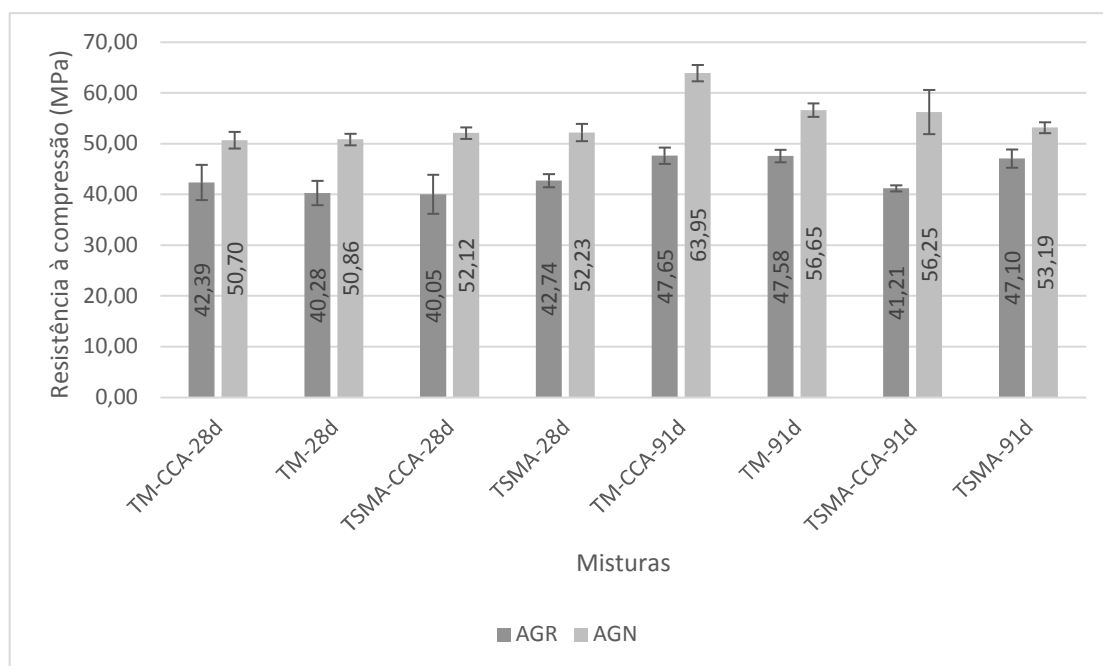
Fonte: O autor (2019).

4.4.3.2. Comparação entre concretos com diferentes teores de AGR

Quando comparados concretos produzidos com agregados reciclados e os produzidos com agregados naturais, os concretos com AGR obtiveram resistência à compressão inferior aos concretos de agregados naturais. A Figura 45 ilustra a diferença entre misturas produzidas com mesmo teor de CCA, mesmo método de mistura e ensaiadas às mesmas idades, com diferentes quantidades de AGR. A Tabela 25 demonstra que, das comparações apresentadas, todas, exceto a da linha 8, apresentam diferença estatística, indicando que a mudança no teor de AGR de zero para 100% possui interferência na resistência à compressão dos traços ensaiados.

A última coluna da Tabela 25 compara a resistência à compressão das duas misturas analisadas na respectiva linha, indicando o quanto a resistência do concreto de agregados reciclados se aproxima da resistência do concreto de agregados naturais, produzido pelo mesmo método, com mesma quantidade de CCA em mesma idade.

Figura 45 – Resistência à compressão de concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes teores de AGR (valores médios representados dentro das barras).



Fonte: O autor (2019).

Tabela 25 - Comparação entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes teores de AGR, mantendo constante o teor de CCA, método de mistura e idade.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	P-valor	AGR100 AGRO
1	TM-AGR-CCA-28d	<	TM-AGN-CCA-28d	0,003730	83,61%
2	TM-AGR-28d	<	TM-AGN-28d	0,000104	79,20%
3	TSMA-AGR-CCA-28d	<	TSMA-AGN-CCA-28d	0,000009	76,84%
4	TSMA-AGR-28d	<	TSMA-AGN-28d	0,000596	81,83%
5	TM-AGR-CCA-91d	<	TM-AGN-CCA-91d	0	74,51%
6	TM-AGR-91d	<	TM-AGN-91d	0,001154	83,99%
7	TSMA-AGR-CCA-91d	<	TSMA-AGN-CCA-91d	0	73,26%
8	TSMA-AGR-91d	=	TSMA-AGN-91d	0,087919	88,55%

Fonte: O autor (2019).

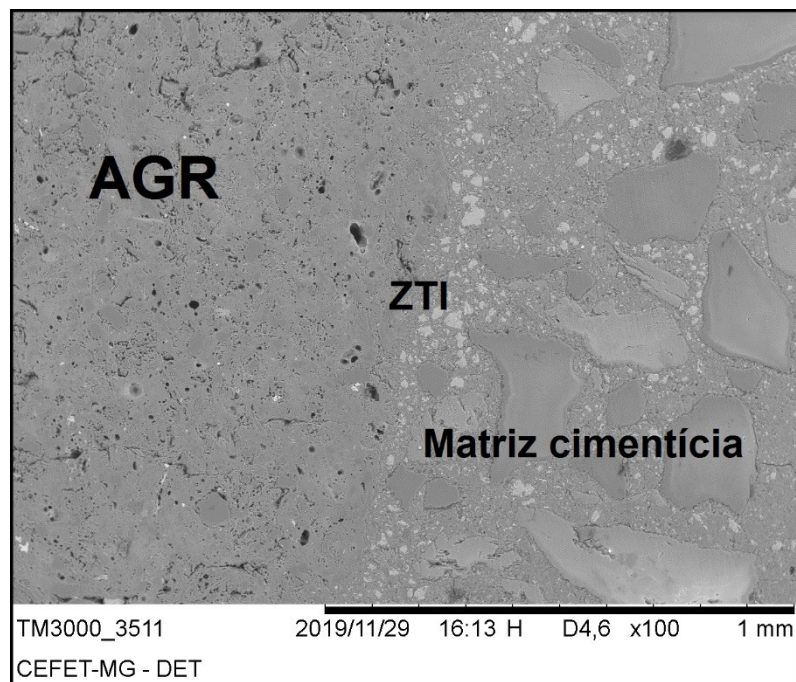
Foi avaliada a influência dos métodos de mistura, níveis de CCA utilizados e idade nos concretos produzidos com agregados naturais e agregados reciclados, separadamente.

A resistência à compressão atingida pelos concretos de agregados reciclados, foi de 73% a 88% da resistência dos concretos de agregados naturais, produzidos pelo mesmo método de mistura e teor de CCA.

Em comparação aos agregados naturais utilizados neste estudo, os AGR apresentaram menor massa específica e maior nível de absorção de água e porosidade aparente: 10,39% de absorção de água e 20,75% de porosidade dos AGR contra 0,48% de absorção de água e porosidade aparente de 1,25% dos AGN. A maior porosidade e maior absorção de água dos AGR frente aos AGN contribuiu para a menor resistência à compressão e maior teor de absorção de água obtidos pelos concretos de agregados reciclados, em concordância ao apontado pela literatura.

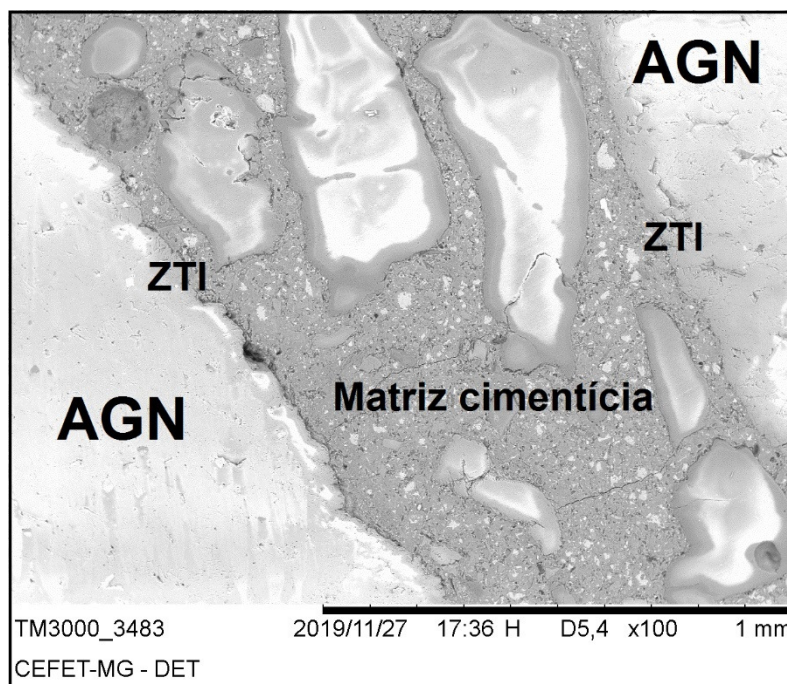
A diferença entre porosidade dos AGR e dos AGN é apresentada na Figura 46 e Figura 47.

Figura 46 - Microscopia eletrônica de varredura, traço produzido com AGR.



Fonte: O autor (2019).

Figura 47 - Microscopia eletrônica de varredura, traço com AGN.



Fonte: O autor (2019).

Kong *et al.* (2010), produziram, com uso do TM e adições pozolânicas, concretos de agregados reciclados cuja resistência à compressão chegou a 99,6% da resistência de concretos de agregados naturais. Não foram atingidos, neste estudo, os mesmos níveis de proximidade de resistência à compressão entre concretos com 100% AGR e concretos de agregados naturais.

O uso da CCA como adição pozolânica e o tipo de AGR utilizado nesta pesquisa podem ter sido fatores que contribuíram para a não obtenção de maior proximidade de resistência à compressão entre concretos de AGR e AGN.

A forma angular das cinzas de casca de arroz pode não favorecer sua entrada nos poros dos agregados. Na pesquisa de Kong *et al.* (2010) foram utilizadas sílica ativa e cinzas volantes para encapsulamento dos agregados, cuja forma é arredondada, o que pode facilitar o encapsulamento dos AGR, em comparação com as cinzas de casca de arroz.

A qualidade dos agregados reciclados utilizados possui influência nas propriedades mecânicas do concreto (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002; MALEŠEV; RADONJANIN; MARINKOVIĆ, 2010; POON; SHUI; LAM, 2004; SAGOE-

CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001). Os agregados reciclados utilizados por Kong *et al.* (2010) possuem maior massa específica e menor absorção de água que os AGR utilizados nesta pesquisa. Os autores utilizaram AGR produzidos após processo específico de britagem, a partir de um concreto de origem com resistência à compressão de 40 MPa.

Nesta pesquisa, foram utilizados agregados reciclados mistos, com resíduos cerâmicos e impurezas em sua composição, sem definição da resistência à compressão dos eventuais resíduos de concreto e argamassa presentes em sua constituição. A maior absorção de água e menor massa específica dos AGR utilizados podem ter contribuído para não alcançar, neste estudo, resultados semelhantes aos de Kong *et al.* (2010).

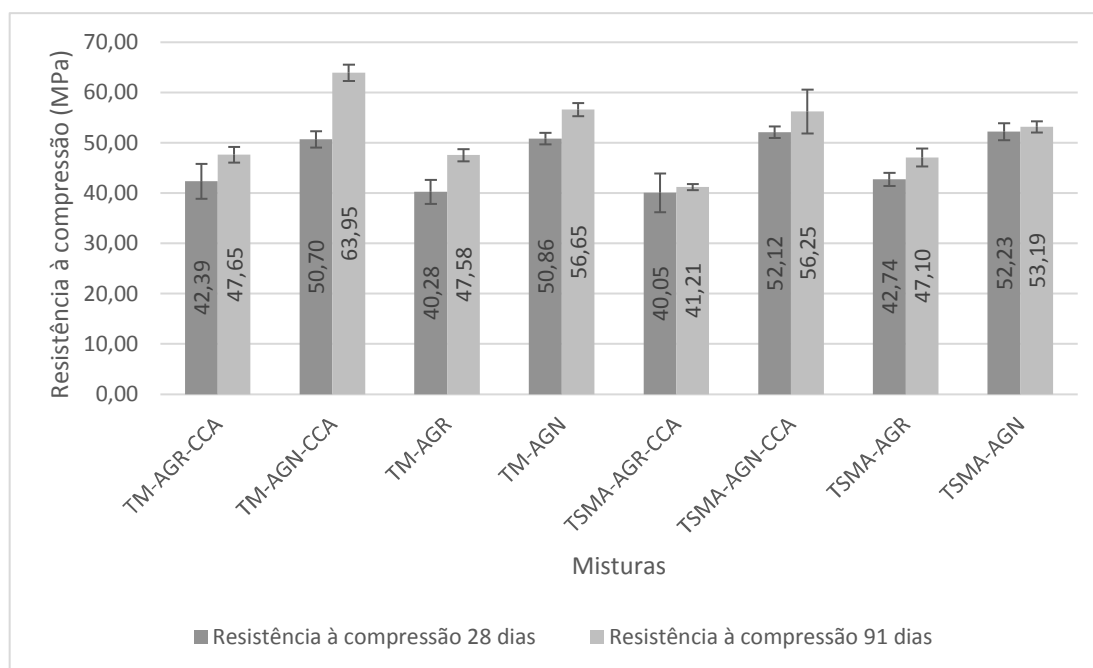
4.4.3.3. Comparação entre concretos com diferentes teores de CCA

Ao ser analisado o parâmetro de adição de cinzas de casca de arroz isoladamente, não foi apontada diferença entre os traços produzidos com adição de 20% de CCA e aqueles produzidos sem o material (linha 3, Tabela 23). O fato é positivo no que diz respeito à sustentabilidade de compostos cimentícios, dado que, com uma substituição de 20% do cimento por um resíduo foram produzidos concretos com menor teor de CO₂ incorporado, cuja resistência à compressão igualou-se à de concretos produzidos com maior teor de cimento.

4.4.3.4. Comparação entre concretos ensaiados em diferentes idades

Foi apontada diferença entre os concretos ensaiados em 28 e 91 dias após a concretagem. A resistência à compressão obtida para os 91 dias de cura foi, em média, 5,28 MPa superior à resistência à compressão em 28 dias (linha 4, Tabela 23). O ganho de resistência à compressão por idade está representado pela Figura 48 e Tabela 26. Nenhum dos traços produzidos pelo TSMA_{CCA} registrou diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão, quando variada apenas a idade dos ensaios (linhas 5, 6, 7 e 8, Tabela 26). Dois traços produzidos pelo TM apresentaram ganho de resistência com idade, segundo teste de Tukey, representados pelas linhas 2 e 3 da Tabela 26.

Figura 48 - Resistência à compressão de concretos aos 28 e 91 dias (valores médios representados dentro das barras).



Fonte: O autor (2019).

Tabela 26 - Comparação entre concretos ensaiados em diferentes idades, mantendo constante o teor de AGR, teor de CCA e método de mistura.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	P-valor
1	TM-AGR-CCA-28d	=	TM-AGR-CCA-91d	0,228185
2	TM-AGN-CCA-28d	<	TM-AGN-CCA-91d	1,5E-06
3	TM-AGR-28d	<	TM-AGR-91d	0,017112
4	TM-AGN-28d	=	TM-AGN-91d	0,127688
5	TSMA-AGR-CCA-28d	=	TSMA-AGR-CCA-91d	0,999998
6	TSMA-AGN-CCA-28d	=	TSMA-AGN-CCA-91d	0,595684
7	TSMA-AGR-28d	=	TSMA-AGR-91d	0,512564
8	TSMA-AGN-28d	=	TSMA-AGN-91d	1

Fonte: O autor (2019).

4.4.3.5. Comparação considerando método de mistura e teor de AGR

Os resultados do teste de Tukey para os parâmetros estão presentes na Tabela 57 (Apêndice A) e resumidos na Tabela 27. Não foi apontada diferença estatística entre misturas produzidas com o mesmo teor de agregados reciclados e diferentes métodos de mistura (linha 1 e linha 6 da Tabela 27). Para variações no teor de AGR,

os concretos produzidos com agregados naturais obtiveram resistência à compressão superior aos produzidos com agregados reciclados (linhas 2 e 5 da Tabela 27). Quando há variação de método de mistura junto com teor de AGR os maiores valores de resistência à compressão pertencem aos traços produzidos com agregados naturais (AGN) (linhas 3 e 4, Tabela 27).

Tabela 27 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações em métodos de mistura e teor de AGR.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA-AGN	=	TM-AGN	-2,09182
2	TM-AGR	<	TM-AGN	-11,0668
3	TSMA-AGR	<	TM-AGN	-12,7668
4	TM-AGR	<	TSMA-AGN	-8,97496
5	TSMA-AGR	<	TSMA-AGN	-10,675
6	TSMA-AGR	=	TM-AGR	-1,70001

Fonte: O autor (2019).

4.4.3.6. Comparações considerando método de mistura e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA)

O teste estatístico realizado considerando método de mistura e teor de CCA teve seus resultados expostos na Tabela 58 (Apêndice A) e resumidos na Tabela 28.

Tabela 28 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações em métodos de mistura e teor de CCA.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA-CCA	<	TM-CCA	-3,76552
2	TM	=	TM-CCA	-2,33279
3	TSMA	=	TM-CCA	-2,35911
4	TM	=	TSMA-CCA	1,432728
5	TSMA	=	TSMA-CCA	1,406408
6	TSMA	=	TM	-0,02632

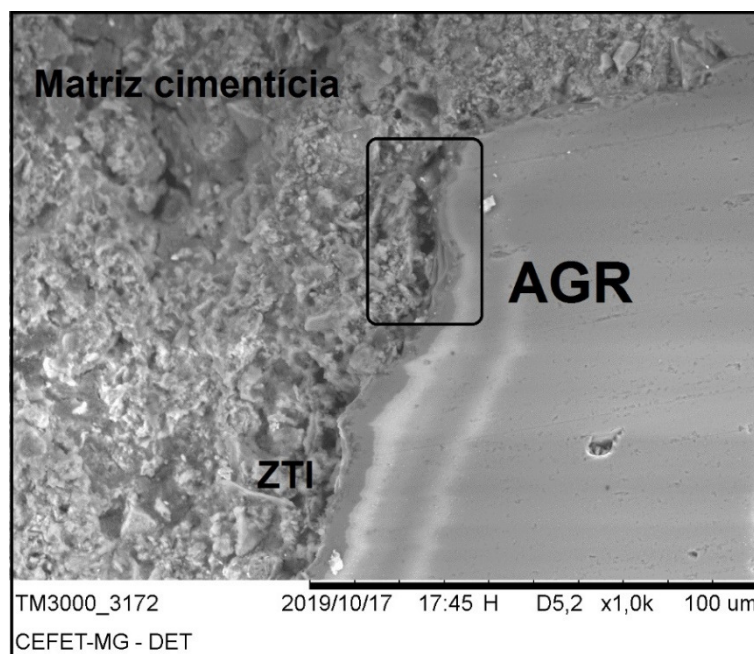
Fonte: O autor (2019).

Não foi apontada diferença estatística entre a resistência à compressão dos concretos produzidos com teor de 20% de CCA e os produzidos sem a adição de cinzas, para um mesmo método de mistura e nem quando os métodos foram variados (linhas 2, 3, 4, 5 da Tabela 28). Para concretos sem adição de CCA não foi apontada

diferença pelo uso de diferentes métodos de mistura (linha 6, Tabela 28). Entre os parâmetros avaliados, só houve diferença significativa quando comparados traços produzidos pelo TSMA, com adição de 20% de CCA e traços produzidos pelo TM, com adição de 20% de CCA, onde foi obtida maior resistência à compressão pelo uso do TM (linha 1, Tabela 28).

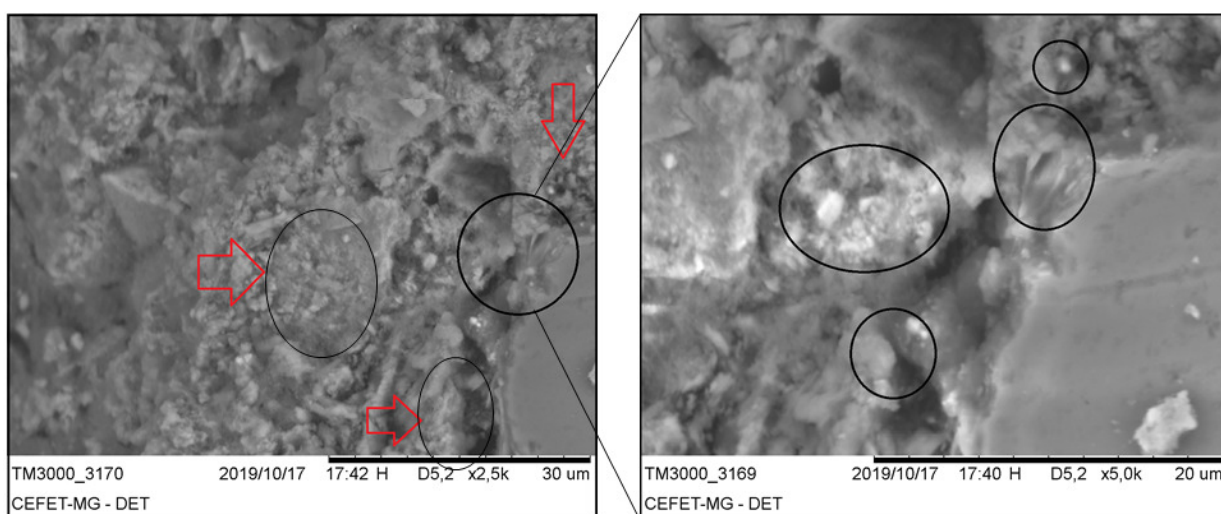
Na microscopia dos concretos preparados pelo TM, a Figura 49 apresenta uma visão mais geral da ZTI, enquanto a Figura 50 consiste de duas ampliações sucessivas do local. Os pontos indicados por setas e circulados apontam a presença de concentrações de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na zona de transição interfacial. É observada também baixa concentração de Ca(OH)_2 no local. A partir da ampliação da Figura 50, é ilustrada a presença das cinzas de casca de arroz na ZTI (circuladas na ampliação). As CCA agem como pontos de nucleação para a formação de C-S-H ao seu redor, onde o SiO_2 presente nas cinzas reage com o hidróxido de cálcio presente na pasta e poros do agregado, fortalecendo a ZTI.

Figura 49 - Microscopia eletrônica de varredura, traço TM-AGR-CCA, focando zona de transição interfacial



Fonte: O autor (2019).

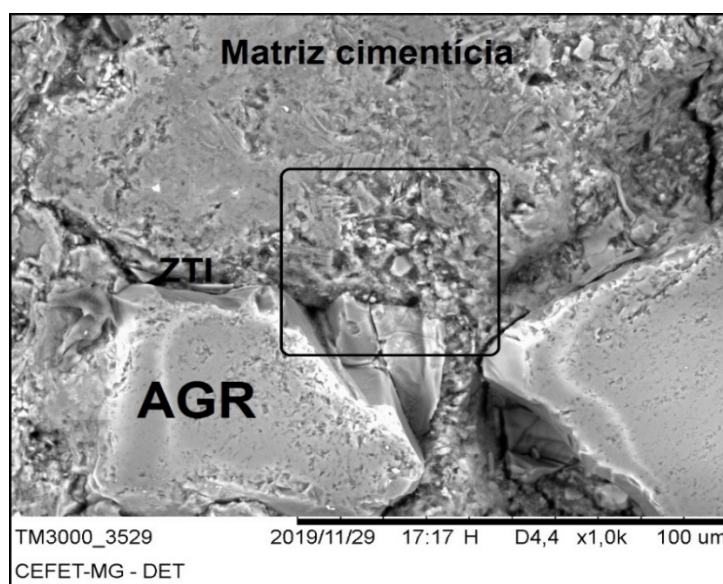
Figura 50 - Ampliações da Figura 49, apontando formação de C-S-H na ZTI e CCA agindo como pontos de nucleação para formação de C-S-H



Fonte: O autor (2019).

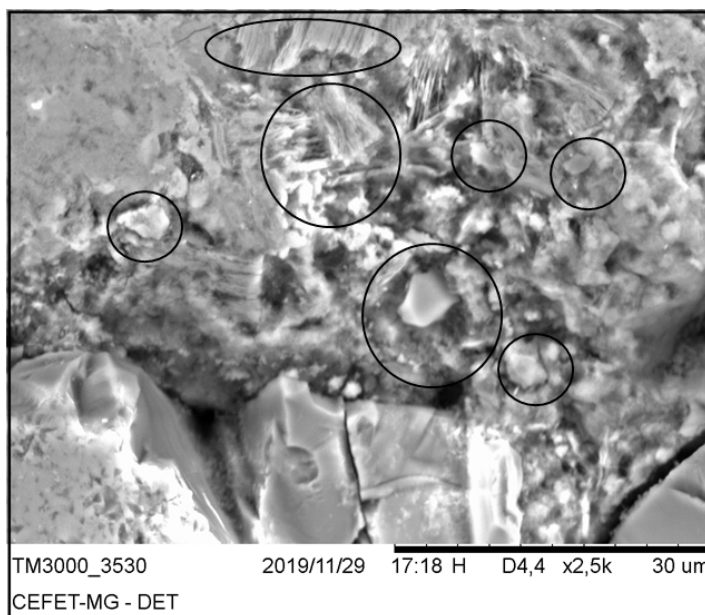
A Figura 51 e a Figura 52 apresentam a ZTI dos concretos produzidos pelo TSMACCA. É notada a maior concentração de cristais de hidróxido de cálcio na região e a ZTI menos densa em comparação ao TM, como destacado. A Figura 51 apresenta uma visão mais abrangente da ZTI, agregado e matriz, a Figura 52 é uma ampliação da primeira, com os pontos de presença de cristais de Ca(OH)_2 circulados.

Figura 51 - Microscopia eletrônica de varredura, TSMACCA-AGR-CCA, focando zona de transição interfacial



Fonte: O autor (2019).

Figura 52 - Ampliação da Figura 51, traço TSMA-AGR-CCA, destacando presença de cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição interfacial



Fonte: O autor (2019).

Os concretos produzidos pelo TSMA_{CCA} apresentaram maior presença de cristais de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na zona de transição interfacial entre agregado e pasta. A maior presença do hidróxido de cálcio na ZTI aponta que a CCA não consumiu grandes quantidades de Ca(OH)_2 , gerando menor quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na zona de transição e, conseqüentemente, deixando-a mais fraca, quando comparada à ZTI de concretos produzidos pelo TM.

4.4.3.7. Comparações considerando método de mistura e tempo de cura do concreto (Idade)

Resultados do teste de Tukey para variações no método de mistura e na idade do concreto estão presentes na Tabela 59 (Apêndice A) e resumidos na Tabela 29. Quando analisados apenas método de mistura e idade, todas as comparações entre traços com variação de idades (28 e 91 dias) apresentaram diferenças significativas, com os maiores valores de resistência à compressão para as misturas ensaiadas aos 91 dias (linhas 2, 3, 4, 5, Tabela 29), o que representa o ganho de resistência à compressão do concreto dos 28 para 91 dias.

Tabela 29 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações em métodos de mistura e idade.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA-28d	=	TM-28d	0,728059
2	TM-91d	>	TM-28d	7,901088
3	TSMA-91d	>	TM-28d	3,381194
4	TM-91d	>	TSMA-28d	7,173029
5	TSMA-91d	>	TSMA-28d	2,653135
6	TSMA-91d	<	TM-91d	-4,51989

Fonte: O autor (2019).

A comparação entre TSMA-28d e TM-28d (métodos de mistura diferentes, ensaiados aos 28 dias) não apontou diferença significativa de resistência à compressão (linha 1, Tabela 29). Aos 91 dias, foi apontada diferença estatisticamente significativa entre os métodos de mistura adotados (linha 6, Tabela 29). As comparações indicam que aos 28 dias os métodos de mistura não interferem na resistência à compressão. Aos 91 dias, o TM mostrou proporcionar maior resistência à compressão que o TSMA_{CCA}.

4.4.3.8. Comparações considerando teor de agregados reciclados e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA)

A Tabela 60 (Apêndice A) e a Tabela 30 apresentam os resultados do teste de Tukey para variação do teor de AGR e teor de CCA.

Tabela 30 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações de teor de AGR e teor de CCA.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	AGR-CCA	<	AGN-CCA	-12,9339
2	AGN	<	AGN-CCA	-2,52618
3	AGR	<	AGN-CCA	-11,3341
4	AGN	>	AGR-CCA	10,40769
5	AGR	=	AGR-CCA	1,599799
6	AGR	<	AGN	-8,80789

Fonte: O autor (2019).

Todas as comparações onde foram colocados concretos com diferentes teores de AGR apontaram diferença estatisticamente significativa, onde o concreto de

agregados naturais exibiu resistência à compressão superior ao de agregados reciclados (linhas 1, 3, 4, 6, Tabela 30). O uso de 20% de cinzas de casca de arroz, para concretos de agregados naturais (AGN), causou aumento médio de 2,53 MPa, quando não utilizadas as cinzas (linha 2, Tabela 30). Em concretos produzidos com 100% de AGR não foi apontada diferença estatística pelo uso da CCA (linha 5, Tabela 30).

4.4.3.9. Comparações considerando teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade)

A análise estatística considerando-se teor de CCA e idade está apresentada na Tabela 61 (Apêndice A) e Tabela 31.

Tabela 31 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações de teor de CCA e idade.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	CCA0-28d	=	CCA-28d	0,212427
2	CCA-91d	>	CCA-28d	5,952728
3	CCA0-91d	>	CCA-28d	4,813922
4	CCA-91d	>	CCA0-28d	5,740301
5	CCA0-91d	>	CCA0-28d	4,601494
6	CCA0-91d	=	CCA-91d	-1,13881

Fonte: O autor (2019).

Os concretos ensaiados aos 91 dias apontaram maior resistência à compressão, comparados àqueles ensaiados aos 28 dias, independentemente do teor de CCA utilizado (linhas 2, 3, 4, 5 da Tabela 31). Não foram apontadas diferenças estatísticas significativas entre misturas ensaiadas às mesmas idades, com diferentes teores de CCA, quando o outro fator considerado é apenas idade de rompimento (linha 1 e linha 6, Tabela 31).

O ganho de resistência à compressão decorrente do uso de cinzas de casca de arroz se dá em idades mais elevadas (PADHI *et al.*, 2018), o que justifica o fato de, aos 28 dias não ter sido apontada diferença na resistência à compressão com variação apenas do teor de CCA.

Os valores da linha 6, Tabela 31 representam uma média para comparação dos traços produzidos com e sem adição de CCA, aos 91 dias. Quando feita a análise considerando-se mais fatores além da idade, apontam-se diferenças na resistência à compressão para diferentes teores de CCA.

4.4.3.10. Comparações considerando teor de agregados reciclados (AGR) e tempo de cura do concreto (Idade)

Os resultados para os concretos executados com diferentes teores de AGR em diferentes idades estão expostos na Tabela 62 (Apêndice A) e Tabela 32:

Tabela 32 - Comparações entre resistência à compressão de concretos com variações de teor de AGR e idade.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	AGR-28d	<	AGN-28d	-10,1144
2	AGN-91d	>	AGN-28d	6,03356
3	AGR-91d	<	AGN-28d	-5,59377
4	AGN-91d	>	AGR-28d	16,14799
5	AGR-91d	>	AGR-28d	4,520663
6	AGR-91d	<	AGN-91d	-11,6273

Fonte: O autor (2019).

Foi apontada diferença estatisticamente significativa para todas as comparações realizadas na Tabela 32. Os concretos produzidos com agregados naturais (AGN) apresentaram resistência à compressão superior àqueles produzidos com agregados reciclados, em mesmas idades (linhas 1 e 6, Tabela 32) e em idades diferentes (linha 3 e linha 4, Tabela 32). Foi observado ganho de resistência com idade, de 28 para 91 dias, para concretos com e sem adição de AGR (linhas 2 e 5, Tabela 32).

4.4.3.11. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados (AGR) e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA):

Os resultados do teste de Tukey considerando-se os três parâmetros estão presente na Tabela 63 (Apêndice A). A Tabela 33 apresenta comparações onde apenas um dos três parâmetros é variado por vez, considerando seu efeito isolado.

Tabela 33 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e teores de CCA.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA-AGN-CCA	=	TM-AGN-CCA	-3,14005
2	TSMA-AGR-CCA	<	TM-AGR-CCA	-4,39098
3	TSMA-AGN	=	TM-AGN	-1,04359
4	TSMA-AGR	=	TM-AGR	0,990952
5	TM-AGR	<	TM-AGN	-9,82517
6	TM-AGR-CCA	<	TM-AGN-CCA	-12,3084
7	TSMA-AGR-CCA	<	TSMA-AGN-CCA	-13,5593
8	TSMA-AGR	<	TSMA-AGN	-7,79062
9	TM-AGN	=	TM-AGN-CCA	-3,57441
10	TSMA-AGN	=	TSMA-AGN-CCA	-1,47795
11	TM-AGR	=	TM-AGR-CCA	-1,09117
12	TSMA-AGR	>	TSMA-AGR-CCA	4,290765

Fonte: O autor (2019).

Os concretos produzidos com variação de método de mistura não apresentaram diferença estatística significativa (linhas 1, 3, 4 da Tabela 33), exceto para aqueles com 100% de AGR e 20% de CCA (linha 2, Tabela 33), onde traços produzidos pelo TM obtiveram maior resistência à compressão. Todos os traços produzidos com agregados naturais apresentaram resistência à compressão superior à dos traços produzidos com agregados reciclados, mantendo constantes o teor de CCA e o método de mistura (linhas 5, 6, 7 e 8, Tabela 33).

A variação no teor de CCA mostrou-se relevante estatisticamente apenas para os traços produzidos pelo método TSMA, com 100% de AGR (linha 12, Tabela 33). A variação apenas no teor de CCA não se mostrou significativa para traços produzidos pelo TM com agregados naturais ou reciclados (linhas 9 e 11, Tabela 33) nem para traços produzidos pelo TSMA, quando utilizados agregados naturais (linha 10, Tabela 33).

A variação conjunta de método de mistura (TSMA e TM) e teor de adição de cinzas (0 e 20%) produziu efeito significativo na resistência à compressão dos traços quando associado ao uso de agregados naturais (linha 1 da Tabela 34). A mistura TM-AGN-CCA resultou em um concreto com resistência à compressão em média 4,62 MPa superior, quando comparado ao traço TSMA-AGN. As demais comparações presentes na Tabela 34 não resultaram em diferenças significativas.

Tabela 34 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com mesmo teor de AGR e diferentes métodos de mistura e teores de CCA.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA-AGN	<	TM-AGN-CCA	-4,618
2	TM-AGN	=	TSMA-AGN-CCA	-0,43436
3	TSMA-AGR	=	TM-AGR-CCA	-0,10021
4	TM-AGR	=	TSMA-AGR-CCA	3,299813

Fonte: O autor (2019).

4.4.3.12. Comparações considerando método de mistura, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade):

A Tabela 64 (Apêndice A) apresenta os resultados do teste de Tukey para variações no teor de CCA, idade do concreto e método de mistura. As comparações de concretos com variação de apenas um dos parâmetros por vez são dispostas na Tabela 35.

Tabela 35 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de CCA e idades.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA-CCA-28d	=	TM-CCA-28d	-0,45967
2	TSMA-28d	=	TM-28d	1,915788
3	TSMA-CCA-91d	<	TM-CCA-91d	-7,07136
4	TSMA-91d	=	TM-91d	-1,96843
5	TSMA-91d	=	TSMA- CCA -91d	1,412659
6	TM-91d	=	TM- CCA -91d	-3,69027
7	TSMA-28d	=	TSMA- CCA -28d	1,400156
8	TM-28d	=	TM- CCA -28d	-0,9753
9	TSMA- 91d	=	TSMA- 28d	2,659386
10	TM- 91d	>	TM- 28d	6,543602
11	TSMA-CCA- 91d	=	TSMA-CCA- 28d	2,646883
12	TM-CCA- 91d	>	TM-CCA- 28d	9,258574

Fonte: O autor (2019).

Os ganhos de resistência à compressão em diferentes idades não foram constatados quando comparados concretos produzidos pelo TSMA_{CCA}, mantendo constante o teor de CCA (linhas 9 e 11, Tabela 35).

Os traços produzidos pelo TM, aos 91 dias, com 20% de CCA, mostraram resistência à compressão superior àqueles produzidos pelo TSMA_{CCA} com 20% de CCA (linha 3, Tabela 35). A mesma comparação, sem adição de CCA, não indicou diferença estatística significativa (linha 4, Tabela 35).

Os concretos ensaiados aos 28 dias não tiveram sua resistência à compressão significativamente alterada por variações isoladas nos métodos de mistura ou nos teores de adição de cinzas de casca de arroz (linhas 1, 2, 7, 8 da Tabela 35). O mesmo é válido quando houve variação conjunta de ambos os parâmetros (linhas 1 e 2, Tabela 36). As comparações efetuadas nas linhas 5, 6, 10 e 12 da Tabela 35 não apontaram diferença significativa.

Tabela 36 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com mesmo teor de AGR e diferentes métodos de mistura e teores de CCA.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA-28d	=	TM-CCA-28d	0,940486
2	TM-28d	=	TSMA-CCA-28d	-0,51563
3	TSMA-91d	<	TM-CCA-91d	-5,6587
4	TM-91d	=	TSMA-CCA-91d	3,381088

Fonte: O autor (2019).

A variação de método de mistura e teor de CCA produziu efeito significativo na resistência à compressão aos 91 dias. Os traços produzidos pelo TM, com adição de 20% de CCA mostraram resistência superior aos produzidos pelo TSMA_{CCA}, sem adição das cinzas de casca de arroz (linha 3, Tabela 36). Para as demais situações de variação apresentadas na Tabela 36 (linhas 1, 2 e 4) as diferenças não foram significativas.

4.4.3.13. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)

A Tabela 65 (Apêndice A) apresenta os resultados do teste de Tukey para método de mistura, teor de AGR e idade, com sua variação isolada apresentada pela Tabela 37.

Tabela 37 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e idades.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (MPa)
1	TSMA -AGN-28d	=	TM -AGN-28d	1,393782
2	TSMA -AGR-28d	=	TM -AGR-28d	0,062336
3	TSMA -AGN-91d	<	TM -AGN-91d	-5,57743
4	TSMA -AGR-91d	=	TM -AGR-91d	-3,46236
5	TSMA- AGR -91d	<	TSMA- AGN -91d	-10,5698
6	TM- AGR -91d	<	TM- AGN -91d	-12,6849
7	TM- AGR -28d	<	TM- AGN -28d	-9,44871
8	TSMA- AGR -28d	<	TSMA- AGN -28d	-10,7802
9	TM-AGN- 91d	>	TM-AGN- 28d	9,519163
10	TSMA-AGN- 91d	=	TSMA-AGN- 28d	2,547956
11	TM-AGR- 91d	>	TM-AGR- 28d	6,283013
12	TSMA-AGR- 91d	=	TSMA-AGR- 28d	2,758314

Fonte: O autor (2019).

A variação do teor de AGR apresentou efeito significativo na resistência à compressão, onde os concretos de agregados naturais apresentaram maiores valores que os preparados com agregados reciclados (linhas 5, 6, 7, 8, Tabela 37).

As variações entre métodos de mistura foram significativas apenas para concretos de agregados naturais, ensaiados aos 91 dias (linha 3, Tabela 37), sendo a maior resistência obtida para traços produzidos pelo TM. Os concretos produzidos com o mesmo tipo de agregados, ensaiados aos 28 dias não apresentaram diferença em resistência à compressão pela variação no método (linhas 1 e 2, Tabela 37). O mesmo ocorre para traços com 100% de AGR aos 91 dias, onde é alterado apenas método de mistura (linha 4, Tabela 37).

O teste de Tukey não indicou ganhos de resistência à compressão com a diferença de idade para traços produzidos pelo TSMA, tanto com agregados naturais quanto agregados reciclados (linhas 10 e 12, Tabela 37).

4.4.3.14. Comparações considerando teor de agregados reciclados, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)

A Tabela 66 (Apêndice A) apresenta os resultados do teste de Tukey para os parâmetros teor de AGR, teor de CCA e idade. A variação isolada dos fatores está na Tabela 38.

Tabela 38 - Comparações entre resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes teores de AGR, teores de CCA e idades.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif.
1	AGR-CCA-28d	<	AGN-CCA-28d	-10,1952
2	AGR-28d	<	AGN-28d	-10,0336
3	AGR-CCA-91d	<	AGN-CCA-91d	-15,6725
4	AGR-91d	<	AGN-91d	-7,58214
5	AGR-91d	=	AGR- CCA -91d	2,906382
6	AGN-91d	<	AGN- CCA -91d	-5,18399
7	AGN-28d	=	AGN- CCA -28d	0,131638
8	AGR-28d	=	AGR- CCA -28d	0,293217
9	AGN-CCA- 91d	>	AGN-CCA- 28d	8,691376
10	AGR-CCA- 91d	=	AGR-CCA- 28d	3,214081
11	AGN- 91d	=	AGN- 28d	3,375743
12	AGR- 91d	>	AGR- 28d	5,827246

Fonte: O autor (2019).

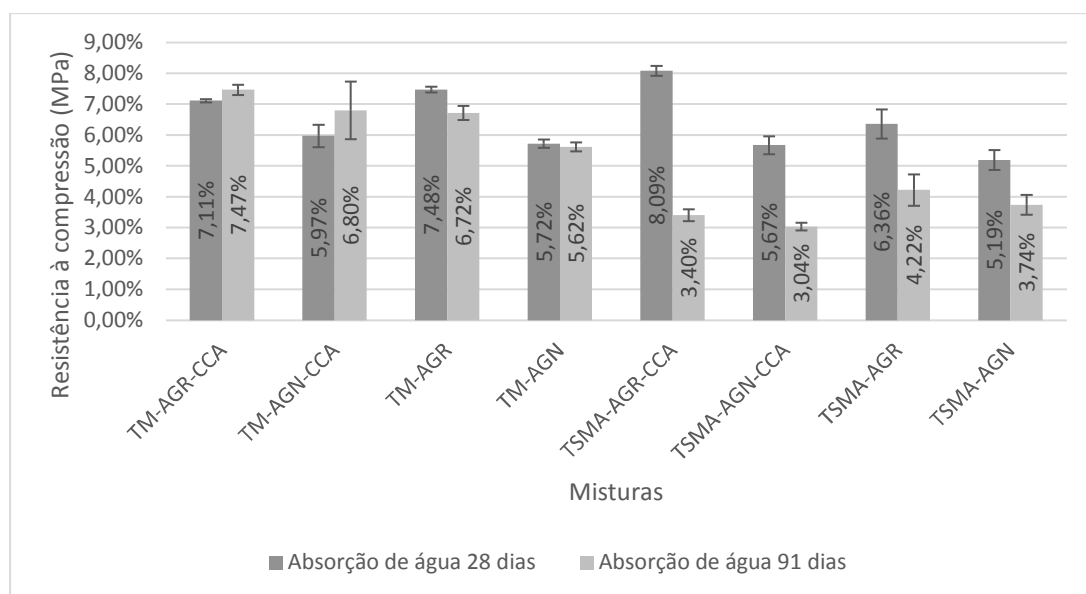
Os concretos produzidos com agregados naturais (AGN) apresentaram maiores valores de resistência à compressão, comparados aos produzidos com AGR (linhas 1, 2, 3, 4, Tabela 38). A utilização de diferentes teores de CCA foi significativa apenas aos 91 dias, para concretos de agregados naturais (linha 6, Tabela 38).

Com relação aos ganhos de resistência por idade, para traços produzidos com 100% de AGR e 20% CCA e aqueles produzidos com agregados naturais e sem CCA, a diferença entre a resistência aos 28 e 91 dias não foi significativa (linhas 10 e 11, Tabela 38). Houve aumento de resistência à compressão para os 91 dias quando considerados traços com agregados naturais (AGN) e 20% CCA e traços com agregados reciclados (AGR), sem adição de CCA (CCA0) (linhas 9 e 12, Tabela 38).

4.4.4. Absorção de água por imersão

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão para as idades de 28 e 91 dias estão representados na Figura 53:

Figura 53 – Absorção de água por imersão de concretos aos 28 e 91 dias (valores médios representados dentro das barras).



Fonte: O autor (2019).

O resultado da análise de variância (ANOVA) para as misturas apresentadas na Tabela 15 é apresentado na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultado de análise de variância, absorção de água por imersão.

Fatores	G.L	Soma Quad	Quad.med.	F	P-valor
Método.de.mistura	1	0,003255	0,003255	262,748	< 2e-16
Agregado.reciclado	1	0,001549	0,001549	125,019	1,38E-12
Cinzas	1	0,000117	0,000117	9,447	0,0043
Idade	1	0,002106	0,002106	169,969	2,39E-14
Método.de.mistura:Agregado.reciclado	1	0,000001	0,000001	0,081	0,7784
Método.de.mistura:Cinzas	1	0,000024	0,000024	1,958	0,1713
Método.de.mistura:Idade	1	0,002364	0,002364	190,847	4,92E-15
Agregado.reciclado:Cinzas	1	0	0	0,012	0,9151
Cinzas:Idade	1	0,000054	0,000054	4,347	0,0451
Agregado.reciclado:Idade	1	0,000279	0,000279	22,517	4,16E-05
Método.de.mistura:Agregado.reciclado:Cinzas	1	0,000089	0,000089	7,151	0,0117
Método.de.mistura:Cinzas:Idade	1	0,000624	0,000624	50,348	4,75E-08
Método.de.mistura:Agregado.reciclado:Idade	1	0,000048	0,000048	3,905	0,0568
Agregado.reciclado:Cinzas:Idade	1	0,000026	0,000026	2,108	0,1563
Método.de.mistura:Agregado.reciclado:Cinzas:Idade	1	0,000044	0,000044	3,587	0,0673
Resíduos	32	0,000396	0,000012		
Soma Quad.: Soma dos quadrados					
G.L: Graus de liberdade					

Fonte: O autor (2019).

Os valores da última coluna da Tabela 39 (P-valor) foram comparados ao nível de significância adotado na pesquisa (5%) e destacados em negrito aqueles inferiores a 5%. Os fatores e as interações entre fatores que, após a ANOVA, resultaram em p-valor inferior a 5% possuem influência estatística sobre a variável de resposta avaliada (absorção de água por imersão).

Os quatro fatores avaliados (método de mistura, teor de substituição de AGN por AGR, teor de adição de CCA em substituição ao cimento e tempo de cura do concreto), ao serem avaliados isoladamente, possuem influência significativa na absorção de água dos traços de concreto produzidos, conforme as 4 primeiras linhas da Tabela 39.

As interações entre os fatores que foram significativas para a variável de resposta avaliada são:

- método de mistura adotado e idade de rompimento dos corpos de prova;
- teor de adição de CCA e idade de rompimento dos corpos de prova;
- teor de substituição de agregados naturais por reciclados e idade de rompimento dos corpos de prova;
- método de mistura adotado, teor de substituição de agregados naturais por reciclados e teor de adição de CCA;
- método de mistura adotado, teor de adição de CCA e idade.

A partir da identificação, pela análise de variância, dos fatores que influenciam a absorção de água por imersão, foi executado o teste de Tukey. O teste indica entre quais grupos a diferença de médias é significativa, comparando as médias entre os grupos, ou seja, entre fatores, e comparando duas a duas as médias de absorção de água das misturas listadas na Tabela 15.

Para valores de p (P-valor) inferiores a 5%, considera-se que as misturas ou fatores analisados são estatisticamente diferentes. Os valores de p inferiores a 5% foram destacados em negrito nas tabelas dispostas ao longo desta seção. O resultado

do teste de Tukey para absorção de água está presente na Tabela 68 à Tabela 79 do Apêndice B.

A coluna com o nome “Dif.” das tabelas dispostas a seguir, demonstra a diferença de absorção de água entre os dois fatores analisados na respectiva linha, em porcentagem de absorção de água do concreto.

Na Tabela 40 as colunas indicando nível 1 e nível 2 referem-se aos níveis adotados para cada fator. A Tabela 40 indica a influência isolada de cada fator e compara seus diferentes níveis na absorção de água obtida. Todas as comparações expostas na tabela obtiveram p-valor inferior a 5%, indicando que o teor de absorção de água para cada um dos níveis dos fatores avaliados é estatisticamente diferente. Uma variação nos níveis dos fatores possui, então, efeito significativo sobre a variável de resposta.

Tabela 40 - Teste de Tukey para fatores isolados, na variável de resposta de absorção de água.

Linha	Fator	Nível 1	Comparação	Nível 2	Dif. (%)
1	Método de mistura	TSMA	<	TM	-1,65%
2	Teor de AGR	AGR	>	AGN	1,14%
3	Teor de CCA	CCA0	>	CCA	0,31%
4	Idade	91d	<	28d	-1,32%

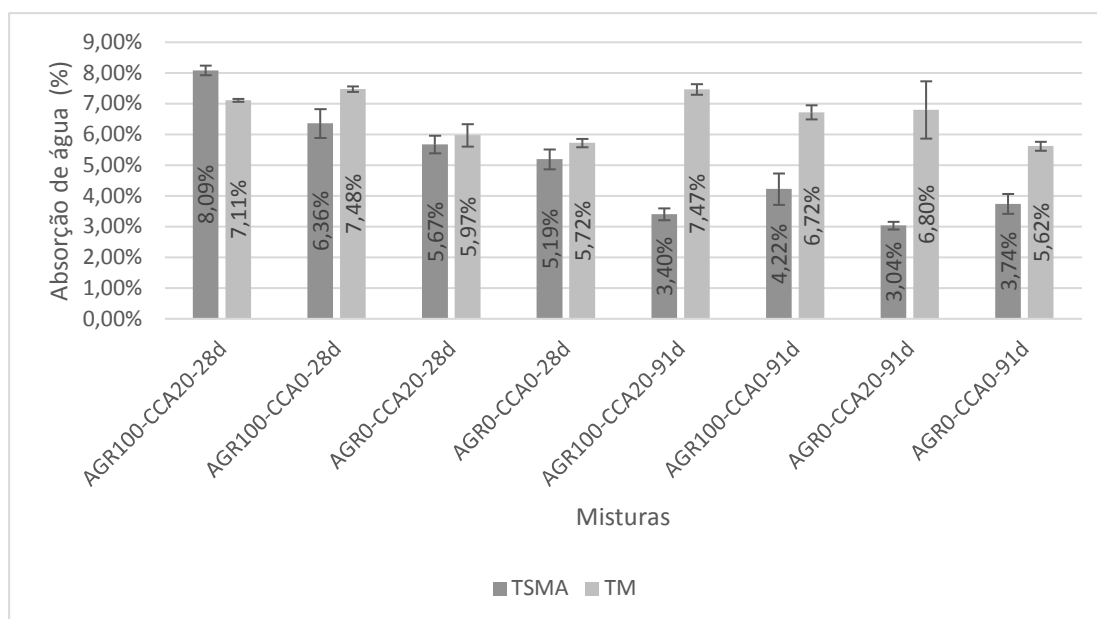
Fonte: O autor (2019).

Os menores níveis de absorção de água foram obtidos com: uso do método de mistura TSMA_{CCA}, uso de agregados naturais no concreto (AGN), adição de 20% de CCA (CCA), e idade de 91 dias para rompimento de corpos de prova.

4.4.4.1. Comparação entre concretos com diferentes métodos de mistura:

A Figura 54 e a Tabela 41 apresentam a comparação entre a absorção de água dos traços com variação no método de mistura adotado. As misturas produzidas com uso do TSMA_{CCA} apresentaram menor teor de absorção de água aos 91 dias, comparadas às produzidas pelo TM (linhas 5, 6, 7 e 8, Tabela 41). Aos 28 dias a variação entre métodos de mistura não apresentou efeito na absorção de água (linhas 1, 3 e 4, Tabela 41), exceto para a comparação da linha 2, Tabela 41, onde o concreto produzido pelo TM apresentou maior capacidade de absorção de água.

Figura 54 – Teor de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes métodos de mistura utilizados.



Fonte: O autor (2019).

Tabela 41 – Absorção de água, concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, mantendo constantes os teores de AGR, teores de CCA e idade.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	P-valor
1	TSMA-AGR-CCA-28d	=	TM-AGR-CCA-28d	0,104642
2	TSMA-AGR-28d	<	TM-AGR-28d	0,033337
3	TSMA-AGN-CCA-28d	=	TM-AGN-CCA-28d	0,999284
4	TSMA-AGN-28d	=	TM-AGN-28d	0,881647
5	TSMA-AGR-CCA-91d	<	TM-AGR-CCA-91d	0
6	TSMA-AGR-91d	<	TM-AGR-91d	1E-07
7	TSMA-AGN-CCA-91d	<	TM-AGN-CCA-91d	0
8	TSMA-AGN-91d	<	TM-AGN-91d	2,36E-05

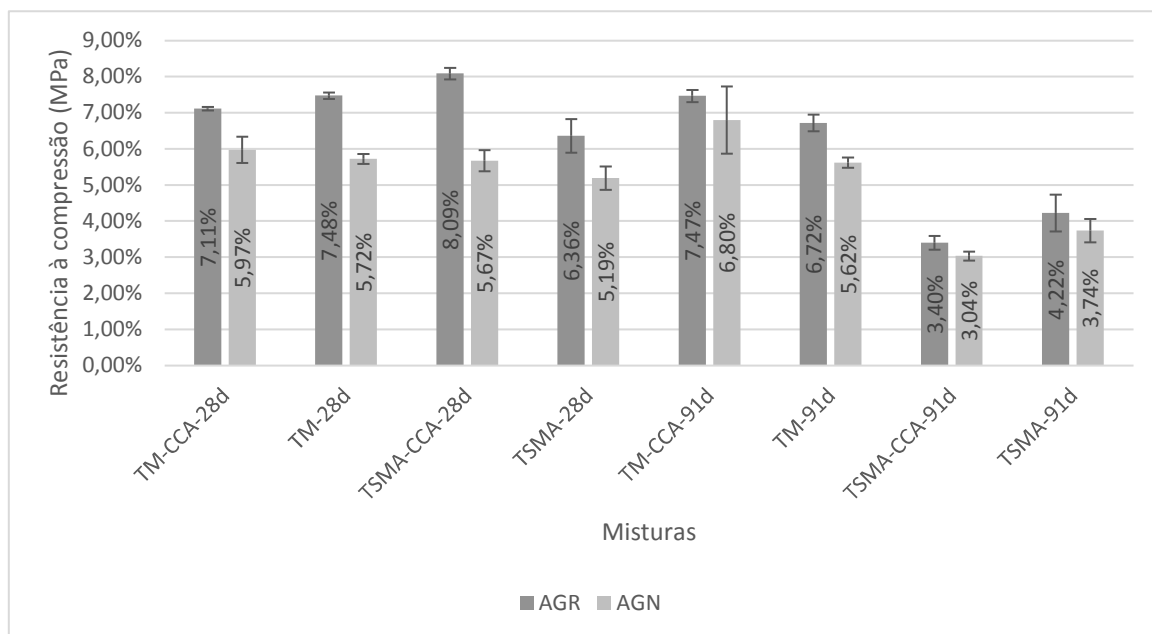
Fonte: O autor (2019).

A menor absorção de água obtida nos concretos preparados pelo TSMA_{CCA} pode ter ocorrido devido à maneira como é dividida a água de mistura no TM, em comparação ao TSMA_{CCA}. No TM utiliza-se a maior parte de água de mistura (W1) nos primeiros estágios de mistura, sendo que os agregados reciclados recebem boa parte dela, enquanto no TSMA_{CCA} tem-se 50% da água de mistura adicionada logo após 50% do cimento, o que pode contribuir para maior hidratação da pasta, resultando em menor teor de absorção de água

4.4.4.2. Comparação entre concretos com diferentes teores de AGR:

A variação da capacidade de absorção de água pelo teor de AGR utilizado nos concretos ensaiados é ilustrada pela Figura 55 e a Tabela 42. O uso de agregados reciclados no concreto ocasionou maior capacidade de absorção de água dos concretos, comparando-se aos de agregados naturais. Dos oito traços avaliados, cinco tiveram diferença estatística significativa, apontando maior capacidade de absorção de água em concretos de agregados reciclados (linhas 1, 2, 3, 4 e 6, Tabela 42). A última coluna da Tabela 42 compara a absorção de água dos dois traços analisados na respectiva linha, indicando o quanto a absorção de água é maior para o concreto de agregados reciclados, produzidos pelo mesmo método, com mesma quantidade de CCA em mesma idade. Aos 28 dias a diferença entre absorção de água de concretos de agregados naturais e agregados reciclados mostrou-se mais significativa do que aos 91 dias, onde a maioria das comparações não indicou alteração da variável de resposta para diferentes teores de AGR (linhas 5, 7 e 8 da Tabela 42).

Figura 55 – Capacidade de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes teores de AGR utilizados.



Fonte: O autor (2019).

Tabela 42 - Absorção de água, concretos produzidos com diferentes teores de AGR, mantendo constantes o método de mistura, teor de CCA e idade.

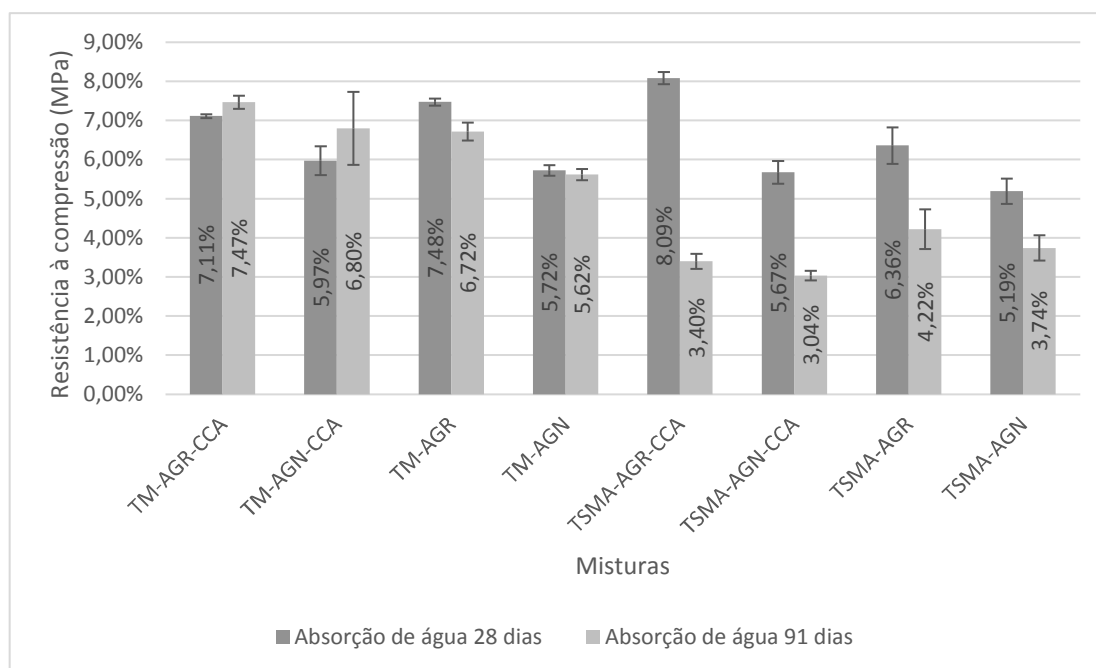
Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	P-valor	$\frac{AGR_{100}}{AGR_0}$
1	TM-AGR-CCA-28d	>	TM-AGN-CCA-28d	0,026632	119,10%
2	TM-AGR-28d	>	TM-AGN-28d	8,13E-05	130,77%
3	TSMA-AGR-CCA-28d	>	TSMA-AGN-CCA-28d	1E-07	142,68%
4	TSMA-AGR-28d	>	TSMA-AGN-28d	0,021043	122,54%
5	TM-AGR-CCA-91d	=	TM-AGN-CCA-91d	0,611026	109,85%
6	TM-AGR-91d	>	TM-AGN-91d	0,037783	119,57%
7	TSMA-AGR-CCA-91d	=	TSMA-AGN-CCA-91d	0,994123	111,84%
8	TSMA-AGR-91d	=	TSMA-AGN-91d	0,938615	112,83%

Fonte: O autor (2019).

4.4.4.3. Comparação entre concretos com diferentes idades:

A diferença de capacidade de absorção de água conforme idade dos ensaios é ilustrada pela Figura 56 e a Tabela 43. Os traços produzidos pelo TM não sofreram diminuição da capacidade de absorção de água conforme aumento da idade dos ensaios, de 28 para 91 dias (linhas 1, 2, 3 e 4, Tabela 43). Os traços produzidos pelo TSMA_{CCA} tiveram sua capacidade de absorção reduzida aos 91 dias, em relação aos 28 dias (linhas 5, 6, 7 e 8, Tabela 43).

Figura 56 - Capacidade de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes idades de execução dos ensaios.



Fonte: O autor (2019).

Tabela 43 - Absorção de água, concretos ensaiados em diferentes idades, mantendo constantes o método de mistura, teor de AGR e teor de CCA.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif. (%)
1	TM-AGR-CCA-28d	=	TM-AGR-CCA-91d	-1,42%
2	TM-AGN-CCA-28d	=	TM-AGN-CCA-91d	-1,89%
3	TM-AGR-28d	=	TM-AGR-91d	-0,31%
4	TM-AGN-28d	=	TM-AGN-91d	-0,96%
5	TSMA-AGR-CCA-28d	>	TSMA-AGR-CCA-91d	3,62%
6	TSMA-AGN-CCA-28d	>	TSMA-AGN-CCA-91d	2,65%
7	TSMA-AGR-28d	>	TSMA-AGR-91d	0,44%
8	TSMA-AGN-28d	>	TSMA-AGN-91d	0,92%

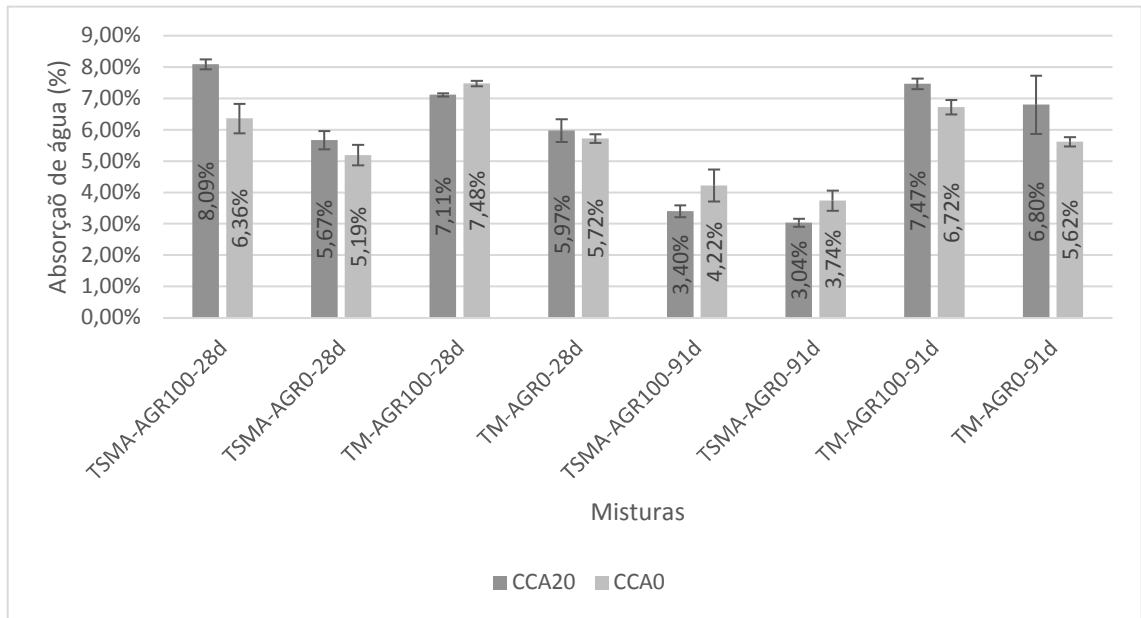
Fonte: O autor (2019).

4.4.4.4. Comparação entre concretos com diferentes teores de CCA:

A variação no teor de CCA para mesmos métodos de mistura, teor de AGR e idade mostrou-se significativa na absorção de água quando comparados os traços TM-AGR-CCA-28d e TM-AGR-CCA-91d, TSMA-AGN-28d e TSMA-AGN-91d, o que é representado na linha 1 e linha 8 da Tabela 44. As demais comparações onde houve apenas variação do teor de CCA (linhas 2 a 7, Tabela 44) não apresentaram diferença

estatística. A Figura 57 ilustra a capacidade de absorção de água do concreto para diferentes teores de CCA.

Figura 57 - Capacidade de absorção de água, concretos ensaiados durante pesquisa, separados por diferentes teores de CCA.



Fonte: O autor (2019).

Tabela 44 - Absorção de água, concretos ensaiados com diferentes teores de CCA, mantendo constantes o método de mistura, teor de AGR e idade.

Linha	Fatores 1	Comparação	Fatores 2	Dif.(%)
1	TSMA-AGR-CCA-28d	>	TSMA-AGR-28d	2,79%
2	TSMA-AGN-CCA-28d	=	TSMA-AGN-28d	1,55%
3	TM-AGR-CCA-28d	=	TM-AGR-28d	0,71%
4	TM-AGN-CCA-28d	=	TM-AGN-28d	1,32%
5	TSMA-AGR-CCA-91d	=	TSMA-AGR-91d	0,25%
6	TSMA-AGN-CCA-91d	=	TSMA-AGN-91d	0,36%
7	TM-AGR-CCA-91d	=	TM-AGR-91d	1,81%
8	TM-AGN-CCA-91d	>	TM-AGN-91d	2,25%

Fonte: O autor (2019).

4.4.4.5. Comparações considerando método de mistura e teor de agregados reciclados:

Todas as combinações dispostas na Tabela 69 (Apêndice B) resultaram em um p-valor inferior a 5%. Traços com diferentes teores de AGR e/ou produzidos por

diferentes métodos de mistura obtiveram valores distintos de absorção de água por imersão. Conforme apontado pela Tabela 45 (linha 1 e linha 6), o uso do TSMA_{CCA} produziu concretos com menor capacidade de absorção de água que o TM, para os traços com 100% de AGR e com nenhum teor de AGR (linha 1 e linha 6). Os concretos de agregados reciclados obtiveram maior teor de absorção de água, comparados àqueles produzidos com agregados naturais, quando produzidos com o mesmo método (linha 2 e linha 5, Tabela 45), ou métodos de mistura distintos (linha 4, Tabela 45).

Tabela 45 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com variados métodos de mistura e teores de AGR.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif. (%)
1	TSMA-AGN	<	TM-AGN	-1,62%
2	TM-AGR	>	TM-AGN	1,16%
3	TSMA-AGR	<	TM-AGN	-0,51%
4	TM-AGR	>	TSMA-AGN	2,78%
5	TSMA-AGR	>	TSMA-AGN	1,11%
6	TSMA-AGR	<	TM-AGR	-1,68%

Fonte: O autor (2019).

4.4.4.6. Comparações considerando método de mistura e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA)

A Tabela 70 (Apêndice B) apresenta os resultados do teste de Tukey considerando método de mistura adotado e teor de CCA. A adição de CCA, quando analisada sua variação isolada, influenciou a absorção de água dos traços produzidos pelo TM (linha 2, Tabela 46). O método de mistura, isolado ou em conjunto com o teor de CCA teve influência na propriedade avaliada, sendo que concretos produzidos pelo TM apresentaram maior capacidade de absorção de água. Os traços produzidos pelo TSMA_{CCA}, independentemente do teor de adição de CCA apresentaram menor absorção de água (linhas 1, 3, 4 e 6 da Tabela 46). A comparação entre traços produzidos pelo TSMA_{CCA}, com diferentes teores de CCA não apontou diferença na absorção de água (linha 5).

Tabela 46 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com variados métodos de mistura e teores de adição de CCA.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif. (%)
1	TSMA	<	TM	-1,50%
2	TM-CCA	>	TM	0,45%
3	TSMA-CCA	<	TM	-1,33%
4	TM-CCA	>	TSMA	1,96%
5	TSMA-CCA	=	TSMA	0,17%
6	TSMA-CCA	<	TM-CCA	-1,79%

Fonte: O autor (2019).

4.4.4.7. Comparações considerando método de mistura e tempo de cura do concreto (Idade)

Os resultados do teste de Tukey para métodos de mistura e idade do concreto estão dispostos na Tabela 71 (Apêndice B) e resumidos na Tabela 47.

Tabela 47 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com variados métodos de mistura e idades.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif. (%)
1	TSMA-28d	=	TM-28d	-0,24%
2	TM-91d	=	TM-28d	0,08%
3	TSMA-91d	<	TM-28d	-2,97%
4	TM-91d	=	TSMA-28d	0,32%
5	TSMA-91d	<	TSMA-28d	-2,73%
6	TSMA-91d	<	TM-91d	-3,05%

Fonte: O autor (2019).

A comparação entre concretos com o mesmo método de mistura e diferentes idades (linha 2 e linha 5, Tabela 47) foi significativa apenas para aqueles produzidos pelo TSMA, onde o aumento da idade ocasionou a redução da absorção de água (linha 5).

Aos 28 dias, concretos produzidos pelo TM e pelo TSMA_{CCA} não apresentaram valores distintos de absorção de água (linha 1). O mesmo não acontece aos 91 dias, onde misturas produzidas pelo TSMA_{CCA} apresentaram menor absorção de água que as produzidas pelo TM (linhas 3 e 6). A comparação entre TSMA_{CCA} aos 28 dias e TM aos 91 dias não apontou diferença significativa (linha 4).

4.4.4.8. Comparações considerando teor de agregados reciclados e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA)

A Tabela 72 (Apêndice B) lista os resultados do teste de Tukey para análise de teor de agregados reciclados e teor de adição de CCA, resumidos na Tabela 48 para variação de um fator por vez.

Tabela 48 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes teores de AGR e de adição de CCA.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	AGR	>	AGN	1,13%
2	AGN- CCA	=	AGN	0,30%
3	AGR-CCA	>	AGN	1,45%
4	AGN-CCA	<	AGR	-0,82%
5	AGR- CCA	=	AGR	0,32%
6	AGR-CCA	>	AGN-CCA	1,15%

Fonte: O autor (2019).

Conforme a linha 2 e linha 5 da Tabela 48, a comparação entre concretos com mesmo teor de AGR e diferentes níveis de CCA não resultou em níveis distintos de absorção de água. A comparação entre misturas com diferentes teores de AGR apresentou significância, sendo que os maiores valores de absorção de água foram obtidos para misturas com 100% de AGR, independentemente do teor de CCA adotado (linha 1, 3, 4, 6, Tabela 48).

4.4.4.9. Comparações considerando teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade)

O teste de Tukey para os fatores listados nesta seção está presente na Tabela 74 (Apêndice B). Os resultados apresentados na Tabela 49 consideram apenas variações no teor de adição de CCA e idade.

Tabela 49 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes teores de CCA em diferentes idades.

(continua)				
Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	CCA-28d	>	CCA0-28d	0,52%
2	CCA0- 91d	<	CCA0- 28d	-1,11%

3	CCA-91d	<	CCA0-28d	-1,01%
4	CCA0-91d	<	CCA-28d	-1,64%
5	CCA-91d	<	CCA-28d	-1,54%
6	CCA-91d	=	CCA0-91d	0,10%

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

A comparação entre concretos em diferentes idades com níveis iguais ou distintos de CCA (linhas 2, 3, 4 e 5, Tabela 49) resultou em diferenças significativas, onde misturas ensaiadas em idades mais elevadas apresentaram menor absorção de água. Aos 28 dias, a adição de 20% de CCA teve efeito significativo na variável de resposta avaliada, contribuindo para maior absorção de água (linha 1), dado o fato que a reação pozolânica da CCA ocorre de maneira mais lenta, durante os primeiros dias de cura do concreto (PADHI *et al.*, 2018). Aos 91 dias, a mudança no teor de CCA, isoladamente, não contribui para alterações significativas na capacidade de absorção de água do concreto (linha 6).

4.4.4.10. Comparações considerando teor de agregados reciclados e tempo de cura do concreto (idade)

A Tabela 74 (Apêndice B) apresenta o teste de Tukey para teor de agregados reciclados e tempo de cura do concreto, resumidos na Tabela 50.

Tabela 50 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes teores de AGR em diferentes idades.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	AGR-28d	>	AGN-28d	1,62%
2	AGN-91d	<	AGN-28d	-0,84%
3	AGR-91d	=	AGN-28d	-0,19%
4	AGN-91d	<	AGR-28d	-2,46%
5	AGR-91d	<	AGR-28d	-1,81%
6	AGR-91d	>	AGN-91d	0,65%

Fonte: O autor (2019).

Considerando-se apenas os dois fatores (teor de AGR e idade), os concretos produzidos com 100% de AGR apresentaram maior absorção de água que os produzidos com agregados naturais (linhas 1, 4 e 6, Tabela 50). A comparação entre diferentes idades, para o mesmo teor de AGR, também foi significativa para a variável

de resposta (linha 2 e linha 5). Concretos ensaiados aos 91 dias apresentaram menores valores de absorção de água. A absorção de água aos 91 dias, com uso de 100% de AGR igualou-se à capacidade de absorção de água aos 28 dias, com agregados naturais (linha 3).

4.4.4.11. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados (AGR) e teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA)

O teste de Tukey para método de mistura, teor de AGR e de adição de CCA está presente na Tabela 75 (Apêndice B) e resumido na Tabela 51.

Tabela 51 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e CCA.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	TSMA-AGN	<	TM-AGN	-1,20%
2	TSMA-AGR	<	TM-AGR	-1,81%
3	TSMA-AGN-CCA	<	TM-AGN-CCA	-2,03%
4	TSMA-AGR-CCA	<	TM-AGR-CCA	-1,55%
5	TM-AGR	>	TM-AGN	1,43%
6	TSMA-AGR	>	TSMA-AGN	0,82%
7	TM-AGR-CCA	>	TM-AGN-CCA	0,90%
8	TSMA-AGR-CCA	>	TSMA-AGN-CCA	1,39%
9	TM-AGN-CCA	>	TM-AGN	0,72%
10	TSMA-AGN-CCA	=	TSMA-AGN	-0,11%
11	TM-AGR-CCA	=	TM-AGR	0,19%
12	TSMA-AGR-CCA	=	TSMA-AGR	0,45%

Fonte: O autor (2019).

Foi constatada diferença significativa para variação do método de mistura, com teor de AGR e CCA fixos, com o TSMA_{CCA} contribuindo para obtenção de concretos com menor teor de absorção de água (linhas 1, 2, 3 e 4 da Tabela 51).

O teor de AGR também teve significância na variável de resposta (linhas 5, 6, 7 e 8). Concretos produzidos com 100% de AGR apresentaram maior absorção de água. Apenas alterações isoladas no teor de adição de cinzas deram origem a traços sem diferença estatística de absorção de água (linhas 10, 11 e 12), exceto para aqueles produzidos pelo TM, sem adição de agregados reciclados (linha 9), onde a absorção de água foi maior para o concreto com adição de CCA.

4.4.4.12. Comparações considerando método de mistura, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura do concreto (Idade)

Os resultados do teste de Tukey considerando método de mistura, teor de CCA e idade do concreto Tabela 76 (Apêndice B), resumidos na Tabela 52:

Tabela 52 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos com diferentes métodos de mistura, teores de CCA e idades.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	TSMA-28d	<	TM-28d	-0,82%
2	TSMA-CCA-28d	=	TM-CCA-28d	0,34%
3	TSMA-91d	<	TM-91d	-2,19%
4	TSMA-CCA-91d	<	TM-CCA-91d	-3,91%
5	TM- CCA-28d	=	TM-28d	-0,05%
6	TSMA- CCA-28d	>	TSMA-28d	1,10%
7	TM- CCA-91d	>	TM-91d	0,96%
8	TSMA- CCA-91d	<	TSMA-91d	-0,76%
9	TM- 91d	=	TM- 28d	-0,43%
10	TSMA- 91d	<	TSMA- 28d	-1,80%
11	TM-CCA- 91d	=	TM-CCA- 28d	0,59%
12	TSMA-CCA- 91d	<	TSMA-CCA- 28d	-3,66%

Fonte: O autor (2019).

A comparação para concretos em mesmas idades e teor de CCA com métodos de mistura distintos apontou diferença significativa entre os valores de absorção (linhas 1, 3 e 4, Tabela 52), onde os traços produzidos pelo TM obtiveram maior valor de absorção, exceto para misturas com 20% de CCA, aos 28 dias, onde a variação do método não indicou diferença significativa na variável (linha 2).

O uso de CCA, quando utilizado o método de mistura TM, ocasionou aumento da capacidade de absorção de água aos 91 dias (linha 7, Tabela 52) e não afetou a propriedade aos 28 dias (linha 5). Quando foi empregado o TSMA_{CCA}, o uso das cinzas aumentou a capacidade de absorção de água do concreto aos 28 dias (linha 6), o que pode ter ocorrido devido à reação pozolânica tardia das cinzas. Aos 91 dias, o uso da CCA, quando utilizado o TSMA_{CCA}, acarreta em redução da absorção de água (linha 8).

A comparação de concretos em idades distintas apontou redução da absorção de água com aumento da idade, para concretos produzidos pelo TSMA_{CCA} (linhas 10

e 12, Tabela 52). O mesmo não ocorre para os traços produzidos pelo TM, onde não há redução da capacidade de absorção de água com aumento da idade dos ensaios (linhas 9 e 11, Tabela 52).

A diferença apontada também é percebida quando são considerados os teores de AGN e AGR (Tabela 53, linhas 1.1, 1.2, 2.1, 2.2). Sendo as misturas ensaiadas aos 28 dias aquelas com maiores valores de absorção de água.

Tabela 53 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos produzidos pelo TSMA, em diferentes idades, para teores de AGN e AGR.

Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	TSMA-91d	<	TSMA-28d	-1,80%
1.1	TSMA-AGN-91d	<	TSMA-AGN-28d	-1,45%
1.2	TSMA-AGR-91d	<	TSMA-AGR-28d	-2,14%
2	TSMA-CCA-91d	<	TSMA-CCA-28d	-3,66%
2.1	TSMA-AGN-CCA-91d	<	TSMA-AGN-CCA-28d	-2,64%
2.2	TSMA-AGR-CCA-91d	<	TSMA-AGR-CCA-28d	-4,68%

Fonte: O autor (2019).

Os traços produzidos pelo TM não apresentaram redução de absorção de água com aumento da idade (linhas 9 e 11, Tabela 52).

4.4.4.13. Comparações considerando método de mistura, teor de agregados reciclados e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)

Os resultados do teste estatístico considerando os fatores de teor de AGR, idade dos corpos de prova e método de mistura estão presentes na Tabela 77 (Apêndice B) e Tabela 54.

Tabela 54 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos com diferentes métodos de mistura, teores de AGR e idade.

(continua)				
Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	TSMA-AGN-28d	=	TM-AGN-28d	-0,42%
2	TSMA-AGR-28d	=	TM-AGR-28d	-0,07%
3	TSMA-AGN-91d	<	TM-AGN-91d	-2,82%
4	TSMA-AGR-91d	<	TM-AGR-91d	-3,28%
5	TM-AGR-28d	>	TM-AGN-28d	1,45%
6	TSMA-AGR-28d	>	TSMA-AGN-28d	1,79%
7	TM-AGR-91d	>	TM-AGN-91d	0,88%

8	TSMA- AGR -91d	=	TSMA- AGN -91d	0,42%
9	TM-AGN- 91d	=	TM-AGN- 28d	0,36%
10	TM-AGR- 91d	=	TM-AGR- 28d	-0,20%
11	TSMA-AGN- 91d	<	TSMA-AGN- 28d	-2,05%
12	TSMA-AGR- 91d	<	TSMA-AGR- 28d	-3,41%

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

A Tabela 54 apontou diferença entre os concretos produzidos com diferentes métodos de mistura para ensaios realizados aos 91 dias (Tabela 54, linhas 3 e 4), com concretos produzidos pelo TSMA_{CCA} com menores valores de absorção de água. Aos 28 dias não foi apontada diferença de absorção de água para o uso de métodos de mistura distintos (linhas 1 e 2).

Os concretos produzidos pelo TSMA_{CCA} apresentaram menores teores de absorção para maiores idades, independente do teor de AGR (linhas 11 e 12, Tabela 54). Também foi observada maior absorção de água para os traços produzidos com 100% AGR, mantendo constantes método de mistura e idade (linhas 5, 6, 7), exceto aqueles ensaiados aos 91 dias, produzidos pelo TSMA_{CCA} (linha 8). Os traços produzidos pelo TM não tiveram redução de absorção com ganho de idade (linhas 9 e 10, Tabela 54).

4.4.4.14. Comparações considerando teor de agregados reciclados, teor de adição de cinzas de casca de arroz (CCA) e tempo de cura dos corpos de prova (Idade)

Os resultados considerando todos os parâmetros listados na seção estão presentes na Tabela 78 (Apêndice B). A Tabela 55 apresenta a comparação entre traços com variação em apenas um dos parâmetros considerados.

Tabela 55 - Comparações entre capacidade de absorção de água de concretos com diferentes teores de AGR, teores de CCA e idades.

(continua)				
Linha	Mistura 1	Comparação	Mistura 2	Dif.
1	AGR -28d	>	AGN -28d	1,46%
2	AGR -CCA-28d	>	AGN -CCA-28d	1,78%
3	AGR -91d	>	AGN -91d	0,79%
4	AGR -CCA-91d	=	AGN -CCA-91d	0,52%
5	AGN- CCA -28d	=	AGN-28d	0,37%
6	AGR- CCA -28d	>	AGR-28d	0,68%

7	AGN- CCA -91d	=	AGN-91d	0,24%
8	AGR- CCA -91d	=	AGR-91d	-0,04%
9	AGN- 91d	<	AGN- 28d	-0,78%
10	AGR- 91d	<	AGR- 28d	-1,45%
11	AGN-CCA- 91d	<	AGN-CCA- 28d	-0,91%
12	AGR-CCA- 91d	<	AGR-CCA- 28d	-2,17%

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Foi apontada diferença de absorção entre concretos produzidos com e sem adição de AGR. Aqueles produzidos com 100% de agregados reciclados obtiveram maiores valores de absorção de água (linha 1, 2 e 3, Tabela 55), exceto aos 91 dias, quando utilizada adição de 20% de CCA (linha 4).

A comparação entre concretos com diferentes teores de CCA não resultou em diferenças significativas, quando este é o único parâmetro variável (linhas 5, 7 e 8, Tabela 55), exceto para traços com 100% AGR aos 28 dias, onde o uso de 20% de CCA aumentou a capacidade de absorção de água (linha 6, Tabela 55).

A comparação de concretos com idades distintas apontou menores níveis de absorção de água para aqueles ensaiados aos 91 dias (linhas 9,10, 11 e 12, Tabela 55).

5. CONCLUSÕES

A caracterização dos materiais indicou a diferença nas propriedades dos agregados reciclados para os agregados naturais. Os AGR utilizados nesta pesquisa foram agregados reciclados mistos, tendo em sua constituição parte cerâmica e parte cinza, originada de restos de argamassa e concreto.

Em concordância ao apontado pela literatura, a maior porosidade e maior absorção de água dos AGR frente aos AGN contribuíram para a menor resistência à compressão e maior teor de absorção de água obtidos pelos concretos de agregados reciclados.

Constatou-se que o uso de AGR reduz a trabalhabilidade do concreto. O efeito, entretanto, é menos significativo quando os agregados reciclados são utilizados com certa umidade residual, comparando-se a quando estes são utilizados totalmente secos. A umidade presente nos AGR, no nível de 3% utilizado nesta pesquisa permitiu maiores ganhos à trabalhabilidade do concreto, sem prejudicar sua resistência à compressão. O resultado condiz com o encontrado na pesquisa de Brand, Roesler e Salas (2014), onde os melhores níveis de trabalhabilidade de concretos de agregados reciclados foram obtidos quando os AGR foram utilizados com algum teor de umidade.

Os traços produzidos pelo TSMA_{CCA} apresentaram maiores níveis de abatimento de cone que aqueles produzidos pelo TM, o que pode ter ocorrido devido ao uso de 50% da água, no TSMA_{CCA}, na etapa final de mistura, junto à adição de superplastificante. A maior quantidade de água disponível para a pasta na última etapa de mistura, em comparação ao TM, pode ter influenciado de maneira positiva a trabalhabilidade.

A partir dos ensaios executados e da análise estatística pelos testes ANOVA e de Tukey, foram avaliados os efeitos isolados e conjuntos dos parâmetros de processo nas variáveis de resposta (resistência à compressão e capacidade de absorção de água) dos concretos produzidos, apresentados pelas seguintes conclusões:

- A substituição dos AGN por AGR contribuiu para redução da resistência à compressão axial, aumento da capacidade de absorção de água e redução da trabalhabilidade dos concretos.

- A diferença entre os métodos de mistura adotados mostrou-se significativa na resistência à compressão, apenas quando utilizadas adições de cinzas de casca de arroz e 91 dias após a concretagem, sendo que os maiores valores de resistência à compressão foram alcançados com uso do TM.
- Aos 28 dias não foi apontada diferença na resistência à compressão para concretos produzidos pelo TM ou TSMA_{CCA}.
- O uso de cinzas de casca de arroz, somado ao maior tempo de cura do concreto (91 dias), aprimorou a resistência à compressão, em especial quando combinado ao TM. O aumento da resistência à compressão em idades elevadas com uso de CCA corrobora os resultados obtidos por Gomes (2019).
- O teor de CCA, quando avaliado de maneira isolada, não interferiu de maneira significativa na resistência à compressão dos concretos produzidos. Aos 28 dias, os concretos produzidos com 20% CCA obtiveram resistência à compressão igual à daqueles produzidos sem a adição.
- O uso de 20% de CCA em substituição ao cimento proporcionou a obtenção de concretos com menor teor de CO₂ incorporado, capazes de atingir a mesma resistência à compressão aos 28 dias, comparando-se a concretos sem a adição de cinzas de casca de arroz.
- A resistência à compressão atingida pelos concretos de agregados reciclados, foi de 73% a 88% da resistência dos concretos de agregados naturais, produzidos pelo mesmo método de mistura e com mesmo teor de CCA. Os valores são inferiores aos obtidos por Kong *et al.* (2010), que obtiveram concretos de agregados reciclados cuja resistência à compressão chegou a 99,6% da resistência à compressão de concretos de agregados naturais. Os agregados utilizados por Kong *et al.* (2010) foram AGR reciclados de concreto, com menor porosidade e absorção de água que os AGR utilizados nesta pesquisa, o que pode ter influenciado os resultados obtidos pelos autores. O traço de concreto

utilizado é outro fator que pode ter interferido nos índices de melhora de resistência obtidos.

- O ganho de resistência à compressão com a idade dos ensaios mostrou-se mais evidente em mistura preparadas pelo TM, o que pode ter ocorrido devido à maior presença de CCA na zona de transição interfacial, como apontado na microscopia eletrônica.
- Os traços produzidos pelo TSMA_{CCA} obtiveram menor absorção de água que aqueles produzidos pelo TM. O fato pode ter ocorrido devido à maneira como é dividida a água de mistura no TM, em comparação ao TSMA_{CCA}.
- O uso de 100% de agregados reciclados resultou em concretos com maior absorção de água, comparados a concretos de agregados naturais. A diferença é mais evidente aos 28 dias, onde os teores de absorção de água foram de 119% a 142% maiores para concretos de agregados reciclados. Aos 91 dias, a absorção de água do concreto não apresentou significativa diferença comparando-se concretos produzidos com 100% AGR e aqueles produzidos com 100% AGN, exceto para a comparação TM-AGR-91d e TM-AGN-91d.
- O uso de 20% de cinzas de casca de arroz, quando combinado ao método de mistura TM, contribuiu para obtenção de concretos com maior absorção de água.
- Concretos produzidos pelo TSMA_{CCA} obtiveram redução da absorção de água com aumento da idade.
- O uso de diferentes métodos de mistura mostrou mais significância para a absorção de água aos 91 dias após concretagem, com o TM contribuindo para a obtenção de concreto com maiores níveis de absorção de água. Aos 28 dias, traços com alterações apenas em métodos de mistura não mostraram alterações significativas na absorção de água, exceto para a comparação TSMA-AGR-28d / TM-AGR-28d.

- O uso de 20% de CCA em substituição ao cimento, aos 28 dias contribuiu para aumento na capacidade de absorção de água do concreto. Aos 91 dias, o teor de CCA não contribui para aumento da absorção, quando avaliado de forma isolada.

O uso de 20% de CCA possibilitou a obtenção de concretos com resistências comparáveis às de concretos produzidos sem cinzas, aos 28 dias, e de concretos com resistências superiores, aos 91 dias, fornecendo um material com menor uso de cimento e resistência comparável ou superior.

Diante das conclusões expostas, o uso do TM pareceu favorecer a resistência à compressão dos concretos de agregados reciclados, quando associado ao uso de adições pozolânicas. A variabilidade dos agregados reciclados pode ter influência em como o método de mistura utilizado afeta os concretos produzidos, visto que foram obtidos resultados distintos de outras pesquisas que aplicaram métodos de mistura semelhantes. O uso de métodos de mistura modificados, em especial quando associados a adições pozolânicas, são procedimentos que podem favorecer a aplicação do concreto de agregados reciclados em fins estruturais, dadas as melhorias obtidas à resistência do compósito.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões apresentadas tem-se como sugestões para futuros trabalhos:

- Estudar o efeito de outros métodos de mistura e outras adições pozolânicas apontadas na literatura no concreto de agregados reciclados com agregados originados da estação de tratamento de Belo Horizonte, procurando viabilizar o uso do material em concretos com função estrutural.
- Realizar estudos abrangendo outras propriedades mecânicas de durabilidade do concreto de agregado reciclados com uso de métodos de mistura variados, além das abordadas neste trabalho.
- Abordar o tratamento dos agregados reciclados antes da concretagem, juntamente com métodos de mistura variados, procurando identificar quais combinações de pré tratamentos de AGR e métodos de mistura podem trazer mais benefícios ao concreto.

7. REFERÊNCIAS

ABD ELHAKAM, A.; MOHAMED, A. E.; AWAD, E. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 421–427, 2012.

ABNT. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. **Rio de Janeiro: ABNT**, p. 5–7, 1987.

ABNT. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. **Rio de Janeiro: ABNT**, 1998.

ABNT. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2003.

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

ABNT. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2005.

ABNT. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2006.

ABNT. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2009a.

ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2009b.

ABNT. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento Design. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2014.

ABNT. NBR 8953: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência Concreto. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2015a.

ABNT. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2015b.

ABNT. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2018a.

ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2018b.

ABRECON. **Seminário nacional da reciclagem de resíduos da construção civil. Disponível em <<https://abrecon.org.br/seminario-nacional-da-reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil-2015/>>. Acesso em: 05 de Abril de 2019.**

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 2, p. 269–279, 2002.

AKBARNEZHAD, A. et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3469–3479, 2011.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.

AL-BAYATI, H. K. A. et al. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 284–298, 2016.

ANGULO, S. C.; MUELLER, A. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 6, p. 739–748, 2009.

BAIRAGI, N. K.; VIDYADHARA, H. S.; RAVANDE, K. Mix design procedure for recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 4, n. 4, p. 188–193, 1990.

BEHERA, M. et al. 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, 2014a.

BEHERA, M. et al. 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, 2014b.

BOSTANCI, S. C.; LIMBACHIYA, M.; KEW, H. Portland-composite and composite cement concretes made with coarse recycled and recycled glass sand aggregates:

Engineering and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 324–340, 2016.

BRAND, A. S.; ROESLER, J. R.; SALAS, A. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 83–89, 2014.

BRAND, A. S.; ROESLER, J. R.; SALAS, A. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 83–89, 2015.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de Julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 376–385, 2017.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 10, p. 1037–1049, 2011.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1292–1301, 2013.

ÇAKIR, O. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 17–25, 2014.

CAO, Z. et al. Elaborating the History of Our Cementing Societies: An in-Use Stock Perspective. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 19, p. 11468–11475, 2017a.

CAO, Z. et al. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled

coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 31, n. 1, p. 1–8, 2017b.

CASTELLOTE, M. et al. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 4, p. 515–525, 2009.

CCANZ. **Best Practice Guide for the use of Recycled Aggregates in New Concrete** **Cement & Concrete Association New Zealand**. [s.l.: s.n.].

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 44, n. 1, p. 205–220, 2011.

CHOI, H. et al. Evaluation on the Mechanical Performance of Low-Quality Recycled Aggregate Through Interface Enhancement Between Cement Matrix and Coarse Aggregate by Surface Modification Technology. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 1, p. 87–97, 2016.

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1616–1620, 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2869–2876, 2009.

CSI. The Cement Sustainability Initiative. Recycling Concrete: Executive summary. p. 42, 2009.

DE JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.

ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and**

Concrete Research, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 10, p. 683–690, 2006.

GHORBEL, E.; WARDEH, G. Influence of recycled coarse aggregates incorporation on the fracture properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 51–60, 2017.

GOMES, C. L. **Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduo de construção e demolição e cinza de casca de arroz**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), 2019.

GONÇALVES, R. D. C. C. Agregados Reciclados De Resíduos De Concreto - Um Novo Material Para Dosagens Estruturais. p. 148, 2001.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. **São Paulo**, n. December, 2000.

KATZ, A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 597–603, 2004.

KEUN-HYEOK YANG AND ASHRAF F. ASHOUR, H.-S. C. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. **ACI MATERIALS JOURNAL**, v. 105, n. 3, 2008.

KHALAF, F. M.; DEVENNY, A. S. Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 4, p. 331–340, 2004.

KISKU, N. et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 721–740, 2017.

KONG, D. et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2010a.

KONG, D. et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials

around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2010b.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 2, p. 107–113, 2009.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 649–654, 2010.

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.

KUMAR, P. S.; DHINAKARAN, G. Effect of Admixed Recycled Aggregate Concrete on Properties of Fresh and Hardened Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE**, v. 24, n. 4, p. 494–498, 2012.

KWAN, W. H. et al. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 565–573, 2012.

LEITE, C. et al. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. v. 25, p. 2972–2979, 2011.

LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009a.

LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009b.

LI, W. et al. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 1045–1055, 2012.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China Part I . Material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, p.

36–44, 2008.

LIANG, C. et al. The damping property of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 834–842, 2016.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**, v. 33, n. 9, p. 574–580, 2000.

LIU, X. et al. Assessing the potential of functionally graded concrete using fibre reinforced and recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 793–801, 2018.

LÓPEZ-GAYARRE, F. et al. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. **Waste Management**, v. 29, n. 12, p. 3022–3028, 2009.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. **Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 1204–1225, 2010.

MARZOUK, M.; AZAB, S. Resources , Conservation and Recycling Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. “**Resources, Conservation & Recycling**”, v. 82, p. 41–49, 2014.

MATIAS, D. et al. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 101–109, 2013.

MCNEIL, K.; KANG, T. H. K. Recycled Concrete Aggregates: A Review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 1, p. 61–69, 2013.

MELO, A. B. DE. Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland. **Tese**, n. V, 2000.

MOVASSAGHI, R. Durability of Reinforced Concrete Incorporating Recycled Concrete as Aggregate (RCA). 2006.

NAMARAK, C.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C. Bar-concrete bond in mixes containing calcium carbide residue, fly ash and recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 31–40, 2018.

NEPOMUCENO, M. C. S.; ISIDORO, R. A. S.; CATARINO, J. P. G. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 284–294, 2018.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 2, p. 179–185, 2002.

OTSUKI, N. et al. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone , Strength , Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. n. October, p. 443–451, 2003.

OTSUKI, N.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. **JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING**, v. 15, n. 5, p. 443–451, 2003.

PACHECO-TORGAL, F. **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. First ed. Cambridge, United Kingdom: ELSEVIER SCIENCE & TECHNOLOGY, 2013.

PADHI, R. S. et al. Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 289–297, 2018.

POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31–36, 2004.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461–468, 2004.

QI, B. et al. Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting–drying cycles and flexural loading. **Construction and Building Materials**, v.

174, p. 130–137, 2018.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 407–415, 2007.

RAJHANS, P.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 557–570, 2018.

RANDELL, P.; PICKIN, J.; GRANT, B. Waste generation and resource recovery in Australia || Reporting Period 2010/11. **RANDEL ENVIRONMENTAL CONSULTING || blue environment**, n. February, p. 01–143, 2014.

RAO A. **Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete.**, 2005.

SÁEZ DEL BOSQUE, I. F. et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 81, p. 25–34, 2017a.

SÁEZ DEL BOSQUE, I. F. et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 81, p. 25–34, 2017b.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 707–712, 2001.

SALLES, P. V. **Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduos de construção e demolição.** [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), 2018.

SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI JR, A. Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 4, p. 21–32, 2004.

SEARA-PAZ, S. et al. Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 95–109, 2016.

SHAHIDAN, S. et al. Utilizing Construction and Demolition (C&D) Waste as

Recycled Aggregates (RA) in Concrete. **Procedia Engineering**, v. 174, p. 1028–1035, 2017.

SHAIKH, F. et al. Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete. **Structural Concrete**, n. June, p. 1–13, 2017.

SHAIKH, F. U. A. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing ternary blended cementitious materials. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 536–543, 2017.

SHI, C. et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466–472, 2016.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 598–614, 2017.

SILVA, V. S. **Aderência de chapiscos em concretos estruturais - melhoria da microestrutura da zona de interface pela adição da sílica da casca de arroz.** [s.l: s.n.].

SILVA, V. S.; LIBORIO, J. B. L. Estudo Da Microestrutura Da Interface Argamassa / Substrato De Concreto Através Da Microscopia Eletrônica De Varredura. n. 1, p. 287–293, 2002.

TABSH, S. W.; ABDEL FATAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163–1167, 2009.

TAM, V. V. W. Y.; GAO, X. F. X.; TAM, C. C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005a.

TAM, V. W.-Y.; GAO, X.-F.; TAM, C. M. Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 7, p. 477–484, 2006a.

TAM, V. W.-Y.; GAO, X.-F.; TAM, C. M. Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete. **MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH**, v. 58, n. 7, p. 477–484, 2006b.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005b.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**, v. 42, n. 10, p. 3592–3602, 2007.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA_s and TSMA_{sc}. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 10, p. 2068–2077, 2008a.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA_s and TSMA_{sc}. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 10, p. 2068–2077, 2008b.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; LE, K. N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 82–101, 2007.

TAM, V. W. Y.; WANG, K.; TAM, C. M. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 703–714, 2008.

THOMAS, C. et al. Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 618–625, 2018.

TOPÇU, İLKER B.; GÜNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1385–1390, 1995.

TOPÇU, İ. B.; ŞENGEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1307–1312, ago. 2004.

WAGIH, A. M. et al. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **HBRC Journal**, v. 9, n. 3, p. 193–200, 2013.

WANG, H.-L. et al. Improving performance of recycled aggregate concrete with superfine pozzolanic powders. **Journal of Central South University**, v. 20, n. 12, p. 3715–3722, 2013.

XIE, T.; GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Toward the Development of Sustainable Concretes with Recycled Concrete Aggregates: Comprehensive Review of Studies on Mechanical Properties. **JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING**, v. 30, n. 9, 2018.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 67–74, 2016.

ZHAN, B. J.; XUAN, D. X.; POON, C. S. Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO₂curing coupled with limewater soaking process. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 230–237, 2018.

ZHANG, W. et al. Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete. v. 203, p. 601–607, 2019a.

ZHANG, W. et al. Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 601–607, 2019b.

APÊNDICE A – TESTE DE TUKEY PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela 56 - Teste de Tukey, fatores isolados para resistência à compressão

Fator	Nível 1	Nível 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
Método de mistura	TSMA	TM	-1,89592	-3,1642	-0,62763	0,00463
Teor de AGR	AGR	AGN	-10,8709	-12,1392	-9,6026	0
Teor de CCA	CCA0	CCA	-0,46319	-1,73148	0,805095	0,4623603
Idade	91d	28d	5,277111	4,008826	6,545396	0

Tabela 57 - Teste de Tukey considerando método de mistura e teor de AGR

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN	TM-AGN	-2,09182	-4,47756	0,293912	0,102438
TM-AGR	TM-AGN	-11,0668	-13,4525	-8,68105	0
TSMA-AGR	TM-AGN	-12,7668	-15,1525	-10,3811	0
TM-AGR	TSMA-AGN	-8,97496	-11,3607	-6,58923	0
TSMA-AGR	TSMA-AGN	-10,675	-13,0607	-8,28924	0
TSMA-AGR	TM-AGR	-1,70001	-4,08575	0,685721	0,235764

Fonte: O autor (2019).

Tabela 58 - Teste de Tukey considerando método de mistura e CCA

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-CCA	TM-CCA	-3,76552	-6,15125	-1,37978	0,000881
TM	TM-CCA	-2,33279	-4,71852	0,052947	0,057187
TSMA	TM-CCA	-2,35911	-4,74484	0,026627	0,053508
TM	TSMA-CCA	1,432728	-0,95301	3,818462	0,378316
TSMA	TSMA-CCA	1,406408	-0,97933	3,792142	0,394499
TSMA	TM	-0,02632	-2,41205	2,359414	0,99999

Fonte: O autor (2019).

Tabela 59 - Teste de Tukey considerando método de mistura e idade

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-28d	TM-28d	0,728059	-1,65768	3,113793	0,841343
TM-91d	TM-28d	7,901088	5,515354	10,28682	0
TSMA-91d	TM-28d	3,381194	0,99546	5,766928	0,002932
TM-91d	TSMA-28d	7,173029	4,787295	9,558763	0
TSMA-91d	TSMA-28d	2,653135	0,267401	5,038869	0,024619
TSMA-91d	TM-91d	-4,51989	-6,90563	-2,13416	7,67E-05

Fonte: O autor (2019).

Tabela 60 - Teste de Tukey considerando teor de AGR e CCA

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
AGR-CCA	AGN-CCA	-12,9339	-15,3196	-10,5481	0
AGN	AGN-CCA	-2,52618	-4,91191	-0,14044	0,034671
AGR	AGN-CCA	-11,3341	-13,7198	-8,94834	0
AGN	AGR-CCA	10,40769	8,021958	12,79343	0
AGR	AGR-CCA	1,599799	-0,78593	3,985533	0,284289
AGR	AGN	-8,80789	-11,1936	-6,42216	0

Fonte: O autor (2019).

Tabela 61 - Teste de Tukey considerando CCA e idade

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
CCA0-28d	CCA-28d	0,212427	-2,17331	2,598161	0,994961
CCA-91d	CCA-28d	5,952728	3,566994	8,338462	7E-07
CCA0-91d	CCA-28d	4,813922	2,428188	7,199656	2,92E-05
CCA-91d	CCA0-28d	5,740301	3,354567	8,126035	1,4E-06
CCA0-91d	CCA0-28d	4,601494	2,21576	6,987228	5,87E-05
CCA0-91d	CCA-91d	-1,13881	-3,52454	1,246927	0,573779

Fonte: O autor (2019).

Tabela 62 - Teste de Tukey considerando teor de AGR e idade

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
AGR-28d	AGN-28d	-10,1144	-12,5002	-7,7287	0
AGN-91d	AGN-28d	6,03356	3,647826	8,419293	6E-07
AGR-91d	AGN-28d	-5,59377	-7,9795	-3,20804	2,3E-06
AGN-91d	AGR-28d	16,14799	13,76226	18,53373	0
AGR-91d	AGR-28d	4,520663	2,134929	6,906397	7,65E-05
AGR-91d	AGN-91d	-11,6273	-14,0131	-9,2416	0

Fonte: O autor (2019).

Tabela 63 - Teste de Tukey considerando método de mistura, teor de AGR e CCA

(continua)					
Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN-CCA	TM-AGN-CCA	-3,14005	-7,17391	0,89381	0,222872
TM-AGR-CCA	TM-AGN-CCA	-12,3084	-16,3423	-8,27455	0
TSMA-AGR-CCA	TM-AGN-CCA	-16,6994	-20,7332	-12,6655	0
TM-AGN	TM-AGN-CCA	-3,57441	-7,60827	0,459454	0,112968
TSMA-AGN	TM-AGN-CCA	-4,618	-8,65186	-0,58414	0,01592
TM-AGR	TM-AGN-CCA	-13,3996	-17,4334	-9,36571	0
TSMA-AGR	TM-AGN-CCA	-12,4086	-16,4425	-8,37476	0
TM-AGR-CCA	TSMA-AGN-CCA	-9,16836	-13,2022	-5,13449	6E-07
TSMA-AGR-CCA	TSMA-AGN-CCA	-13,5593	-17,5932	-9,52547	0
TM-AGN	TSMA-AGN-CCA	-0,43436	-4,46822	3,599505	0,999962
TSMA-AGN	TSMA-AGN-CCA	-1,47795	-5,51181	2,555912	0,9299

TM-AGR	TSMA-AGN-CCA	-10,2595	-14,2934	-6,22566	1E-07
TSMA-AGR	TSMA-AGN-CCA	-9,26857	-13,3024	-5,23471	5E-07
TSMA-AGR-CCA	TM-AGR-CCA	-4,39098	-8,42484	-0,35712	0,02514
TM-AGN	TM-AGR-CCA	8,733999	4,700137	12,76786	1,6E-06
TSMA-AGN	TM-AGR-CCA	7,690406	3,656545	11,72427	1,67E-05
TM-AGR	TM-AGR-CCA	-1,09117	-5,12503	2,942695	0,986213
TSMA-AGR	TM-AGR-CCA	-0,10021	-4,13408	3,933647	1
TM-AGN	TSMA-AGR-CCA	13,12498	9,091116	17,15884	0
TSMA-AGN	TSMA-AGR-CCA	12,08138	8,047523	16,11525	0
TM-AGR	TSMA-AGR-CCA	3,299813	-0,73405	7,333674	0,175624
TSMA-AGR	TSMA-AGR-CCA	4,290765	0,256903	8,324626	0,030616
TSMA-AGN	TM-AGN	-1,04359	-5,07745	2,990269	0,989359
TM-AGR	TM-AGN	-9,82517	-13,859	-5,7913	1E-07
TSMA-AGR	TM-AGN	-8,83421	-12,8681	-4,80035	1,2E-06
TM-AGR	TSMA-AGN	-8,78157	-12,8154	-4,74771	1,4E-06
TSMA-AGR	TSMA-AGN	-7,79062	-11,8245	-3,75676	1,33E-05
TSMA-AGR	TM-AGR	0,990952	-3,04291	5,024814	0,992163

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 64 - Teste de Tukey considerando método de mistura, CCA e idade

(continua)					
Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-CCA-28d	TM-CCA-28d	-0,45967	-4,49353	3,574192	0,999945
TM-28d	TM-CCA-28d	-0,9753	-5,00916	3,05856	0,992874
TSMA-28d	TM-CCA-28d	0,940486	-3,09338	4,974348	0,994276
TM-CCA-91d	TM-CCA-28d	9,258574	5,224712	13,29244	5E-07
TSMA-CCA-91d	TM-CCA-28d	2,187213	-1,84665	6,221075	0,652117
TM-91d	TM-CCA-28d	5,568301	1,534439	9,602162	0,002087
TSMA-91d	TM-CCA-28d	3,599873	-0,43399	7,633734	0,108235
TM-28d	TSMA-CCA-28d	-0,51563	-4,54949	3,51823	0,999881
TSMA-28d	TSMA-CCA-28d	1,400156	-2,63371	5,434018	0,946468
TM-CCA-91d	TSMA-CCA-28d	9,718243	5,684382	13,7521	2E-07
TSMA-CCA-91d	TSMA-CCA-28d	2,646883	-1,38698	6,680745	0,421088
TM-91d	TSMA-CCA-28d	6,027971	1,994109	10,06183	0,000746
TSMA-91d	TSMA-CCA-28d	4,059543	0,025681	8,093404	0,047656
TSMA-28d	TM-28d	1,915788	-2,11807	5,949649	0,781298
TM-CCA-91d	TM-28d	10,23388	6,200014	14,26774	1E-07
TSMA-CCA-91d	TM-28d	3,162515	-0,87135	7,196376	0,215719
TM-91d	TM-28d	6,543602	2,509741	10,57746	0,000231
TSMA-91d	TM-28d	4,575174	0,541313	8,609036	0,017371
TM-CCA-91d	TSMA-28d	8,318087	4,284226	12,35195	0,000004
TSMA-CCA-91d	TSMA-28d	1,246727	-2,78713	5,280589	0,970919
TM-91d	TSMA-28d	4,627815	0,593953	8,661676	0,015604
TSMA-91d	TSMA-28d	2,659386	-1,37448	6,693248	0,41519
TSMA-CCA-91d	TM-CCA-91d	-7,07136	-11,1052	-3,0375	6,89E-05

TM-91d	TM-CCA-91d	-3,69027	-7,72413	0,343589	0,092757
TSMA-91d	TM-CCA-91d	-5,6587	-9,69256	-1,62484	0,001707
TM-91d	TSMA-CCA-91d	3,381088	-0,65277	7,414949	0,154741
TSMA-91d	TSMA-CCA-91d	1,412659	-2,6212	5,446521	0,944003
TSMA-91d	TM-91d	-1,96843	-6,00229	2,065433	0,757827

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 65 - Teste de Tukey considerando método de mistura, teor de AGR e idade

(continua)					
Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN-28d	TM-AGN-28d	1,393782	-2,64008	5,427643	0,947696
TM-AGR-28d	TM-AGN-28d	-9,44871	-13,4826	-5,41485	3E-07
TSMA-AGR-28d	TM-AGN-28d	-9,38637	-13,4202	-5,35251	4E-07
TM-AGN-91d	TM-AGN-28d	9,519163	5,485302	13,55302	3E-07
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-28d	3,941737	-0,09212	7,975599	0,059281
TM-AGR-91d	TM-AGN-28d	-3,1657	-7,19956	0,868164	0,214719
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-28d	-6,62806	-10,6619	-2,5942	0,00019
TM-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	-10,8425	-14,8764	-6,80863	0
TSMA-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	-10,7802	-14,814	-6,74629	0
TM-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	8,125382	4,09152	12,15924	6,2E-06
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	2,547956	-1,48591	6,581817	0,468932
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	-4,55948	-8,59334	-0,52562	0,017933
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	-8,02184	-12,0557	-3,98798	7,8E-06
TSMA-AGR-28d	TM-AGR-28d	0,062336	-3,97153	4,096198	1
TM-AGN-91d	TM-AGR-28d	18,96787	14,93401	23,00174	0
TSMA-AGN-91d	TM-AGR-28d	13,39045	9,356587	17,42431	0
TM-AGR-91d	TM-AGR-28d	6,283013	2,249151	10,31687	0,000419
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-28d	2,82065	-1,21321	6,854512	0,342741
TM-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	18,90554	14,87168	22,9394	0
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	13,32811	9,29425	17,36197	0
TM-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	6,220677	2,186815	10,25454	0,000482
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	2,758314	-1,27555	6,792175	0,369901
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-91d	-5,57743	-9,61129	-1,54356	0,002045
TM-AGR-91d	TM-AGN-91d	-12,6849	-16,7187	-8,651	0
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-91d	-16,1472	-20,1811	-12,1134	0
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	-7,10744	-11,1413	-3,07357	6,35E-05
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	-10,5698	-14,6037	-6,53594	0
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-91d	-3,46236	-7,49622	0,571499	0,135874

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 66 - Teste de Tukey considerando teor de AGR, CCA e idade

(continua)					
Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor

AGR-CCA-28d	AGN-CCA-28d	-10,1952	-14,2291	-6,16136	0,0000001
AGN-28d	AGN-CCA-28d	0,131638	-3,90222	4,165499	1
AGR-28d	AGN-CCA-28d	-9,90201	-13,9359	-5,86814	0,0000001
AGN-CCA-91d	AGN-CCA-28d	8,691376	4,657514	12,72524	0,0000017
AGR-CCA-91d	AGN-CCA-28d	-6,98114	-11,015	-2,94728	0,0000848
AGN-91d	AGN-CCA-28d	3,507381	-0,52648	7,541242	0,1262522
AGR-91d	AGN-CCA-28d	-4,07476	-8,10862	-0,0409	0,0463139
AGN-28d	AGR-CCA-28d	10,32686	6,292999	14,36072	0
AGR-28d	AGR-CCA-28d	0,293217	-3,74064	4,327078	0,9999975
AGN-CCA-91d	AGR-CCA-28d	18,8866	14,85274	22,92046	0
AGR-CCA-91d	AGR-CCA-28d	3,214081	-0,81978	7,247943	0,1999343
AGN-91d	AGR-CCA-28d	13,7026	9,668743	17,73647	0
AGR-91d	AGR-CCA-28d	6,120463	2,086601	10,15432	0,0006052
AGR-28d	AGN-28d	-10,0336	-14,0675	-5,99978	0,0000001
AGN-CCA-91d	AGN-28d	8,559738	4,525877	12,5936	0,0000023
AGR-CCA-91d	AGN-28d	-7,11278	-11,1466	-3,07892	0,0000627
AGN-91d	AGN-28d	3,375743	-0,65812	7,409605	0,1560516
AGR-91d	AGN-28d	-4,2064	-8,24026	-0,17254	0,036054
AGN-CCA-91d	AGR-28d	18,59338	14,55952	22,62724	0
AGR-CCA-91d	AGR-28d	2,920864	-1,113	6,954726	0,3015448
AGN-91d	AGR-28d	13,40939	9,375526	17,44325	0
AGR-91d	AGR-28d	5,827246	1,793384	9,861107	0,0011719
AGR-CCA-91d	AGN-CCA-91d	-15,6725	-19,7064	-11,6387	0
AGN-91d	AGN-CCA-91d	-5,18399	-9,21786	-1,15013	0,0048369
AGR-91d	AGN-CCA-91d	-12,7661	-16,8	-8,73227	0
AGN-91d	AGR-CCA-91d	10,48852	6,454662	14,52238	0
AGR-91d	AGR-CCA-91d	2,906382	-1,12748	6,940243	0,3073024
AGR-91d	AGN-91d	-7,58214	-11,616	-3,54828	0,0000214

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 67 - Resultado do teste de Tukey para resistência à compressão

(continua)					
Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN-CCA-28d	TM-AGN-CCA-28d	1,418753	-5,1115712	7,94907622	0,999969
TM-AGR-CCA-28d	TM-AGN-CCA-28d	-8,3168	-14,8471244	-1,78647699	0,003731
TSMA-AGR-CCA-28d	TM-AGN-CCA-28d	-10,6549	-17,1852166	-4,12456921	9,25E-05
TM-AGN-28d	TM-AGN-CCA-28d	0,156608	-6,3737153	6,68693218	1
TSMA-AGN-28d	TM-AGN-CCA-28d	1,525419	-5,0049045	8,05574289	0,999923
TM-AGR-28d	TM-AGN-CCA-28d	-10,424	-16,9543359	-3,89368843	0,000134
TSMA-AGR-28d	TM-AGN-CCA-28d	-7,96125	-14,4915712	-1,43092378	0,006416
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	13,25018	6,7198558	19,78050325	1,5E-06

TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	5,551324	-0,9789993	12,08164813	0,167754
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	-3,04983	-9,5801568	3,4804906	0,922275
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	-9,4937	-16,0240222	-2,96337474	0,00059
TM-AGN-91d	TM-AGN-CCA-28d	5,944755	-0,5855683	12,47507915	0,105799
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-CCA-28d	2,488759	-4,0415648	9,01908261	0,984771
TM-AGR-91d	TM-AGN-CCA-28d	-3,12495	-9,655278	3,40536946	0,908071
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-CCA-28d	-3,60581	-10,1361381	2,92450933	0,782328
TM-AGR-CCA-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	-9,73555	-16,2658769	-3,20522949	0,000402
TSMA-AGR-CCA-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	-12,0736	-18,6039691	-5,54332171	9,7E-06
TM-AGN-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	-1,26214	-7,7924678	5,26817968	0,999993
TSMA-AGN-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	0,106667	-6,4236571	6,63699038	1
TM-AGR-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	-11,8428	-18,3730884	-5,31244094	1,39E-05
TSMA-AGR-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	-9,38	-15,9103237	-2,84967628	0,000707
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	11,83143	5,3011033	18,36175074	1,42E-05
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	4,132572	-2,3977518	10,66289563	0,595684
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-4,46859	-10,9989093	2,06173809	0,471286
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-10,9125	-17,4427747	-4,38212725	6,13E-05
TM-AGN-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	4,526003	-2,0043208	11,05632665	0,450765
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	1,070006	-5,4603173	7,60033011	0,999999
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-4,54371	-11,0740305	1,98661696	0,444505
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-5,02457	-11,5548906	1,50575682	0,291
TSMA-AGR-CCA-28d	TM-AGR-CCA-28d	-2,33809	-8,8684159	4,1922315	0,991446
TM-AGN-28d	TM-AGR-CCA-28d	8,473409	1,9430855	15,00373289	0,00293
TSMA-AGN-28d	TM-AGR-CCA-28d	9,84222	3,3118962	16,37254359	0,000339
TM-AGR-28d	TM-AGR-CCA-28d	-2,10721	-8,6375352	4,42311227	0,996949
TSMA-AGR-28d	TM-AGR-CCA-28d	0,355553	-6,1747705	6,88587693	1
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	21,56698	15,0366565	28,09730395	0
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	13,86813	7,3378014	20,39844884	6E-07
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	5,266968	-1,2633561	11,7972913	0,228185
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	-1,1769	-7,7072215	5,35342596	0,999997
TM-AGN-91d	TM-AGR-CCA-28d	14,26156	7,7312324	20,79187986	3E-07
TSMA-AGN-91d	TM-AGR-CCA-28d	10,80556	4,2752359	17,33588332	7,27E-05
TM-AGR-91d	TM-AGR-CCA-28d	5,191846	-1,3384773	11,72217017	0,246529
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-CCA-28d	4,710986	-1,8193374	11,24131003	0,387224
TM-AGN-28d	TSMA-AGR-CCA-28d	10,8115	4,2811777	17,34182511	0,000072
TSMA-AGN-28d	TSMA-AGR-CCA-28d	12,18031	5,6499884	18,71063581	8,2E-06
TM-AGR-28d	TSMA-AGR-CCA-28d	0,230881	-6,2994429	6,76120449	1
TSMA-AGR-28d	TSMA-AGR-CCA-28d	2,693645	-3,8366783	9,22396914	0,969908
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	23,90507	17,3747487	30,43539617	0
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	16,20622	9,6758936	22,73654106	0
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	7,60506	1,0747361	14,13538352	0,010934
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	1,161194	-5,3691293	7,69151818	0,999998
TM-AGN-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	16,59965	10,0693246	23,12997208	0
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	13,14365	6,6133281	19,67397554	1,8E-06
TM-AGR-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	7,529939	0,999615	14,06026239	0,012216
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	7,049079	0,5187548	13,57940225	0,024474

TSMA-AGN-28d	TM-AGN-28d	1,368811	-5,161513	7,89913442	0,99998
TM-AGR-28d	TM-AGN-28d	-10,5806	-17,1109443	-4,0502969	0,000104
TSMA-AGR-28d	TM-AGN-28d	-8,11786	-14,6481797	-1,58753225	0,005059
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGN-28d	13,09357	6,5632473	19,62389478	0,000002
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGN-28d	5,394716	-1,1356078	11,92503967	0,199296
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGN-28d	-3,20644	-9,7367653	3,32388213	0,890938
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGN-28d	-9,65031	-16,1806306	-3,11998321	0,00046
TM-AGN-91d	TM-AGN-28d	5,788147	-0,7421767	12,31847069	0,127688
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-28d	2,33215	-4,1981733	8,86247415	0,99165
TM-AGR-91d	TM-AGN-28d	-3,28156	-9,8118864	3,248761	0,873559
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-28d	-3,76242	-10,2927466	2,76790086	0,730339
TM-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	-11,9494	-18,479755	-5,4191076	1,18E-05
TSMA-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	-9,48667	-16,0169904	-2,95634295	0,000597
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	11,72476	5,1944366	18,25508408	1,68E-05
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	4,025905	-2,5044185	10,55622896	0,635476
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	-4,57525	-11,105576	1,95507143	0,433438
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	-11,0191	-17,5494413	-4,48879391	5,17E-05
TM-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	4,419336	-2,1109875	10,94965998	0,489131
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	0,96334	-5,566984	7,49366344	1
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	-4,65037	-11,1806971	1,87995029	0,407563
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	-5,13123	-11,6615573	1,39909016	0,262067
TSMA-AGR-28d	TM-AGR-28d	2,462765	-4,0675591	8,99308837	0,986146
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGR-28d	23,67419	17,143868	30,2045154	0
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGR-28d	15,97534	9,4450128	22,50566028	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGR-28d	7,374179	0,8438553	13,90450275	0,015345
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGR-28d	0,930314	-5,60001	7,46063741	1
TM-AGN-91d	TM-AGR-28d	16,36877	9,8384439	22,8990913	0
TSMA-AGN-91d	TM-AGR-28d	12,91277	6,3824473	19,44309476	2,6E-06
TM-AGR-91d	TM-AGR-28d	7,299058	0,7687342	13,82938161	0,017112
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-28d	6,818198	0,287874	13,34852148	0,033806
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	21,21143	14,6811033	27,74175074	0
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	13,51257	6,9822482	20,04289563	0,000001
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	4,911414	-1,6189093	11,44173809	0,323864
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	-1,53245	-8,0627747	4,99787275	0,999918
TM-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	13,906	7,3756792	20,43632665	6E-07
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	10,45001	3,9196827	16,98033011	0,000128
TM-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	4,836293	-1,6940305	11,36661696	0,34687
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	4,355433	-2,1748906	10,88575682	0,512564
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGN-CCA-91d	-7,69886	-14,2291788	-1,1685314	0,009513
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-91d	-16,3	-22,8303364	-9,76968893	0
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-91d	-22,7439	-29,2742017	-16,21355427	0
TM-AGN-91d	TM-AGN-CCA-91d	-7,30542	-13,8357478	-0,77510038	0,016955
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-CCA-91d	-10,7614	-17,2917444	-4,23109692	0,000078
TM-AGR-91d	TM-AGN-CCA-91d	-16,3751	-22,9054575	-9,84481007	0
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-CCA-91d	-16,856	-23,3863176	-10,3256702	0
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	-8,60116	-15,1314813	-2,07083382	0,002403

TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	-15,045	-21,5753466	-8,51469916	1E-07
TM-AGN-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	0,393431	-6,1368927	6,92375474	1
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	-3,06257	-9,5928892	3,4677582	0,919975
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	-8,67628	-15,2066024	-2,14595495	0,002138
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	-9,15714	-15,6874625	-2,62681509	0,001006
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGR-CCA-91d	-6,44387	-12,9741891	0,08645838	0,056084
TM-AGN-91d	TM-AGR-CCA-91d	8,994589	2,4642648	15,52491227	0,001299
TSMA-AGN-91d	TM-AGR-CCA-91d	5,538592	-0,9917317	12,06891573	0,170164
TM-AGR-91d	TM-AGR-CCA-91d	-0,07512	-6,6054449	6,45520258	1
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-CCA-91d	-0,55598	-7,086305	5,97434245	1
TM-AGN-91d	TSMA-AGR-CCA-91d	15,43845	8,9081302	21,96877761	1E-07
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGR-CCA-91d	11,98246	5,4521336	18,51278107	1,12E-05
TM-AGR-91d	TSMA-AGR-CCA-91d	6,368744	-0,1615795	12,89906792	0,061901
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGR-CCA-91d	5,887884	-0,6424396	12,41820779	0,113351
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-91d	-3,456	-9,9863203	3,07432718	0,827567
TM-AGR-91d	TM-AGN-91d	-9,06971	-15,6000334	-2,53938597	0,001154
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-91d	-9,55057	-16,0808935	-3,02024611	0,000539
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	-5,61371	-12,1440369	0,91661057	0,156336
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	-6,09457	-12,624897	0,43575043	0,08792
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-91d	-0,48086	-7,0111839	6,04946358	1

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE B – TESTE DE TUKEY PARA RESISTÊNCIA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Tabela 68 - Teste de Tukey, fatores isolados para absorção de água

Fator	Nível 1	Nível 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
Método de mistura	TSMA	TM	-1,65%	-1,85%	-1,44%	0
Teor de AGR	AGR	AGN	1,14%	0,93%	1,34%	0
Teor de CCA	CCA0	CCA	0,31%	0,11%	0,52%	0,0043
Idade	91d	28d	-1,32%	-1,53%	-1,12%	0

Fonte: O autor (2019).

Tabela 69 - Teste de Tukey considerando método de mistura e teor de AGR

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN	TM-AGN	-1,62%	-2,01%	-1,23%	0
TM-AGR	TM-AGN	1,16%	0,78%	1,55%	0,00E+00
TSMA-AGR	TM-AGN	-0,51%	-0,90%	-0,12%	6,26E-03
TM-AGR	TSMA-AGN	2,78%	2,39%	3,17%	0
TSMA-AGR	TSMA-AGN	1,11%	0,72%	1,50%	1,00E-07
TSMA-AGR	TM-AGR	-1,68%	-2,07%	-1,29%	0

Fonte: O autor (2019).

Tabela 70 - Teste de Tukey considerando Método de mistura e CCA

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA	TM	-1,50%	-1,89%	-1,12%	0
TM-CCA	TM	0,45%	0,07%	0,84%	1,71E-02
TSMA-CCA	TM	-1,33%	-1,72%	-0,95%	0,00E+00
TM-CCA	TSMA	1,96%	1,57%	2,35%	0
TSMA-CCA	TSMA	0,17%	-0,22%	0,56%	6,41E-01
TSMA-CCA	TM-CCA	-1,79%	-2,18%	-1,40%	0

Fonte: O autor (2019).

Tabela 71 - Teste de Tukey considerando método de mistura e idade

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-28d	TM-28d	-0,24%	-0,63%	0,15%	0,343711
TM-91d	TM-28d	0,08%	-0,31%	0,47%	9,46E-01
TSMA-91d	TM-28d	-2,97%	-3,36%	-2,58%	0,00E+00
TM-91d	TSMA-28d	0,32%	-0,07%	0,71%	0,133381
TSMA-91d	TSMA-28d	-2,73%	-3,12%	-2,34%	0,00E+00
TSMA-91d	TM-91d	-3,05%	-3,44%	-2,66%	0

Fonte: O autor (2019).

Tabela 72 - Teste de Tukey considerando teor de AGR e CCA

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
AGR	AGN	1,13%	0,74%	1,51%	0
AGN-CCA	AGN	0,30%	-0,09%	0,69%	1,76E-01
AGR-CCA	AGN	1,45%	1,06%	1,84%	0,00E+00
AGN-CCA	AGR	-0,82%	-1,21%	-0,43%	1,36E-05
AGR-CCA	AGR	0,32%	-0,07%	0,71%	1,32E-01
AGR-CCA	AGN-CCA	1,15%	0,76%	1,54%	0

Fonte: O autor (2019).

Tabela 73 - Teste de Tukey considerando CCA e idade

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
CCA-28d	CCA0-28d	0,52%	0,13%	0,91%	0,004909
CCA0-91d	CCA0-28d	-1,11%	-1,50%	-0,72%	0,00E+00
CCA-91d	CCA0-28d	-1,01%	-1,40%	-0,62%	3,00E-07
CCA0-91d	CCA-28d	-1,64%	-2,03%	-1,25%	0
CCA-91d	CCA-28d	-1,54%	-1,93%	-1,15%	0,00E+00
CCA-91d	CCA0-91d	0,10%	-0,29%	0,49%	0,896625

Fonte: O autor (2019).

Tabela 74 - Teste de Tukey considerando Teor de AGR e idade

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
AGR-28d	AGN-28d	1,62%	1,23%	2,01%	0
AGN-91d	AGN-28d	-0,84%	-1,23%	-0,45%	9,30E-06
AGR-91d	AGN-28d	-0,19%	-0,58%	0,20%	5,62E-01
AGN-91d	AGR-28d	-2,46%	-2,85%	-2,07%	0
AGR-91d	AGR-28d	-1,81%	-2,20%	-1,42%	0,00E+00
AGR-91d	AGN-91d	0,65%	0,26%	1,04%	0,000406

Fonte: O autor (2019).

Tabela 75 - Teste de Tukey considerando Método de mistura, teor de AGR e CCA

(continua)					
Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN	TM-AGN	-1,20%	-1,86%	-0,55%	0,000034
TM-AGR	TM-AGN	1,43%	0,77%	2,08%	1,6E-06
TSMA-AGR	TM-AGN	-0,38%	-1,04%	0,28%	0,581089
TM-AGN-CCA	TM-AGN	0,72%	0,06%	1,37%	0,025527
TSMA-AGN-CCA	TM-AGN	-1,32%	-1,98%	-0,66%	0,000007
TM-AGR-CCA	TM-AGN	1,62%	0,96%	2,28%	1E-07
TSMA-AGR-CCA	TM-AGN	0,07%	-0,59%	0,73%	0,999954
TM-AGR	TSMA-AGN	2,63%	1,97%	3,29%	0
TSMA-AGR	TSMA-AGN	0,82%	0,17%	1,48%	0,006405
TM-AGN-CCA	TSMA-AGN	1,92%	1,26%	2,58%	0
TSMA-AGN-CCA	TSMA-AGN	-0,11%	-0,77%	0,55%	0,999187

TM-AGR-CCA	TSMA-AGN	2,82%	2,17%	3,48%	0
TSMA-AGR-CCA	TSMA-AGN	1,28%	0,62%	1,94%	1,22E-05
TSMA-AGR	TM-AGR	-1,81%	-2,46%	-1,15%	0
TM-AGN-CCA	TM-AGR	-0,71%	-1,37%	-0,05%	0,027073
TSMA-AGN-CCA	TM-AGR	-2,74%	-3,40%	-2,08%	0
TM-AGR-CCA	TM-AGR	0,19%	-0,46%	0,85%	0,977805
TSMA-AGR-CCA	TM-AGR	-1,35%	-2,01%	-0,69%	4,3E-06
TM-AGN-CCA	TSMA-AGR	1,09%	0,44%	1,75%	0,000158
TSMA-AGN-CCA	TSMA-AGR	-0,94%	-1,60%	-0,28%	0,001416
TM-AGR-CCA	TSMA-AGR	2,00%	1,34%	2,66%	0
TSMA-AGR-CCA	TSMA-AGR	0,45%	-0,21%	1,11%	0,362778
TSMA-AGN-CCA	TM-AGN-CCA	-2,03%	-2,69%	-1,37%	0
TM-AGR-CCA	TM-AGN-CCA	0,90%	0,25%	1,56%	0,00222
TSMA-AGR-CCA	TM-AGN-CCA	-0,64%	-1,30%	0,02%	0,059985
TM-AGR-CCA	TSMA-AGN-CCA	2,94%	2,28%	3,59%	0
TSMA-AGR-CCA	TSMA-AGN-CCA	1,39%	0,73%	2,05%	2,5E-06
TSMA-AGR-CCA	TM-AGR-CCA	-1,55%	-2,20%	-0,89%	3E-07

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 76 - Teste de Tukey considerando Método de mistura, CCA e idade.

(continua)					
Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-28d	TM-28d	-0,82%	-1,48%	-0,16%	0,006619
TM-CCA-28d	TM-28d	-0,05%	-0,71%	0,60%	0,999994
TSMA-CCA-28d	TM-28d	0,28%	-0,38%	0,94%	0,858678
TM-91d	TM-28d	-0,43%	-1,09%	0,23%	0,426332
TSMA-91d	TM-28d	-2,62%	-3,28%	-1,96%	0
TM-CCA-91d	TM-28d	0,53%	-0,12%	1,19%	0,184028
TSMA-CCA-91d	TM-28d	-3,38%	-4,04%	-2,72%	0
TM-CCA-28d	TSMA-28d	0,77%	0,11%	1,43%	0,013371
TSMA-CCA-28d	TSMA-28d	1,10%	0,44%	1,76%	0,000141
TM-91d	TSMA-28d	0,39%	-0,27%	1,05%	0,542367
TSMA-91d	TSMA-28d	-1,80%	-2,45%	-1,14%	0
TM-CCA-91d	TSMA-28d	1,36%	0,70%	2,01%	4,1E-06
TSMA-CCA-91d	TSMA-28d	-2,56%	-3,22%	-1,90%	0
TSMA-CCA-28d	TM-CCA-28d	0,34%	-0,32%	0,99%	0,716999
TM-91d	TM-CCA-28d	-0,38%	-1,03%	0,28%	0,594156
TSMA-91d	TM-CCA-28d	-2,56%	-3,22%	-1,90%	0
TM-CCA-91d	TM-CCA-28d	0,59%	-0,07%	1,25%	0,107468
TSMA-CCA-91d	TM-CCA-28d	-3,33%	-3,98%	-2,67%	0
TM-91d	TSMA-CCA-28d	-0,71%	-1,37%	-0,05%	0,026904
TSMA-91d	TSMA-CCA-28d	-2,90%	-3,56%	-2,24%	0
TM-CCA-91d	TSMA-CCA-28d	0,25%	-0,41%	0,91%	0,912305
TSMA-CCA-91d	TSMA-CCA-28d	-3,66%	-4,32%	-3,00%	0

TSMA-91d	TM-91d	-2,19%	-2,85%	-1,53%	0
TM-CCA-91d	TM-91d	0,96%	0,31%	1,62%	0,000984
TSMA-CCA-91d	TM-91d	-2,95%	-3,61%	-2,29%	0
TM-CCA-91d	TSMA-91d	3,15%	2,49%	3,81%	0
TSMA-CCA-91d	TSMA-91d	-0,76%	-1,42%	-0,10%	0,014203
TSMA-CCA-91d	TM-CCA-91d	-3,91%	-4,57%	-3,26%	0

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 77 - Teste de Tukey considerando método de mistura, teor de AGR e idade

(continua)

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN-28d	TM-AGN-28d	-0,42%	-1,07%	0,24%	0,470451
TM-AGR-28d	TM-AGN-28d	1,45%	0,79%	2,10%	1,2E-06
TSMA-AGR-28d	TM-AGN-28d	1,37%	0,72%	2,03%	3,1E-06
TM-AGN-91d	TM-AGN-28d	0,36%	-0,30%	1,02%	0,64149
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-28d	-2,46%	-3,12%	-1,80%	0
TM-AGR-91d	TM-AGN-28d	1,24%	0,59%	1,90%	1,95E-05
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-28d	-2,04%	-2,69%	-1,38%	0
TM-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	1,86%	1,20%	2,52%	0
TSMA-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	1,79%	1,13%	2,45%	0
TM-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	0,78%	0,12%	1,43%	0,012054
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	-2,05%	-2,70%	-1,39%	0
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	1,66%	1,00%	2,32%	1E-07
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	-1,62%	-2,28%	-0,96%	1E-07
TSMA-AGR-28d	TM-AGR-28d	-0,07%	-0,73%	0,59%	0,999961
TM-AGN-91d	TM-AGR-28d	-1,09%	-1,74%	-0,43%	0,000179
TSMA-AGN-91d	TM-AGR-28d	-3,91%	-4,57%	-3,25%	0
TM-AGR-91d	TM-AGR-28d	-0,20%	-0,86%	0,46%	0,971765
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-28d	-3,48%	-4,14%	-2,82%	0
TM-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	-1,01%	-1,67%	-0,36%	0,000486
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	-3,84%	-4,49%	-3,18%	0
TM-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	-0,13%	-0,79%	0,53%	0,997851
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	-3,41%	-4,07%	-2,75%	0
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-91d	-2,82%	-3,48%	-2,16%	0
TM-AGR-91d	TM-AGN-91d	0,88%	0,23%	1,54%	0,002929
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-91d	-2,40%	-3,06%	-1,74%	0
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	3,70%	3,05%	4,36%	0
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	0,42%	-0,23%	1,08%	0,44344
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-91d	-3,28%	-3,94%	-2,62%	0

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 78 - Teste de Tukey considerando teor de AGR, CCA e idade.

(continua)

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
AGR-28d	AGN-28d	1,46%	0,80%	2,12%	0,000001
AGN-CCA-28d	AGN-28d	0,37%	-0,29%	1,02%	0,624766
AGR-CCA-28d	AGN-28d	2,14%	1,48%	2,80%	0
AGN-91d	AGN-28d	-0,78%	-1,44%	-0,12%	0,011668
AGR-91d	AGN-28d	0,01%	-0,65%	0,67%	1
AGN-CCA-91d	AGN-28d	-0,54%	-1,20%	0,12%	0,171287
AGR-CCA-91d	AGN-28d	-0,02%	-0,68%	0,63%	1
AGN-CCA-28d	AGR-28d	-1,09%	-1,75%	-0,44%	0,00016
AGR-CCA-28d	AGR-28d	0,68%	0,02%	1,34%	0,037735
AGN-91d	AGR-28d	-2,24%	-2,90%	-1,58%	0
AGR-91d	AGR-28d	-1,45%	-2,11%	-0,79%	1,2E-06
AGN-CCA-91d	AGR-28d	-2,00%	-2,66%	-1,34%	0
AGR-CCA-91d	AGR-28d	-1,48%	-2,14%	-0,83%	7E-07
AGR-CCA-28d	AGN-CCA-28d	1,78%	1,12%	2,43%	0
AGN-91d	AGN-CCA-28d	-1,14%	-1,80%	-0,49%	7,94E-05
AGR-91d	AGN-CCA-28d	-0,35%	-1,01%	0,30%	0,663021
AGN-CCA-91d	AGN-CCA-28d	-0,91%	-1,57%	-0,25%	0,002139
AGR-CCA-91d	AGN-CCA-28d	-0,39%	-1,05%	0,27%	0,550091
AGN-91d	AGR-CCA-28d	-2,92%	-3,58%	-2,26%	0
AGR-91d	AGR-CCA-28d	-2,13%	-2,79%	-1,47%	0
AGN-CCA-91d	AGR-CCA-28d	-2,68%	-3,34%	-2,03%	0
AGR-CCA-91d	AGR-CCA-28d	-2,17%	-2,82%	-1,51%	0
AGR-91d	AGN-91d	0,79%	0,13%	1,45%	0,009966
AGN-CCA-91d	AGN-91d	0,24%	-0,42%	0,90%	0,935599
AGR-CCA-91d	AGN-91d	0,75%	0,10%	1,41%	0,015758
AGN-CCA-91d	AGR-91d	-0,55%	-1,21%	0,10%	0,152181
AGR-CCA-91d	AGR-91d	-0,04%	-0,69%	0,62%	1
AGR-CCA-91d	AGN-CCA-91d	0,52%	-0,14%	1,18%	0,213289

(conclusão)

Fonte: O autor (2019).

Tabela 79 - Resultado do teste de Tukey para absorção de água

(continua)

Mistura 1	Mistura 2	Dif.	Limite inf.	Limite sup.	P-valor
TSMA-AGN-28d	TM-AGN-28d	-0,53%	-1,60%	0,54%	0,881647
TM-AGR-28d	TM-AGN-28d	1,75%	0,69%	2,82%	8,13E-05
TSMA-AGR-28d	TM-AGN-28d	0,64%	-0,43%	1,70%	0,678819
TM-AGN-CCA-28d	TM-AGN-28d	0,25%	-0,81%	1,32%	0,999914
TSMA-AGN-CCA-28d	TM-AGN-28d	-0,05%	-1,12%	1,02%	1
TM-AGR-CCA-28d	TM-AGN-28d	1,39%	0,33%	2,46%	0,002693
TSMA-AGR-CCA-28d	TM-AGN-28d	2,36%	1,30%	3,43%	2E-07

TM-AGN-91d	TM-AGN-28d	-0,10%	-1,17%	0,96%	1
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-28d	-1,98%	-3,05%	-0,92%	8,6E-06
TM-AGR-91d	TM-AGN-28d	1,00%	-0,07%	2,06%	0,087223
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-28d	-1,50%	-2,57%	-0,44%	0,000944
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGN-28d	1,08%	0,01%	2,14%	0,046062
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGN-28d	-2,69%	-3,75%	-1,62%	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGN-28d	1,74%	0,68%	2,81%	8,85E-05
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGN-28d	-2,32%	-3,39%	-1,26%	3E-07
TM-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	2,28%	1,22%	3,35%	5E-07
TSMA-AGR-28d	TSMA-AGN-28d	1,17%	0,10%	2,23%	0,021043
TM-AGN-CCA-28d	TSMA-AGN-28d	0,78%	-0,28%	1,85%	0,362779
TSMA-AGN-CCA-28d	TSMA-AGN-28d	0,48%	-0,59%	1,55%	0,939781
TM-AGR-CCA-28d	TSMA-AGN-28d	1,92%	0,86%	2,99%	1,55E-05
TSMA-AGR-CCA-28d	TSMA-AGN-28d	2,89%	1,83%	3,96%	0
TM-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	0,43%	-0,64%	1,49%	0,976834
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGN-28d	-1,45%	-2,52%	-0,39%	0,001505
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	1,53%	0,46%	2,59%	0,000743
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-28d	-0,97%	-2,04%	0,09%	0,105157
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	1,61%	0,54%	2,67%	0,000341
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	-2,16%	-3,22%	-1,09%	1,6E-06
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	2,27%	1,21%	3,34%	5E-07
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-28d	-1,79%	-2,86%	-0,73%	5,55E-05
TSMA-AGR-28d	TM-AGR-28d	-1,11%	-2,18%	-0,05%	0,033337
TM-AGN-CCA-28d	TM-AGR-28d	-1,50%	-2,57%	-0,44%	0,000944
TSMA-AGN-CCA-28d	TM-AGR-28d	-1,80%	-2,87%	-0,74%	0,00005
TM-AGR-CCA-28d	TM-AGR-28d	-0,36%	-1,43%	0,71%	0,995093
TSMA-AGR-CCA-28d	TM-AGR-28d	0,61%	-0,45%	1,68%	0,736183
TM-AGN-91d	TM-AGR-28d	-1,86%	-2,92%	-0,79%	2,94E-05
TSMA-AGN-91d	TM-AGR-28d	-3,73%	-4,80%	-2,67%	0
TM-AGR-91d	TM-AGR-28d	-0,76%	-1,82%	0,31%	0,412728
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-28d	-3,25%	-4,32%	-2,19%	0
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGR-28d	-0,68%	-1,74%	0,39%	0,591166
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGR-28d	-4,44%	-5,51%	-3,37%	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGR-28d	-0,01%	-1,07%	1,06%	1
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGR-28d	-4,07%	-5,14%	-3,01%	0
TM-AGN-CCA-28d	TSMA-AGR-28d	-0,39%	-1,45%	0,68%	0,990306
TSMA-AGN-CCA-28d	TSMA-AGR-28d	-0,69%	-1,75%	0,38%	0,566083
TM-AGR-CCA-28d	TSMA-AGR-28d	0,75%	-0,31%	1,82%	0,417962
TSMA-AGR-CCA-28d	TSMA-AGR-28d	1,73%	0,66%	2,79%	0,000105
TM-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	-0,74%	-1,81%	0,32%	0,444296
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGR-28d	-2,62%	-3,69%	-1,55%	0
TM-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	0,36%	-0,71%	1,42%	0,995421
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGR-28d	-2,14%	-3,20%	-1,07%	1,9E-06
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	0,44%	-0,63%	1,50%	0,970819
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	-3,33%	-4,39%	-2,26%	0
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	1,11%	0,04%	2,17%	0,035871

TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-28d	-2,96%	-4,02%	-1,89%	0
TSMA-AGN-CCA-28d	TM-AGN-CCA-28d	-0,30%	-1,37%	0,77%	0,999284
TM-AGR-CCA-28d	TM-AGN-CCA-28d	1,14%	0,07%	2,21%	0,026632
TSMA-AGR-CCA-28d	TM-AGN-CCA-28d	2,11%	1,05%	3,18%	2,5E-06
TM-AGN-91d	TM-AGN-CCA-28d	-0,35%	-1,42%	0,71%	0,995786
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-CCA-28d	-2,23%	-3,30%	-1,17%	8E-07
TM-AGR-91d	TM-AGN-CCA-28d	0,74%	-0,32%	1,81%	0,437958
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-CCA-28d	-1,75%	-2,82%	-0,69%	8,13E-05
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	0,82%	-0,24%	1,89%	0,283117
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	-2,94%	-4,00%	-1,87%	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	1,49%	0,43%	2,56%	0,001026
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-28d	-2,57%	-3,64%	-1,51%	0
TM-AGR-CCA-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	1,44%	0,38%	2,51%	0,001678
TSMA-AGR-CCA-28d	TSMA-AGN-CCA-28d	2,41%	1,35%	3,48%	1E-07
TM-AGN-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-0,05%	-1,12%	1,01%	1
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-1,93%	-3,00%	-0,87%	1,39E-05
TM-AGR-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	1,05%	-0,02%	2,11%	0,059054
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-1,45%	-2,52%	-0,39%	0,001523
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	1,13%	0,06%	2,19%	0,030376
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-2,64%	-3,70%	-1,57%	0
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	1,79%	0,73%	2,86%	5,44E-05
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-28d	-2,27%	-3,34%	-1,21%	5E-07
TSMA-AGR-CCA-28d	TM-AGR-CCA-28d	0,97%	-0,09%	2,04%	0,104642
TM-AGN-91d	TM-AGR-CCA-28d	-1,50%	-2,56%	-0,43%	0,000994
TSMA-AGN-91d	TM-AGR-CCA-28d	-3,37%	-4,44%	-2,31%	0
TM-AGR-91d	TM-AGR-CCA-28d	-0,40%	-1,46%	0,67%	0,987883
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-CCA-28d	-2,89%	-3,96%	-1,83%	0
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	-0,32%	-1,38%	0,75%	0,998758
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	-4,08%	-5,15%	-3,01%	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	0,35%	-0,71%	1,42%	0,996158
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGR-CCA-28d	-3,71%	-4,78%	-2,65%	0
TM-AGN-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-2,47%	-3,53%	-1,40%	1E-07
TSMA-AGN-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-4,35%	-5,41%	-3,28%	0
TM-AGR-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-1,37%	-2,43%	-0,30%	0,003381
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-3,86%	-4,93%	-2,80%	0
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-1,29%	-2,35%	-0,22%	0,007144
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-5,05%	-6,12%	-3,99%	0
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-0,62%	-1,69%	0,45%	0,717808
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-CCA-28d	-4,68%	-5,75%	-3,62%	0
TSMA-AGN-91d	TM-AGN-91d	-1,88%	-2,94%	-0,81%	2,36E-05
TM-AGR-91d	TM-AGN-91d	1,10%	0,03%	2,17%	0,037783
TSMA-AGR-91d	TM-AGN-91d	-1,40%	-2,46%	-0,33%	0,002559
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGN-91d	1,18%	0,11%	2,25%	0,018961
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGN-91d	-2,58%	-3,65%	-1,52%	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGN-91d	1,85%	0,78%	2,91%	0,000032
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGN-91d	-2,22%	-3,28%	-1,15%	9E-07

TM-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	2,98%	1,91%	4,04%	0
TSMA-AGR-91d	TSMA-AGN-91d	0,48%	-0,58%	1,55%	0,938615
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-91d	3,06%	1,99%	4,12%	0
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGN-91d	-0,71%	-1,77%	0,36%	0,524734
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-91d	3,73%	2,66%	4,79%	0
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-91d	-0,34%	-1,40%	0,73%	0,997419
TSMA-AGR-91d	TM-AGR-91d	-2,50%	-3,56%	-1,43%	1E-07
TM-AGN-CCA-91d	TM-AGR-91d	0,08%	-0,99%	1,15%	1
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGR-91d	-3,68%	-4,75%	-2,62%	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGR-91d	0,75%	-0,32%	1,81%	0,431039
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGR-91d	-3,32%	-4,38%	-2,25%	0
TM-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-91d	2,58%	1,51%	3,64%	0
TSMA-AGN-CCA-91d	TSMA-AGR-91d	-1,19%	-2,25%	-0,12%	0,017747
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-91d	3,24%	2,18%	4,31%	0
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGR-91d	-0,82%	-1,89%	0,25%	0,290916
TSMA-AGN-CCA-91d	TM-AGN-CCA-91d	-3,76%	-4,83%	-2,70%	0
TM-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-91d	0,67%	-0,40%	1,73%	0,611026
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGN-CCA-91d	-3,40%	-4,46%	-2,33%	0
TM-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	4,43%	3,37%	5,50%	0
TSMA-AGR-CCA-91d	TSMA-AGN-CCA-91d	0,37%	-0,70%	1,43%	0,994123
TSMA-AGR-CCA-91d	TM-AGR-CCA-91d	-4,06%	-5,13%	-3,00%	0

(conclusão)



PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado