



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
IANCA MILENA OLIVETI RIBAS
MARIA EDUARDA PEDROSO DA SILVA OKONSKI

**RESÍDUOS PARA INCORPORAÇÃO EM TRAÇOS DE CONCRETO
CONVENCIONAL**

Palhoça
2020

**IANCA MILENA OLIVETI RIBAS
MARIA EDUARDA PEDROSO DA SILVA OKONSKI**

**RESÍDUOS PARA INCORPORAÇÃO EM TRAÇOS DE CONCRETO
CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade do Sul de Santa Catarina
como requisito parcial à obtenção do título
de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Roberto de Melo Rodrigues, Esp

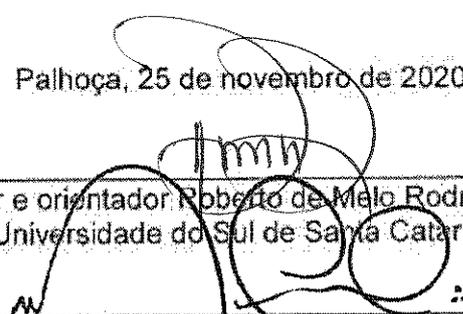
Palhoça
2020

IANCA MILENA OLIVETI RIBAS
MARIA EDUARDA PEDROSO DA SILVA OKONSKI

RESÍDUOS PARA INCORPORAÇÃO EM TRAÇOS DE CONCRETO
CONVENCIONAL

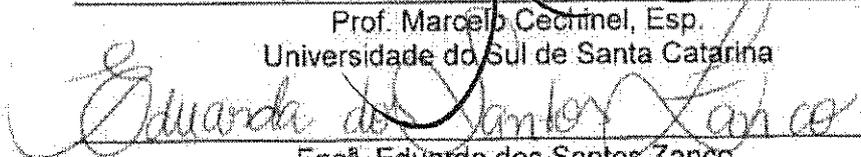
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade do Sul de Santa Catarina
como requisito parcial à obtenção do título
de Engenheiro Civil.

Palhoça, 25 de novembro de 2020.



Professor e orientador Roberto de Melo Rodrigues, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Marcelo Cecchinel, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Eng^a. Eduarda dos Santos Zanco.
Scire Empreendimentos Ltda

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus pela força e persistência que nos concedeu durante esta jornada além de todas as oportunidades que Ele tem nos dado.

Somos gratas também pelo apoio e compreensão de nossos familiares e amigos. Principalmente nossos pais que nos deram suporte para que chegássemos até aqui.

Aos professores, por todo conhecimento transmitido ao longo desses anos, especialmente ao nosso orientador prof. Roberto de Melo Rodrigues, pela paciência e dedicação em nos direcionar nessa pesquisa.

Por fim, o nosso muito obrigado a todos que, de alguma forma, participaram e fizeram parte de nossa jornada acadêmica.

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.” (ALBERT EINSTEIN).

RESUMO

O grande impacto ambiental causado pela indústria civil tem estimulado o interesse por pesquisas que visam alcançar alternativas sustentáveis. Com o objetivo de explorar novas ideias e torná-las mais visíveis, esse trabalho aborda alguns tipos de resíduos que podem ser incorporados como agregados no traço de concreto, diminuindo o consumo de matéria prima e desenvolvendo uma destinação sustentável para esses materiais que seriam descartados. Foram realizadas pesquisas de concretos compostos por resíduos de escória, casca de cerâmica, resíduos industriais e cerâmica vermelha. Através das análises, é possível concluir que essas alternativas são eficientes na maioria dos casos, porém ainda não se pode concluir como serão seus desempenhos ao longo dos anos. Alguns estudos sobre a escória no concreto, os autores avaliaram seu desempenho como agregado miúdo, em outras dissertações os autores analisaram a influência de sua pozolanicidade nas propriedades de argamassa e concretos duráveis. Já para concretos com adição de casca de cerâmica, foram analisados alguns trabalhos que tinha como objetivo caracterizar o resíduo de casca de cerâmica do processo de fundição por cera perdida para empregar como adições pozolanicas. Verificou-se que o resíduo de RCC de microfusão quando adicionado no concreto como agregado graúdo apresenta propriedades adequadas no concreto estudado.

Palavras-chave: Concreto reciclado. Sustentabilidade do concreto. Casca de cerâmica. Resíduo de concreto.

ABSTRACT

The great environmental impact spread by the civil engineering industry has stimulated interest in research aimed at achieving sustainable alternatives. In order to explore new ideas and make them more sought after, this work addresses some types of waste materials that can be incorporated as aggregates in the concrete mix, reducing the consumption of raw materials and developing a sustainable destination for these supplies that would be discarded. Studies were carried out on concretes composed of slag residues, ceramic peel, industrial residues and red ceramics. Through the analysis, it is possible to conclude that these alternatives are efficient in most cases, but it is not yet possible to conclude how they will perform over the years. The studies on slag in concrete, the authors evaluated their performance as a fine aggregate and the influence of its pozzolanic activity on mortar and durable concrete properties. For concretes with the addition of ceramic peel, studies were analyzed that aimed to characterize these residues from the lost wax casting to be used as pozzolanic additions. It was found that the Ceramic peel from the microfusion process when added to concrete as coarse aggregate has adequate properties in the studied concrete.

Keywords: Recycled concrete. Sustainability of concrete. Ceramic shell. Concrete residue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Determinação do Abatimento do Tronco de Cone	28
Figura 2 – Ensaio de tração direta	31
Figura 3 – Ensaio de tração indireta.....	32
Figura 4 – Ensaio de tração na flexão.....	33
Figura 5 – Produção de ferro fundido.....	40
Figura 6 – Processo de fabricação da casca de cerâmica	54
Figura 7 – Percentual de dosagem	56
Figura 8 - Agregado graúdo produzido com telha cerâmica vermelha usada./ Agregado miúdo produzido com telha cerâmica vermelha usada.	75
Figura 9 – Agregado miúdo artificial (cerâmica vermelha) triturado	79
Figura 10 – Corpos-de-prova moldados para estudo de dosagem – traços 1:10, 1:8 e 1:6	86
Figura 11 – Coloração dos corpos-de-prova com diferentes teores de substituição .	88
Figura 12 – Ensaio de abatimento (Slump test)	88
Figura 13 – Moldagem dos corpos-de-prova e câmara úmida	89
Figura 14 – Conclusão da concretagem de uma mini-estaca e em seu processo de cura	91
Figura 15 – Mini estaca retirada do campo para ser ensaiada.....	92
Figura 16 - Resistência à compressão axial do concreto de telha de cerâmica e do convencional, em MPa.	93
Figura 17 – Resistência à Compressão Diametral do Concreto de Telha Cerâmica (CTC) e do Concreto Convencional (CC), dados em MPa.....	94
Figura 18 – Momento final da concretagem de uma das estacas.	97
Figura 19 – Concretagem de um dos blocos e conclusão da execução de um dos blocos.....	97
Figura 20 – Esquema de ensaio (prova de carga)	98
Figura 21 – Painel acústico confeccionado com concreto reciclado	111

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.....	29
Gráfico 2 – Diagramas de esforços solicitantes	33
Gráfico 3 – Ruptura fora do terço médio	34
Gráfico 4 – Resultados de resistência à compressão dos concretos: (a) aos 7 dias e (b) aos 28 dias.....	48
Gráfico 5 – Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos: (a) aos 7 dias e (b) aos 28 dias.....	49
Gráfico 6 – Resultados de resistência média à tração na flexão dos concretos: (a) aos 7 dias e (b) aos 28 dias.....	49
Gráfico 7 – Distribuição granulométrica comparativa dos agregados miúdos – Areia e Casca cerâmicas.....	62
Gráfico 8 – Distribuição granulométrica comparativa dos agregados graúdos – Brita 0 e Casca cerâmica.....	64
Gráfico 9 – Massa específica para o concreto em estado fresco	65
Gráfico 10 – Relação a/c para os diferentes concretos dosados	66
Gráfico 11 – Consumo de cimento para os diferentes concretos dosados	67
Gráfico 12 – Consumo de cimento para as dosagens, para um concreto de 28 dias e 25 MPa de resistência à compressão	67
Gráfico 13 – Resistência à compressão axial aos 28 dias para as dosagens com relação a “m”	68
Gráfico 14 – Resistência à compressão aos 28 dias correlacionada ao consumo de cimento.....	69
Gráfico 15 – Resistência à compressão aos 28 dias comparado com o percentual de absorção de água para os traços pobre, intermediário e rico	70
Gráfico 16– Curva Granulométrica do agregado miúdo reciclado de telha cerâmica vermelha (TVC). Diâmetro máximo característico: 4,8 mm; Módulo de finura: 3,4.	74
Gráfico 17 – Curva Granulométrica do agregado graúdo reciclado de telha cerâmica vermelha (TCV). Diâmetro máximo característico; 12,5 mm; Módulo de finura: 2,87.	74
Gráfico 18 - Curva granulométrica do agregado miúdo – areia de rio. Diâmetro máximo característicos: 4,8mm; modulo de finura: 3,24.....	75

Gráfico 19– Curva granulométrica do agregado graúdo – pedra britada. Diâmetro máximo característico: 19mm; Modulo de Finura: 9,51.....	75
Gráfico 20 – Diagrama de dosagem, segundo o método proposto por Helene e Terzian (1992).....	85
Gráfico 21 – Estudo de dosagem: resistência dos concretos aos 7, 14 e 28 dias.....	85
Gráfico 22 – Resultados de absorção (a) do traço padrão e (b) do traço com teor de substituição 40%.	90
Gráfico 23 – Absorção por Imersão do Concreto de Telha Cerâmica Vermelha (CTC). Dados em %.....	95
Gráfico 24 – Absorção por Capilaridade do Concreto de Telha Cerâmica Vermelha (CTC). Dados em g/cm ²	95
Gráfico 25 – Resultados das resistências de cada traço aos 7, 28, 56 e 120 dias.	99
Gráfico 26 – Médias dos resultados dos módulos de elasticidade para cada traço.	100
Gráfico 27 – Média das resistências à compressão dos corpos-de-prova extraídos das mini-estacas.	101
Gráfico 28 – Modulo de elasticidade em corpos-de-prova com 40% de RCV.....	102
Gráfico 29 – Carga x recalque das estacas em concreto com RCV.....	103
Gráfico 30 – Carga x recalque das estacas em concreto simples ensaiadas por Nacano (2001).....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de composição granulométrica do agregado graúdo	24
Tabela 2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	25
Tabela 3 – Características da areia natural e da escória de cobre	42
Tabela 4 – Análise química dos aglomerantes.....	44
Tabela 5 – Reatividade potencial da escória.....	44
Tabela 6 – Caracterização tecnológica dos aglomerantes.....	45
Tabela 7 – Proporção dos materiais e consumo de cimento dos concretos produzidos	46
Tabela 8 – Resistência à compressão de argamassas aos 28 dias.....	50
Tabela 9 – Resistência à compressão do concreto aos 28 dias.....	51
Tabela 10– Ensaio de absorção de água, índices de vazios e massa específica em argamassas.....	51
Tabela 11– Ensaio de absorção por imersão do concreto	51
Tabela 12 – Composição química do resíduo da casca cerâmica RCC, expressa na forma de óxidos em % da massa da amostra analisada.	57
Tabela 13 – Características físicas do resíduo de casca cerâmica.....	58
Tabela 14 – Distribuição do tamanho de partículas do resíduo da casca cerâmica..	58
Tabela 15 – Análise da atividade pozolânica do resíduo da casca cerâmica.....	59
Tabela 16 – Propriedades do agregado miúdo – areia e casca cerâmica.....	60
Tabela 17– Distribuição granulométrica do agregado miúdo – areia e casca cerâmica	61
Tabela 18 – Propriedades do agregado graúdo – Brita 0 e casca cerâmica.....	63
Tabela 19 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo – Brita 0 e casca cerâmica.....	64
Tabela 20 – Caracterização de cimento Portland CII F -32.	73
Tabela 21 – Caracterização Física dos Agregados Naturais e Reciclados.	74
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural	76
Tabela 23 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural	76
Tabela 24 – Caracterização do agregado graúdo	77
Tabela 25 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo	77
Tabela 26 – Caracterização do cimento CP II – Z – 32.....	78
Tabela 27 – Resultados dos ensaios de caracterização do resíduo cerâmico.....	79

Tabela 28 – Distribuição granulométrica do resíduo cerâmico.....	80
Tabela 29 – Atividade pozolânica.....	80
Tabela 30 – Proporções das misturas dos agregados, pelo método do empacotamento	82
Tabela 31 – Propriedades Físicas do Agregado Após Empacotamento.	82
Tabela 32 – Dados do estado de dosagem; traço rico, intermediário e pobre	84
Tabela 33 – Dados referente ao traço padrão.....	87
Tabela 34 – Resultados dos ensaios com concreto fresco	89
Tabela 35 – Índices físicos dos concretos estudados	92
Tabela 36 – Resistência à Compressão Axial dos Concretos em Estudo.....	93
Tabela 37– Resistencia à compressão diametral dos concretos em estudo.....	94
Tabela 38 – Absorção por Imersão dos Concretos em Estudo. Dados em %.....	94
Tabela 39 – Absorção por Imersão dos Concretos em Estudo. Dados em g/cm ²	95
Tabela 40 – Resultados das resistências dos corpos-de-prova extraídos das mini- estacas e dos CP's confeccionados com o mesmo material.....	104
Tabela 41 - Resumo das cargas máximas obtidas nas provas de carga em estacas em concreto convencional (CON-1, CON-2 e CON-3) e em estacas com resíduo (RCV- 1, RCV-2, RCV-3).....	105
Tabela 42 - Resultados dos ensaios de absorção com os traços padrão e teor de 40% de RCV.....	105
Tabela 43 - Composições de agregados nas dosagens dos concretos (GONÇALVES, 2000).	109
Tabela 44 - Propriedades físicas dos agregados reciclados e do agregado natural.	112

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	16
1.4	PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.5	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	HISTÓRICO DO MATERIAL CONCRETO	19
2.1.1	No mundo	19
2.1.2	No Brasil	20
2.1.3	Perspectivas para o futuro e sustentabilidade	21
2.2	MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO CONVENCIONAL	22
2.2.1	Agregados	22
2.2.1.1	Agregado graúdo	23
2.2.1.2	Agregado miúdo	24
2.2.2	Cimento Portland	25
2.2.3	Água de amassamento	26
2.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO	27
2.3.1	Trabalhabilidade do concreto	27
2.3.2	Resistência à compressão	29
2.3.3	Resistência à tração	30
2.3.3.1	Ensaio de tração direta	31
2.3.3.2	Ensaio de tração indireta	31
2.3.3.3	Ensaio de tração na flexão	32
2.3.3.4	Associação dos resultados dos ensaios	34
2.3.4	Módulo de elasticidade	35
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	36
3.1	INTRODUÇÃO	36
3.2	MÉTODO ADOTADO	36

4 CONCRETO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS.....	38
4.1 INTRODUÇÃO.....	38
4.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS	39
4.2.1 Concreto com adição de escória	40
4.2.1.1 Características do resíduo	42
4.2.1.2 Aplicações	45
4.2.1.3 Dosagem	46
4.2.1.4 Desempenho	47
4.2.2 Casca de cerâmica	52
4.2.2.1 Características do resíduo	53
4.2.2.2 Aplicações	54
4.2.2.3 Dosagem	55
4.2.2.4 Desempenho	57
4.2.2.4.1 Agregado graúdo natural e reciclado – Brita 0 e casca cerâmica	62
4.2.2.4.2 Concreto em estado fresco – Massa específica aparente, relação a/c e consumo de cimento	65
4.2.2.4.3 Resistência à compressão	68
4.3 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO DA CONSTRUÇÃO CIVIL	71
4.3.1 Resíduos de cerâmica vermelha.....	71
4.3.1.1 Características do resíduo	73
4.3.1.2 Aplicações	81
4.3.1.3 Dosagem	81
4.3.1.4 Desempenho	92
4.3.2 Resíduo de concreto.....	106
4.3.2.1 Características do resíduo	107
4.3.2.2 Aplicações	108
4.3.2.3 Dosagem	109
4.3.2.4 Desempenho	109
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	114
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
REFERÊNCIAS.....	116

1 INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos, o concreto passou a ser o material mais consumido pelo homem na construção civil. Nos métodos mais básicos, o concreto era composto por agregados, água e aglomerantes e servia de matéria prima para fabricação de inúmeras estruturas que duram até os dias de hoje. (ISAIA, 2011, p. 1-56). Essas estruturas têm superado o passar dos anos e os ataques de diversas intempéries, continuando erguidas, podendo destacar a influência e a força do concreto. (MEHTA e MONTEIRO, 2008; GIAMMUSSO, 1992).

Segundo Pedroso (2009) acredita-se que são utilizadas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que dá, de acordo com a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), por volta de um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante/ano, consumo menor apenas que a água.

Atualmente, a construção civil é caracterizada como uma das atividades mais relevantes para o desenvolvimento social e econômico, porém, por outro lado, atua ainda diretamente gerando grandes impactos ambientais.

A construção civil em sua cadeia produtiva é responsável por utilizar cerca de 20 a 50% dos recursos naturais do planeta (BRASILEIRO e MATOS, 2015). Todavia é uma das áreas que evidência maior potencial para empregar resíduos sólidos. O aproveitamento dos resíduos como agregado é uma alternativa imprescindível para reduzir o impacto ambiental e preservação do meio ambiente.

A preocupação das indústrias com o meio ambiente aumentou nas últimas décadas, especialmente após ser sancionada a lei nacional de resíduos sólidos 12305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), que estabelece que as empresas que produzem resíduos devem buscar alternativas apropriadas ambientalmente para a destinação final dos resíduos, afim de um desenvolvimento mais sustentável.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.2 JUSTIFICATIVA

Desde os primórdios o homem vem interferindo na natureza, na maioria das vezes, ocasiona em resultados negativos para o meio ambiente. A construção civil é

um ramo que atua diretamente em resultados negativos para o meio ambiente, sendo o setor da indústria que mais consome recursos naturais, apropriando-se de 75% de tudo que é extraído do meio ambiente. Visando diminuir esse impacto surgiu a ideia do concreto sustentável, usando resíduos de indústrias.

A Lei 12.305 (BRASIL, 2010) tem como um dos objetivos principais determinados a prescrição de prioridade para controle dos resíduos, deixando de ser voluntário e passando a ser obrigatório: a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e ambientalmente a disposição final adequada dos rejeitos. Está estabelecido na lei a diferença entre resíduos e rejeitos: resíduos devem ser reciclados e reaproveitados, somente os rejeitos devem ter disposição final.

Diante deste argumento, o emprego de resíduos da construção e da indústria em outro procedimento é uma etapa muito interessante para o resíduo passar da destinação final adequada para a reciclagem. Na opinião de Bidone (2001), a reciclagem é o método pelo qual os resíduos voltam ao sistema produtivo como matéria-prima.

Neste sentido, inicialmente levantou-se a possibilidade de combinar a casca de cerâmica ao traço de concreto, elaborando um meio de reciclagem que combine preservação do meio ambiente com aprimoramento técnico que empregue o resíduo de casca cerâmica, como agregado miúdo, no concreto. Entretanto, devido ao Covid-19, as circunstâncias globais e as limitações para realização de ensaios, houve uma mudança no escopo do trabalho. Sendo assim, levantou-se a alternativa de estudar a incorporação de determinados resíduos da construção e da indústria no concreto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Explorar a incorporação de resíduos da indústria e da construção civil no traço de concreto.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Realizar revisão bibliográfica para o melhor entendimento do tema abordado;
- Identificar alguns tipos de resíduos atualmente incorporados em traços de concreto convencional;
- Identificar as principais características de resíduos incorporados em traços de concreto;
- Apresentar a influência nas propriedades mecânicas do concreto pela incorporação dos resíduos estudados.

1.4 PROBLEMA DE PESQUISA

Machado (2013 apud BARBOSA et al. 2012) alega que a construção civil procura, de forma insistente e contínua, materiais alternativos provenientes de subprodutos que atenderão: a eficiência da execução, durabilidade e a melhoria das características do produto final, a redução de despesas, tendo em vista, especialmente, a utilização de resíduos recicláveis para diminuir o uso de materiais naturais.

Anteriormente, com o desenvolvimento desta pesquisa buscava-se resolver o problema do descarte adequado dos rejeitos estudado usando o mesmo como agregado graúdo em mistura de traço de concreto para a verificação da quantidade máxima de incorporação do rejeito industrial usado no traço de concreto sem que ocorra perdas elevadas nas propriedades de resistência mecânicas do concreto estudado. Porém devido ao covid-19, situação atual do país de quarentena, o laboratório para realização dos ensaios encontra-se fechado.

Portanto com a elaboração desta pesquisa, busca-se estudar resíduos das indústrias e da construção civil, que possam ser incorporados no concreto, além de apresentar quais as influências desta incorporação.

1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

No trabalho desenvolvido a primeira limitação foi algo que atingiu o mundo todo, a pandemia. O Coronavírus, surgido em Wuhan, na China, atingiu o mundo de surpresa no ano de 2020, um vírus de fácil contágio, em poucos meses já tinha se espalhado por todos os continentes, causando caos em muitos países. Com aproximadamente 1.300,000 mortes ao redor do mundo, sendo dessas, 163.368 no território brasileiro, até o dia 12 de novembro, o covid-19 vem sendo um transtorno para muitos, além de vidas, o sistema de saúde ficou sobrecarregado e entrou em colapso em diversos estados, muitos ficaram desempregados, gerando um aumento de 30% no desemprego do país, o índice de depressão, estresse e ansiedade também teve sua maior alta durante esse período de isolamento. A princípio seria realizado um trabalho de pesquisa exploratória necessitando de ensaios para validar o estudo, porém com o laboratório fechado foi necessário mudar o tema escolhido pois seu funcionamento foi suspenso. Buscando uma forma diferente de abordar do antigo tema planejado, Estudo da incorporação de resíduos de produção industrial em traço de concreto convencional, para continuar na linha de concreto sustentável deu-se a ideia deste novo tema, onde abrangemos mais alguns resíduos além da casca de cerâmica.

Ao decorrer do estudo, percebeu-se que alguns dos resíduos escolhidos ainda não foram muito estudados e analisados, além de que os que tem uma quantidade relativa de estudos ainda não tem uma referência de como serão suas performances ao longo do tempo, pois ainda são análises recentes e por isso estas técnicas ainda não são muito utilizadas, impedindo assim uma análise mais consistente e precisa em seus desempenhos ao longo do tempo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso é constituído por cinco capítulos, o primeiro capítulo, destina-se a introdução do tema, os objetivos gerais e específicos, assim como a justificativa e as limitações da pesquisa. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do concreto, de seus componentes e um breve comentário sobre a sustentabilidade do concreto no século XXI. Já terceiro capítulo

refere-se a metodologia do trabalho. No quarto capítulo aborda os resíduos da indústria e da construção civil escolhidos. O quinto e último capítulo traz as considerações importantes, além de apresentar algumas recomendações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será realizado neste capítulo um estudo extenso sobre o concreto, seus componentes e sustentabilidade do concreto, além disso, serão apontadas outras pesquisas persistentes para este estudo.

2.1 HISTÓRICO DO MATERIAL CONCRETO

2.1.1 No mundo

O concreto empregado atualmente em inúmeras construções com estruturas das mais variadas é resultado de diversos estudos realizados por muitos homens ao longo do tempo, que analisaram a natureza e em aperfeiçoar as teorias, materiais, técnicas e formas estruturais.

Foram encontradas, as primeiras evidências da utilização do concreto, a cerca de 2000 anos atrás em Roma, usado para construir estradas e aquedutos. Historiadores afirmam que em seus concretos os romanos empregavam uma matéria prima especial como cal quente, areia grossa, uma combinação contendo cascalho, e em algumas ocasiões, até mesmo sangue de animal. O primeiro registro da utilização do concreto, composto de cimento e agregado, ocorreu no ano de 1756, por John Smeaton, além disso, construiu na Inglaterra o Eddystone Lighthouse, em 1793, com o emprego do cimento hidráulico.

Joseph Aspdin, em 1824, desenvolveu o cimento Portland, ele produziu o concreto queimando terra com argila e giz em um forno que evaporou o dióxido de carbono, isto resultou em um forte cimento.

Já os ensaios de resistência à tração e compressão do concreto, tiveram seus primeiros registros realizados em 1836, com elementos importantes como agregados incorporado na mistura como brita, areia, argila, cascalho e xisto.

Em 1849, Joseph Monier, criou o primeiro concreto armado, para reforçar o concreto usou metal/aço, combinando a resistência a compressão do concreto, para resistir cargas altas, com o potencial do aço à tração.

O primeiro forno rotativo foi introduzido na Inglaterra, em 1886, tornando a produção de cimento constante. George Bartholomew, em 1981, fez em Ohio, USA, a

primeira rua de concreto. Em torno de 1920, o concreto foi amplamente usado na execução de construções e escadas. Foram construídas, em 1936, as barragens de concreto Hoover e Grand Cooley.

Desde os tempos em Roma o concreto se desenvolveu muito. Hoje em dia a engenharia usa o concreto em diversas áreas, muitas situações em ambientes extremamente desfavoráveis. Com o intuito de se adequar as novas e desafiadoras aplicações o homem elaborou grande variedade de concretos, empregando diversos tipos de cimentos, agregados, aditivos, adições e formas de utilização (armado, projetado, protendido, etc). É possível localizar o uso do concreto em fundações enterradas abaixo do solo a centenas de metros, túneis, minas a 452 metros acima da terra em arranha-céus e em plataformas petrolíferas no meio do oceano.

2.1.2 No Brasil

O concreto foi introduzido no Brasil no início do século XX como produto patenteado, distribuído por filiais de firmas estrangeiras. Em meados dos anos 1920, a partir da instalação das cimenteiras, iniciou-se o processo de difusão da tecnologia do concreto, originando um período crítico para a adaptação ao longo dos anos 1930. Em 1940, o uso do concreto já estava normalizado pela ABNT, já estava regulado pelas imputações profissionais do sistema CONFEA-CREAs, e era requerido nos currículos de escolas de engenharia e arquitetura.

Legalizado e normalizado, ao longo do século XX, o concreto excede o uso formal e se encontra em todas as fases da produção de edificações, concepção de projetos, organização do trabalho dos operários no canteiro, comércio de materiais de construção.

Ao longo dos anos, a indústria do concreto manteve um crescimento firme, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABPC) apresenta dados de que no período de 2005 e 2012, o consumo de cimento no Brasil avançou mais de 80%, o aumento ocorreu devido a produção das centrais de concreto, que teriam atingido índices de 180% no mesmo período, gerando em torno de 51 milhões de m³ de concreto em 2012. Atualmente, o concreto é o material mais utilizado para realização de construções no Brasil e no mundo.

2.1.3 Perspectivas para o futuro e sustentabilidade

A sustentabilidade é um tema que vem crescendo ultimamente e ganhou seu lugar na engenharia civil, esse desenvolvimento sustentável tem como objetivo prover as necessidades dos seres humanos buscando sempre não agredir o meio ambiente. Diante disto, houve a possibilidade de empregar diversos materiais, alterando sua destinação final, um exemplo disto é concreto sustentável.

No Brasil, o Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP (IAU-USP), juntamente com a Escola de Engenharia da USP (EESC), que desenvolveram os estudos com concreto sustentável, também chamado de concreto não estrutural, utilizando materiais reaproveitados, como sílica de casca de arroz e pneus velhos. Diferente do concreto tradicional, composto por cimento, areia, pedra e água, como os componentes principais, o sustentável tem o intuito de substituir esses elementos por produtos naturais ou recicláveis, como por exemplo a substituição da areia por areia de fundição. Areia esta que é composta por escoria e com isso também se reduz significativamente o consumo de água.

Essa nova alternativa de fazer concreto tem como vantagem a redução de descartes de rejeitos industriais no meio ambiente. Além disso, evita a retirada de areia do leito dos rios, acarretando o assoreamento e outros danos, causados pelo concreto convencional. Esses resíduos podem contaminar as águas subterrâneas e os solos, desequilibrando a natureza.

Outra vantagem é o seu custo de produção reduzido, que ocorre devido à facilidade de encontrar material, pois são matérias que não possuem outros fins, assim as empresas que geram esses resíduos também se beneficiam pois não tem que se preocuparem em descartar seus materiais em aterros.

Estudos mostram que o concreto sustentável, mesmo com as alterações nos materiais que compõem a sua estrutura, tem a mesma resistência e segurança que o convencional. Entretanto, ainda não é aconselhável que ele seja usado para fins estruturais, pois o concreto é um produto que deve ser observado por cerca de 20 anos, e o concreto não estrutural é mais recente, com isso, não se pode ter certeza

da sua eficácia. Então, esse tipo de concreto é utilizado em lugares que não geram muito impacto e não exigem muitos esforços, como calçadas e pavimentações.

Por enquanto o concreto sustentável ainda exibe uma pequena quantidade no mercado, porém as expectativas para o futuro são altas. As empresas vêm cada dia mais se interessando por projetos sustentáveis. Em um futuro não distante, quando tivermos mais estudos e testes, será possível utilizar o produto em diversos tipos de obras.

2.2 MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO CONVENCIONAL

Resumidamente, o concreto é a consequência da mistura entre água, cimento, agregado graúdo e miúdo, de modo que a água ao hidratar o cimento gera uma pasta que encobre e adere os agregados, podendo ser moldado em diferentes formatos, sendo este para a construção civil primordial interesse.

Segundo Benetti (2007, apud Petrucci 1968, p.5):

O concreto hidráulico é um material de construção que se compõe como uma mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes e água. Logo que misturado, deve proporcionar condições de plasticidade que permitam operações de manuseio que são fundamentais no lançamento nas fôrmas, adquirindo, com o tempo, pelas reações que então se processarem entre aglomerante e água, coesão e resistência.

2.2.1 Agregados

De acordo com Petrucci (1993):

Entende-se por agregado o material granular, sem forma e sem volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. Os agregados desempenham um importante papel nas argamassas e concretos, quer do ponto de vista econômico, quer do ponto de vista técnico, e exercem influência benéfica sobre algumas características importantes, como, retração, aumento na resistência ao desgaste etc., sem prejudicar a resistência aos esforços mecânicos, pois os agregados de boa qualidade têm resistência mecânica superior à da pasta de aglomerante. (PETRUCCI, 1993, p. 38).

Os agregados correspondem a oitenta por cento do peso do concreto, são materiais adicionados à massa de cimento e água para encorpar a mesma, deixando-a mais econômica, além de influenciar positivamente em relação à resistência e à retração. A granulometria dos grãos, se classificam-se em graúdo ou miúdo, seu tamanho, forma e densidade, determinam a característica desejada no traço do concreto. Os grãos também podem ser classificados como artificiais, areias e pedras derivadas do britamento de rochas, onde o homem pode definir o tamanho do grão, ou naturais, areias retiradas de rios ou barrancos.

A massa específica é outro fator que interfere na classificação dos agregados, onde pode-se dividir em leves (argila expandida, pedra-pomes, vermiculita), normais (pedras britadas, areias, seixos) e pesados (hematita, magnetita, barita).

As especialidades fundamentais dos agregados que serão usados em uma mistura são: forma, composição granulométrica, resistência à compressão, absorção de água, porosidade, e tipos de substâncias presentes.

Para o concreto são utilizados dois tipos de agregado, com finalidade característica na mistura, são eles: brita (agregado graúdo) e areia (agregado miúdo).

2.2.1.1 Agregado graúdo

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009, P. 3) fica estabelecido como agregado graúdo “aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm”. Também é necessário que sua repartição granulométrica seja aprovada nos limites apontados para o agregado graúdo, conforme mostra a Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 – Limites de composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25 ^b	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15 ^b	65 ^b - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 ^b - 65 ^b	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ^b	80 ^b - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ^b - 65 ^b	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

^a Zona granulométrica correspondente à menor (*d*) e à maior (*D*) dimensões do agregado graúdo.

^b Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009, p. 7)

De acordo com o resultado desejado do concreto é possível utilizar britas ou pedregulhos em sua composição. Entretanto é preciso que os materiais usados sejam limpos, tenham uma boa resistência e com granulação uniforme, para que possam ser dosados de forma a alcançar uma mistura de concreto econômica e com a maior resistência possível dentro dos requisitos.

2.2.1.2 Agregado miúdo

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009, p. 3) fica estabelecido como agregado miúdo “aquele cujos grãos passam pela peneira de abertura de malha de 4,75 mm”. Sendo necessário também que sua composição granulométrica se encaixe aos limites estabelecidos na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

NOTA 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

NOTA 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009, p. 5)

A NBR 7211 (ABNT, 2009, p. 4) esclarece também que podem “ser utilizados como agregado miúdo para concreto, materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade”.

2.2.2 Cimento Portland

Conhecido mundialmente como Cimento Portland, o cimento foi batizado pelo empresário Joseph Aspdin, foi descoberto em 1824, na ilha britânica de Portland. Refere-se a um pó fino com características ligante que sob a ação da água endurece, e depois de passar por este processo de endurecimento, ainda que submetido à água, não se dissolve novamente.

No Brasil existem aproximadamente três tipos de cimento especial e cinco básicos. Ainda que sejam apropriados para uso geral na construção civil, há diversidade entre eles. Segundo Forti Battagin, gerente do laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) conhecer bem as características e

propriedades, ligadas a cada tipo, ajuda a aproveitá-las da melhor forma possível na aplicação que se tem em vista.

O elemento principal do cimento é o clínquer – uma mistura de argila, calcário e componentes químicos – sendo diferenciado de acordo com a adição de outros componentes, são eles: escória, que na presença do sulfato aumenta a durabilidade, porém, em quantidades elevadas, pode reduzir a resistência; gesso, que intensifica o tempo de pega; argila pozolânica, que atribui ao concreto maior impermeabilização; e o calcário, que, em diversas vezes é utilizado em grande quantidade para diminuir o preço do cimento.

Essas diferenças na composição do material, pode impactar em suas propriedades e características de trabalhabilidade, durabilidade, resistência e impermeabilidade.

2.2.3 Água de amassamento

A água é fundamental na preparação do concreto, sua dosagem interfere nas reações químicas da mistura, alterando as características técnicas de resistência e durabilidade das estruturas.

José Freitas Junior, docente da Universidade Federal do Paraná (UFPR), diz que a presença da água é indispensável, pois o cimento consome aproximadamente 19% de seu peso em água para formar os cristais sólidos que promovem a resistência mecânica do concreto. O líquido também atua na trabalhabilidade do concreto, ou seja, colabora para que a mistura assuma aspecto plástico suficiente para ser transportada e aplicada nas fôrmas. Mas é preciso fazer o controle de água para não ter problemas com o concreto.

Os requisitos para a água ser considerada apropriada para o preparo do concreto é especificado pela NBR 15.900-1 que cita o processo de amostragem, assim como os processos para sua avaliação (ABNT, 2009, p. 1)

De acordo com a normas, a classificação dos tipos de água é realizada segundo sua origem, tornando capaz de identificar se a água é adequada ou não para a preparação do concreto. Os tipos são: água pluvial, água de abastecimento público, água de fontes subterrâneas, água natural de superfície, água recuperada de procedimento de preparo do concreto, e água residual industrial, água salobra, água

de esgoto e água proveniente de esgoto tratado e, por último, água de reaproveitamento resultante de estação de tratamento de água de esgoto.

Se porventura a água utilizada apresentar propriedades indevida, é conveniente a execução de ensaios, para constatar a influência das impurezas, sobre a estabilidade do volume, tempo de pega e resistência mecânica, sendo capaz de causar corrosão das armaduras e eflorescências na superfície do concreto. Sendo assim considerada aceita aquela que obedecer aos critérios expostos na NBR 15.900 -1, baseado na confirmação dos ensaios.

As patologias que as substâncias inapropriadas à água de amassamento podem provocar no concreto, são inúmeras, porém diversas vezes os danos causados por estas substâncias são menores, do que quando acrescentarmos excesso de água à mistura. A utilização indefinida desse elemento do concreto é capaz de ocasionar significativas reduções na sua impermeabilidade e resistência. Torna-se insignificante um projeto bem feito se o concreto não alcançar a resistência calculada. (PETRUCCI, 1968).

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO

2.3.1 Trabalhabilidade do concreto

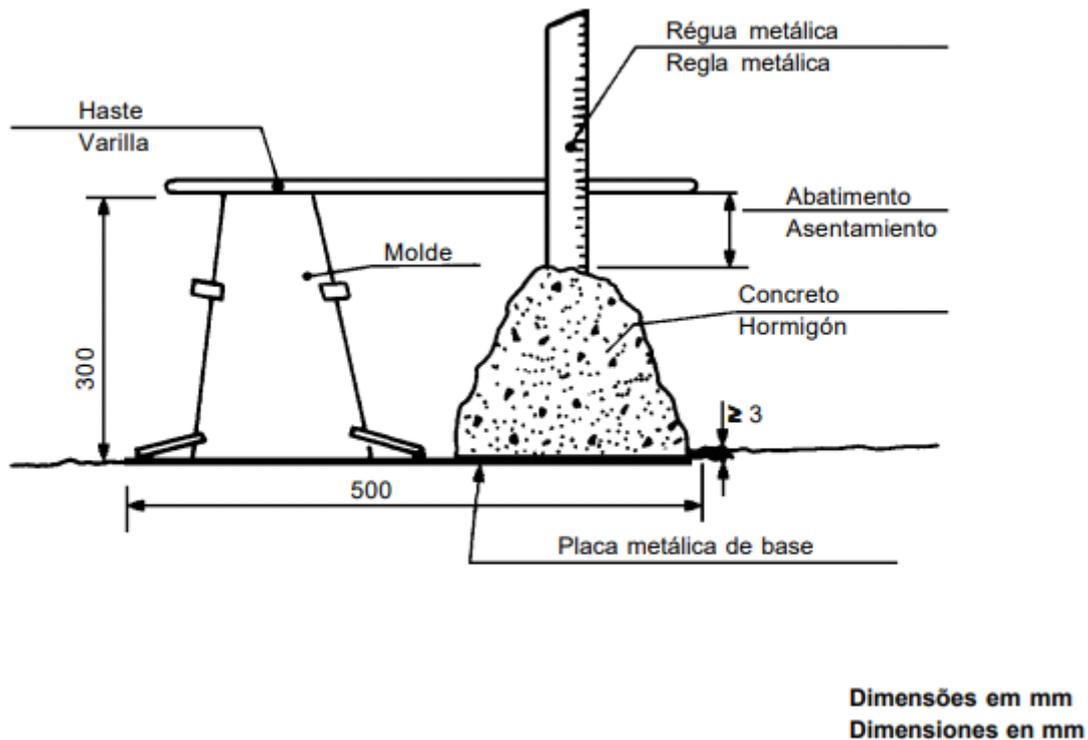
O concreto é considerado trabalhável quando é capaz de ser adensado com facilidade, e seja lançamento com facilidade, com ausência de segregação, sendo estas as características fundamentais do concreto (NEVILLE, 1997).

De acordo com Petrucci (1993), a trabalhabilidade é mensurada pela energia necessária a provocar uma deformação pré-estabelecida, em uma mistura de concreto fresco.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (2008), “uma mistura de concreto que não possa ser lançada facilmente ou adensada em sua totalidade provavelmente não fornecerá as características de resistência e trabalhabilidade esperadas.”

Dentre os procedimentos divulgados e mais básicos está a definição da consistência pelo ensaio conhecido como “Slump Test”, que nada mais é do que o abatimento do concreto fresco, no tronco de cone. A NBR NM 67 (ABNT, 1998) regulamenta este ensaio, como é possível identificar na Figura 1.

Figura 1 – Determinação do Abatimento do Tronco de Cone



Fonte: NBR NM 67 (ABNT, 1998, p. 8).

Para realização do ensaio é necessário a colocação de 3 camadas iguais de concreto, cada uma delas deve ser adensada com 25 golpes, com haste de 16 mm de diâmetro, ao final é realizada a retirada do molde. Após assentada a massa, é possível identificar os índices de trabalhabilidade, de acordo com a diferença de altura entre o cone e a mistura.

Considerando que a importância do concreto fresco é passageira, porém fundamental, a resistência do concreto em algumas dosagens é grandemente influenciada pelo seu nível de adensamento, visto que o índice de vazios de 5% diminui a resistência na escala de 30%, já um índice de vazios de 2% é capaz de gerar perdas de até 10%. Para que o concreto possa ser transportado, lançado, adensado e finalizado facilmente, sem segregação, é imprescindível que seja adequada a sua consistência (NEVILLE, 1997).

Adam M. Neville assegura também que:

Os vazios no concreto são, na verdade, bolhas de ar aprisionado ou espaços deixados depois de retirado o excesso de água. O volume dessa água

depende da relação água/cimento da mistura; com menor frequência, pode haver espaços devido à água aprisionada sob partículas maiores de agregado ou sob a armadura. As bolhas de ar que representam o ar "acidental", isto é, vazios no interior de um material inicialmente solto, são determinados pela granulometria das partículas mais finas da mistura e são mais facilmente expelidas de uma mistura mais molhada do que de uma mais seca. Portanto, se pode concluir que para cada método de adensamento existe um teor ótimo de água, com o qual será mínimo o volume total das bolhas de ar e de espaço com água. Com este teor ótimo de água, pode-se obter a máxima massa específica relativa do concreto. No entanto, o teor ótimo de água pode variar conforme o método de adensamento (BENETTI, 2007 apud NEVILLE, 1997).

Conforme Bauer (1998) a trabalhabilidade não é apenas uma propriedade específica do concreto, assim como a consistência; compreende além disso os conhecimentos associados à classe da obra e ao processo empregados de execução. É possível que o concreto seja trabalhável numa situação e em outra não. Ainda assim, em alguns casos, o concreto pode não ser trabalhável de forma alguma.

Desse modo, a intensidade adotada para o adensamento e a natureza da obra apontarão o grau mais apropriado de consistência.

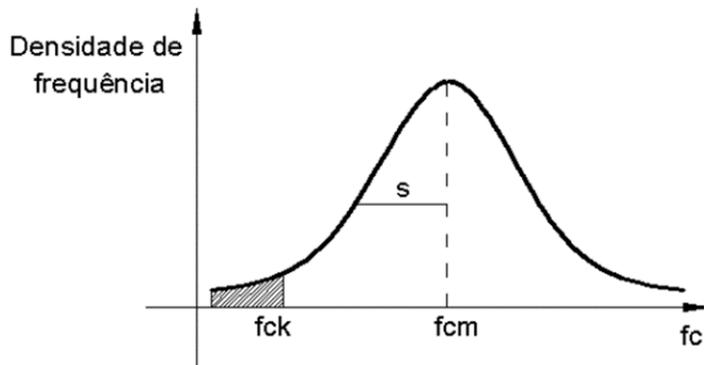
2.3.2 Resistência à compressão

A propriedade mecânica mais relevante, é a resistência à compressão simples, denominada f_c . Para determiná-la em um lote de concreto, são moldados corpos de prova para realização de ensaio conforme a NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, que são ensaiados de acordo com a NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. O padrão adotado no Brasil de corpos de prova é cilíndrico, com 30 cm de altura e 15 cm de diâmetros, e a idade para realização do ensaio é de 28 dias.

Segundo Pinheiro, Muzardo e Santos (2004):

Após ensaio de um número muito grande de corpos de prova, pode ser feito um gráfico com os valores obtidos de f_c versus a quantidade de corpos de prova relativos a determinado valor de f_c , também denominada densidade de frequência. A curva encontrada denomina-se Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão. (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004, p. 2).

Gráfico 1 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004, p. 2).

Dois valores primordiais são encontrados através da curva de Gauss, apresentado no Gráfico 1, a resistência característica do concreto a compressão, f_{ck} , e a resistência média do concreto a compressão, f_{cm} .

A f_{cm} é a média aritmética dos valores obtidos de f_c para os corpos de prova ensaios, e é usado para determinação do f_{ck} , por meio da fórmula (1):

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s \quad (1)$$

O desvio-padrão (s) representa a distância entre a abscissa de f_{cm} e a do ponto em que a curva muda de concavidade (inflexão da curva).

O valor 1,65 refere-se a quantia de 5%, quer dizer que, somente 5% dos corpos-de-prova têm $f_c < f_{ck}$, ou, ainda, 95% dos corpos-de-prova têm $f_c \geq f_{ck}$.

Diante disso, pode-se determinar que o f_{ck} consiste no valor da resistência que tem 5% de probabilidade de não ser atingido, em um lote de corpos-de-prova estipulados para ensaios.

2.3.3 Resistência à tração

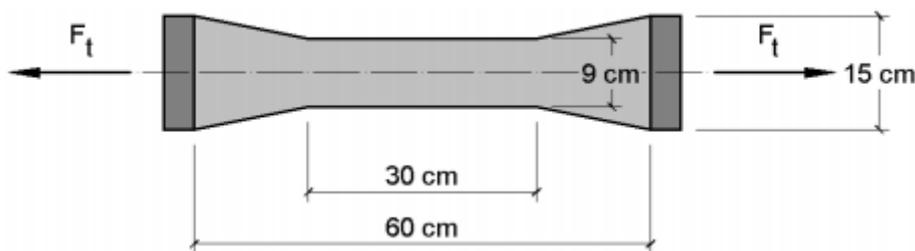
Resistência do concreto à tração direta, f_{ct} , é a analogia do conceito expostos no item anterior, para a resistência à compressão. Portanto, tem-se a resistência média do concreto à tração, f_{ctm} , valor obtido da média aritmética dos resultados, e a resistência característica do concreto à tração, f_{ctk} ou somente f_{tk} , valor da resistência que tem 5% de probabilidade de não ser atingido, em um lote de corpos-de-prova estipulados para ensaios.

O estudo da tração difere-se nos métodos de ensaio. Possui três ensaios regularizados: tração direta, compressão diametral, conhecido como tração indireta e tração na flexão.

2.3.3.1 Ensaio de tração direta

Neste caso, para a determinação da resistência de tração direta, denominada f_{ct} , são ensaiados os corpos de prova, aplicando tração axial, até o rompimento do mesmo. O corpo de prova (Figura 2) tem em suas dimensões extremidades quadradas, com 15 cm de cada lado, já a seção central é retangular médio 9 cm por 15 cm.

Figura 2 – Ensaio de tração direta

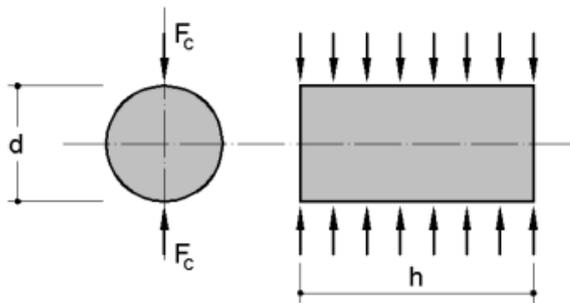


Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004, p. 3).

2.3.3.2 Ensaio de tração indireta

A tração indireta, regulamentado pela NBR 7222 (ABNT, 2011) – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, é o ensaio mais utilizado e popularmente conhecido como ensaio brasil, internacionalmente. Para realizar este ensaio é utilizado um corpo de prova cilíndrico de 15 cm por 30 cm, no qual o mesmo é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa (Figura 3), sendo submetido uma força até que ocorra a ruptura por fendilhamento (compressão diametral).

Figura 3 – Ensaio de tração indireta



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004, p. 4).

A resistência à tração por compressão axial, de acordo com a determinação da NBR 7222 (ABNT, 2011) é calculada pela fórmula (2):

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times \ell} \quad (2)$$

No qual:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = força máxima obtida no ensaio (N);

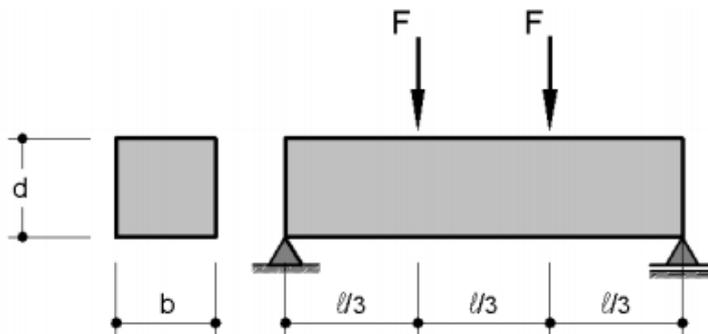
D = diâmetro do corpo de prova (mm).

ℓ = comprimento do corpo de prova (mm).

2.3.3.3 Ensaio de tração na flexão

A definição da tração na flexão ($f_{ct,f}$) é alcançada pelo ensaio exposto na NBR 12142 (ABNT, 2010), no qual o corpo-de-prova de seção prismática é submetido à flexão, até à ruptura, com carregamentos em duas seções simétricas, conforme consta na Figura 4. Pelo fato das seções carregadas se encontrarem nos terços do vão, o ensaio também é conhecido por “carregamento nos terços”.

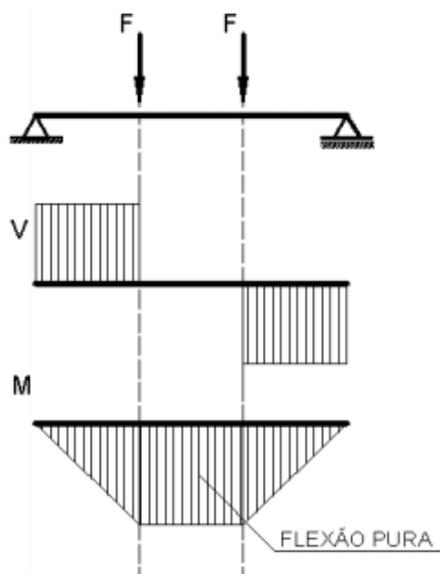
Figura 4 – Ensaio de tração na flexão



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004, p. 4).

É possível reparar, analisando o Gráfico 2, de esforços solicitantes, que a cortante é nula na região em que o momento máximo. Deste modo, nesse intervalo central acontece a flexão pura.

Gráfico 2 – Diagramas de esforços solicitantes



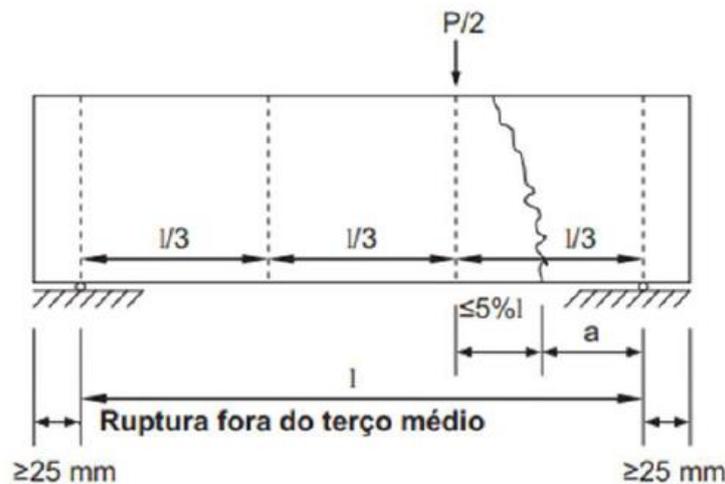
Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004, p. 5).

Conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010) descreve o cálculo da resistência à tração na flexão, deve ser realizado de acordo com a fórmula (3):

$$f_{ct,f} = \frac{F \times \ell}{b \times d^2} \quad (3)$$

Como mostra a Figura 5, se a ruptura ocorre fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% de ℓ , é necessário calcular a resistência à tração na flexão com base na fórmula (4).

Gráfico 3 – Ruptura fora do terço médio



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010, p. 5).

$$f_{ct,f} = \frac{3 \times F \times a}{b \times d^2}$$

(4)

No qual:

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão (MPa);

F = força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

ℓ = dimensão do vão entre apoios (mm);

b = largura média do corpo de prova (mm);

d = altura média do corpo de prova (mm);

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).

2.3.3.4 Associação dos resultados dos ensaios

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a resistência à tração direta ($f_{ct,f}$) igual a $0,9 \times f_{ct,sp}$ ou $0,7 \times f_{ct,f}$, ou seja, coeficientes de conversão $0,9$ e $0,7$, para os resultados de compressão diametral e de flexão, respectivamente.

As resistências à tração diretas $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$, na ausência de ensaios, pode ser obtida a partir da resistência a compressão f_{ck} , por meio das fórmulas (5), (6) e (7):

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (5)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (6)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (7)$$

Onde:

$f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressos em MPa.

2.3.4 Módulo de elasticidade

Módulo de elasticidade pode ser definido como uma grandeza que associa a tensão e deformidade instantânea de um material dentro de um limite equivalente adotado.

De acordo com Freitas (2012 apud, MEHTA e MONTEIRO 2008) em materiais homogêneos, há uma associação uma relação explícita entre o módulo de elasticidade do elemento e sua densidade. Já em materiais como o concreto, que são materiais heterogênicos, o módulo, a densidade e a fração, além das propriedades da área de transição na interface, apontam o determinam o desempenho elástico do composto. Visto que a densidade é inversamente proporcional à porosidade, certamente são imprescindíveis a porosidade da mistura do cimento, dos agregados e da zona de transição na interface.

A NBR 6118 (ABNT, 2014), cita que está estabelecido na NBR 8522 (ABNT, 2008) o procedimento de execução do ensaio referente ao módulo de elasticidade, porém não será abordado esse ponto por não ser o objetivo da pesquisa.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 INTRODUÇÃO

Nesta parte, será apresentada a metodologia empregada nesta tarefa, com intuito de explicar o tipo de pesquisa realizada e as fontes de coleta de dados.

3.2 MÉTODO ADOTADO

Referente as suas finalidades, este trabalho se enquadra nos métodos de pesquisas exploratória, descritiva e bibliográfica.

Estudos exploratórios visam proporcionar maior conhecimento de um determinado tema, que se tem pouco entendimento, a fim de torná-lo mais claro e levantar pontos importantes quanto ao rumo da pesquisa.

Segundo Zikmund (2000), os estudos exploratórios, usualmente, são úteis para diagnosticar situações, explorar alternativas e descobrir novas ideias. De acordo com Gil (2002, p. 41) a pesquisa exploratória tem “[...] como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito [...]”. E, segundo Beuren (2003, p. 80), a caracterização da pesquisa exploratória: “[...] ocorre quando há pouco conhecimento sobre a temática a ser abordada. Por meio do estudo exploratório, busca-se conhecer com maior profundidade o assunto, de modo a torná-lo mais claro ou construir questões importantes para a condução da pesquisa”.

No caso da pesquisa descritiva, Beuren (2003, p. 81), afirma que “considera-se como principal objetivo descrever características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre as variáveis. Uma de suas características mais significativas está na utilização de técnicas padronizadas de coletas de dados”. Beuren (2003, p. 81) ainda destaca que, a pesquisa descritiva “preocupa-se em observar os fatos, registrá-los, analisá-los, classificá-los e interpretá-los, e o pesquisador não interfere neles. Assim, os fenômenos do mundo físico e humano são estudados, mas não são manipulados pelo pesquisador”.

Para Vergara (2000, p. 47) a pesquisa descritiva “expõe características de determinada população ou de determinado fenômeno. Podem também estabelecer

correlações entre variáveis e definir sua natureza”. E, segundo Cervo e Bervian (2002, p. 66), a pesquisa descritiva é assinalada para:

[...] observar, registrar e analisar e correlacionar fatos ou fenômenos (variáveis) sem manipulá-los. Busca conhecer as diversas situações e relações que ocorrem na vida social, política, econômica e demais aspectos do comportamento humano, tanto do indivíduo tomado isoladamente como de grupos e comunidades mais complexas. Em síntese, a pesquisa descritiva, em suas diversas formas, trabalha sobre dados ou fatos colhidos da própria realidade.

Gil (2002, p. 42) ainda acrescenta que:

As pesquisas descritivas têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis. São inúmeros os estudos que podem ser classificados sob este título e uma de suas características mais significativas está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como o questionário e a observação sistemática.

Já a pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de um material já publicado, como livros, artigos, periódicos, internet, etc. Segundo Gil (2007, p. 44), os exemplos mais característicos desse tipo de pesquisa são investigações sobre ideologias ou aquelas que se propõem à análise das diversas posições acerca de um problema.

Conforme esclarece Boccato (2006, p. 266):

A pesquisa bibliográfica busca a resolução de um problema (hipótese) por meio de referenciais teóricos publicados, analisando e discutindo as várias contribuições científicas. Esse tipo de pesquisa trará subsídios para o conhecimento sobre o que foi pesquisado, como e sob que enfoque e/ou perspectivas foi tratado o assunto apresentado na literatura científica. Para tanto, é de suma importância que o pesquisador realize um planejamento sistemático do processo de pesquisa, compreendendo desde a definição temática, passando pela construção lógica do trabalho até a decisão da sua forma de comunicação e divulgação.

A revisão bibliográfica pode ter vários objetivos, como: oportunizar um aprendizado sobre uma determinada área do conhecimento, facilitar a identificação dos métodos e técnicas a serem utilizados pelo pesquisador e contribuir para a redação da introdução, revisão da literatura e redação da discussão do trabalho científico.

4 CONCRETO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS

4.1 INTRODUÇÃO

Segundo Sjöström (1992) a indústria da construção civil consome entre 14% e 50% de recursos naturais do mundo. Só no Brasil estimasse um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concreto e argamassas de acordo com John (2000).

A ideia de desenvolver um método reciclável na utilização dos agregados ocorreu em 1928, quando pesquisas foram feitas para avaliar o resultado do consumo de cimento, água e granulometria dos agregados de concreto. Porém, de acordo com (LEVY e HELENE, 2002), somente em 1945, foi registrada a primeira aplicação de agregados recicláveis para a reconstrução de cidades Europeias atingidas pela 2ª Guerra Mundial.

Em 1986, deu-se início o primeiro estudo para a utilização de resíduos de construção para produção de argamassa pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto.

A reutilização de agregados reciclados ainda é uma técnica carente de informações que sirvam de base de qualidade, por isso, estudos trazem maneiras para utilizá-los que não afetem muito as características do concreto, como substituir parte do agregado natural.

Segundo, Tenório (2007), os agregados reciclados têm características variáveis, em decorrência disso os concretos produzidos tendem a apresentar variabilidade das propriedades que dependem do agregado. O autor afirma que o conhecimento dessas características é tão importante quanto o conhecimento das propriedades do concreto, uma vez que, é a partir do entendimento das relações existentes entre esses dois conjuntos de dados que se pode proporcionar o emprego adequado e confiável dos agregados reciclados.

Para utilização de material reciclado como agregado para concreto devem ser realizadas misturas experimentais do mesmo modo que estas misturas são feitas para concretos convencionais. Deve ser estabelecida a quantidade de água suficiente para garantir a trabalhabilidade da mistura, desde que não haja excesso de água, fato que comprometeria o uso racional de cimento para alcançar a resistência desejada a um custo compatível (LEITE, 2001).

A proporção de materiais que compõem o concreto, o traço de concreto, é uma característica importante. Mehta e Monteiro (1994), afirmam que a segurança de uma estrutura é considerada levando em conta a resistência do concreto, especificada pelo projetista. A relação água/cimento e o teor de ar incorporado são os fatores determinantes na resistência do concreto. Dependendo do teor de umidade dos agregados, será necessário providenciar correções na quantidade de água adicionada, no teor de areia e na quantidade de agregado graúdo, garantindo assim o conhecimento da relação água/cimento. A resistência também é tomada como um índice geral de durabilidade do concreto.

4.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Muitos resíduos sólidos, líquidos e gasosos são gerados no processo produtivo industrial, devido à grande diversidade de atividades. Esses resíduos, podem contaminar solo, água e ar. Um ponto dificultador do gerenciamento de tais resíduos, são as diferentes composições químicas, físicas e biológicas, além da variação dos volumes gerados e o potencial de toxicidade de cada resíduo. Por esse motivo, indica-se que os resíduos sejam classificados, caracterizados, quantificados e tratados adequadamente.

No Brasil, hoje algumas indústrias realizam programas internos de reciclagem dos seus próprios resíduos sólidos, pois esses programas incentivam a segregação do material, ainda em sua fonte, decrescendo o volume e reduzindo gastos operacionais, de movimentação e transporte e em alguns casos, podendo gerar receita para a empresa. A incineração dos resíduos sólidos, é umas das alternativas mais discutidas, para redução do volume gerado. Porém, a má operação deste processo pode se tornar uma nova e importante fonte de poluição e contaminação atmosférica. Da mesma forma, o depósito desses resíduos em aterros industriais, é uma alternativa, devido ao grande volume que estes locais podem armazenar. Entretanto, é necessário um cuidado muito grande, desde a construção até a operação, para que os mesmos não entrem em contato com o solo ou com os aquíferos locais.

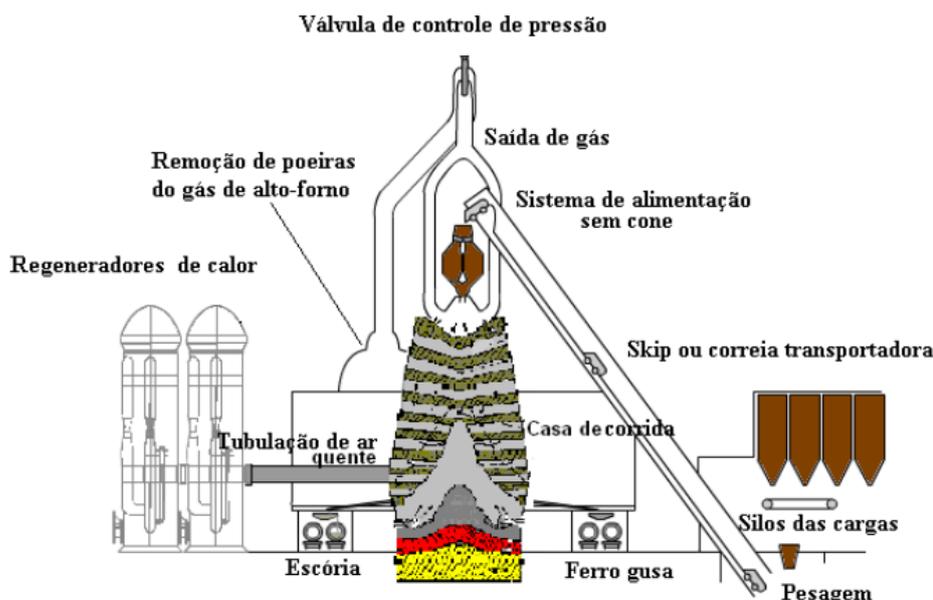
Vale destacar que, após o encerramento da capacidade do aterro, a empresa responsável deverá monitorar as águas subterrâneas por 20 anos e realizar a manutenção do mesmo e isto é estabelecido pelas normas brasileiras de aterros de resíduos perigosos (NBR 10157) e não perigosos (NBR 13896).

4.2.1 Concreto com adição de escória

A escória de alto forno é um subproduto inevitável, gerado na produção de ferro fundido em alto forno constituído basicamente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio na forma vítrea, que após um processo de tratamento adquire características aglomerantes.

As escórias exercem uma grande variedade de funções químicas e físicas, de receptoras de parte de metais e óxidos não reduzidos numa extração primária, até reservatório e absorvedor de impurezas retiradas no processo de refino pirometalúrgico (GALDEANO, 1994). Elas também têm a função de proteger o metal do processo de oxidação e diminuir as perdas de calor.

Figura 5 – Produção de ferro fundido



Fonte: Passos, Elisa Kimus Dias (2009, p. 6).

Esse material é considerado por alguns autores (Malhotra, 1996; Lea, 1971), como um material pozolânico, pois independente, não proporciona propriedades cimentícias para ativação química, necessitando ser adicionada com materiais cimentícios. Porém outros autores advertem que se deve classificar a escória como um cimento hidráulico latente, já que seus elementos se assemelham aos óxidos do cimento Portland (cal, sílica e alumina) em diferentes proporções (Lea, 1971).

Dados do Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), mostram que em 1998 o Brasil produziu aproximadamente 6 milhões de toneladas de escória de alto forno e 4 milhões de toneladas de escória de aciaria na produção de 26 milhões de toneladas de aço bruto (IBRACON, 2010). Antigamente este material era considerado um resíduo siderúrgico, porém por suas propriedades, se viu uma grande oportunidade de adicioná-la ao concreto.

A EAF gerada na indústria do aço pode passar por quatro diferentes tipos de resfriamento, o que interfere diretamente suas características, gerando então quatro tipos diferente de escória.

O processo pode ser por:

- Resfriamento brusco em água – acontecem em tanques de granulação e na maioria das vezes necessita-se entre 5m^3 a 10m^3 de água por tonelada de escória.
- Resfriamento lento ao ar – a escória é derramada em fossos ao ar livre que dá origem a um produto maciço e cristalizado, que após britado e processado pode se tornar agregado graúdo para o concreto.
- Resfriamento em água ou vapor d'água sob pressão – a escória é resfriada por jatos de água sob pressão e incorpora o ar, expandindo-se, com massa específica variando entre $0,6\text{g/cm}^3$ a $0,9\text{g/cm}^3$, tornando-a um agregado leve.
- Resfriamento rápido por água e por ar.- este processo dá origem a lã de vidro, com propriedades isolantes, térmicas e acústicas.

Adicionar escória pode trazer melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A combinação é mais coesiva e a fluidez é aumentada, devido a melhor distribuição das partículas de escória e a superfície lisa das partículas, que absorvem pouca água. A adição de escória proporciona uma dissipação de calor mais lenta, devido à velocidade das reações de

hidratação. A microestrutura da pasta de cimento hidratada é mais densa, devido a maior formação de Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H), melhorando a resistência mecânica e a durabilidade a longo prazo (NEVILLE, 1997)

Para verificar a qualidade e eficiência do concreto com adição de escória, serão apresentados a seguir dois estudos realizados por diferentes autores nos últimos anos, abordando diferentes dosagens, métodos e finalidades.

4.2.1.1 Características do resíduo

No estudo realizado GONÇALVES et al (2009) no artigo Avaliação de propriedades mecânicas de concretos contendo escória de cobre como agregado miúdo, foi avaliado a influência do uso de diferentes teores de escória de cobre granulada como agregado miúdo nas propriedades mecânicas do concreto.

Para realizar este estudo, os autores utilizaram cimento CP I S-32, areia tipo quartzosa, comercial de Porto Alegre/RS e escória de cobre granulada sem beneficiamento, cujas características estão apresentadas na Tabela 3. Nos estudos desenvolvidos, Moura (2000), avaliou o risco ambiental, no qual constou que a escória de cobre pode ser classificada como Classe II - não inerte, mas não perigosa, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2005), não apresentando, portanto, riscos à saúde humana, nem ao meio ambiente.

Tabela 3 – Características da areia natural e da escória de cobre

Característica	Resultado	
	Areia Natural	Escória de cobre
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	4,8
Módulo de finura	1,78	3,4
Massa específica (g/cm ³)	2,619	3,87
Massa unitária (g/cm ³)	1,5	2,25
Material pulverulento (%)	-	0,51

Fonte: GONÇALVES et al (2009)

Observando a Tabela 3, percebeu-se que a escória tem uma graduação mais grossa que a areia natural, sua massa específica é muito elevada ($3,870\text{kg/dm}^3$), enquanto a da areia é ($2,619\text{kg/dm}^3$). Além disso, a escória apresenta forma esférica e textura bastante lisa.

Já o segundo artigo analisado, influência da pozolanicidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis, COUTO et al (2010) tem como objetivo estudar a influência da pozolanicidade da escória de alto-forno em argamassas e concretos com substituição de parte do cimento por escória.

Os autores levantam que, composição química é de extrema importância, vai derivar das matérias primas e do tipo de gusa fabricado, determinando assim características físico-químicas das escórias de alto forno.

Apontam também, que a composição química da escória é verificada pelos elementos que estão presentes na sua formação: a ganga (material inerte do minério), os fundentes (substâncias ou materiais que auxiliam a fusão dos metais) e as cinzas do combustível utilizado (carvão vegetal ou coque). Os principais componentes da escória de alto-forno são: sílica - SiO_2 , alumina - Al_2O_3 (ambos provenientes da ganga) e cal - CaO (proveniente do calcário utilizado como fundente) (Starling, et al, 1990).

A fluidez é uma das propriedades mais importantes da escória, a qual depende da relação entre os teores de cal e sílica, denominada índice de basicidade simplificado. A proporção de cal tem importância especial para a remoção do enxofre, originária do carvão mineral. Em altoforos a carvão vegetal, esta circunstância tem importância secundária, já que este tipo de combustível não contém quase nenhum enxofre. As escórias obtidas em fornos a carvão vegetal apresentam então a sílica como componente predominante e são classificadas como ácidas, enquanto as escórias obtidas em fornos a carvão mineral são básicas.

Para caracterizar os componentes usados, os autores apresentaram a Tabela 4, onde consta a composição química do cimento Portland, CPIIE-32 e da escória básica granulada abordada. Pode-se observar que o cimento Portland e a escória de alto-forno apresentam os mesmos compostos químicos em diferentes porcentagens.

Tabela 4 – Análise química dos aglomerantes

Componentes	Teores Cimento (%)	Teores - Escória Alto-forno (%)	Limites para escória (%) NF P18-302-BS-1047
CaO – (Cal)	42	41,70	38 a 48
SiO ₂ – (Silica)	13	33,47	29 a 38
Al ₂ O ₃ (Alumina)	3,5	14,12	13 a 24
MgO	3,3	5,90	6
FeO	2,1	1,07	4
MnO	–	0,59	2
S (Enxofre total)	0,2	0,82	2
Índice de Basicidade – V*	3,1 – 2,7	1,25	Básica ou ácida
Classificação Siderúrgica	–	Básica	–

Fonte: COUTO et al (2010)

$$* \text{Índice de Basicidade } V = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

A reatividade potencial foi avaliada pelos autores, por método químico, de acordo com a NBR 9773. A partir da curva padrão verificou-se que a escória em estudo não é potencialmente reativa (Couto et al, 1992; Neville, 1997).

Tabela 5 – Reatividade potencial da escória

Características	Normas	Escória Alto-forno	Limites normalizados
Reatividade potencial-Ensaio químico	NBR 9773	Inócuo	Curva padrão

Fonte: COUTO et al (2010)

As massas unitárias do cimento Portland e da escória de altoforno são similares e no que se refere ao índice de finura, a superfície específica de 180 m²/kg da escória foi obtida através de um método de moagem simplificado, a fim de facilitar a sua utilização (Tabela 6).

Tabela 6 – Caracterização tecnológica dos aglomerantes

Ensaio/ Materiais	Cimento CII E 32	Escória Alto-forno
Massa Unitária (Kg/dm ³)	1,1	1,17
Massa Específica (Kg/dm ³)	3,0	2,60
Finura - Método de Blaine (m ² /kg)	305,0	180,0
Finura - Peneira 75µm nº 200 (%)	2,5	29,2

Fonte: COUTO et al (2010)

4.2.1.2 Aplicações

Dependendo das características das Escórias de Alto-Forno, resultantes do tipo de resfriamento e composição química, registram-se várias aplicações para as Escórias de Alto-Forno ao longo de vários países no mundo (Arthur D. Little 1999):

Alguns exemplos de aplicações: bases de estrada, asfalto, aterro/terraplanagem, agregado para concreto, cimento (grande utilização da escória de alto-forno granulada devido a sua hidraulicidade), aplicações especiais (lã mineral, lastro ferroviário, material para cobertura, isolamento, vidro, filtros, condicionamento de solo e produtos de concreto).

O trabalho de GONÇALVES et al (2009) foi realizado com o intuito de aplicar a escória de cobre como agregado miúdo no concreto, avaliando a influência da substituição do agregado natural por diferentes teores de escória de cobre granulada, variando de 0% a 50% de substituição. As propriedades mecânicas avaliadas foram: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão.

No artigo, Influência da pozolanicidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis, os autores realizaram os estudos com o propósito de avaliar o grau de pozolanciaicidade da escória como material substitutivo, permitindo analisar critérios de durabilidade fundamentais no processo produtivo, visando garantir a sustentabilidade.

4.2.1.3 Dosagem

Para avaliar o comportamento mecânico dos concretos contendo escória de cobre como agregado miúdo os autores Washington Moura, Jardel Gonçalvez e Mônica Leite realizaram misturas sem escória de cobre (referência) e misturas contendo 30%, 40% e 50% de escória de cobre granulada em substituição (em volume) à areia natural. Para produção dos concretos, foi utilizado o método de dosagem do IPT/EPUSP (Helene & Terzian, 1992), de forma que todas as misturas apresentassem a mesma trabalhabilidade. Avaliaram a trabalhabilidade das misturas através do abatimento pelo tronco de cone (NBR 7223, 1992) e fixada em 70 ± 10 mm. A Tabela 7, retirada do artigo, apresenta as proporções, em massa, dos materiais utilizados para a produção dos concretos.

Tabela 7 – Proporção dos materiais e consumo de cimento dos concretos produzidos

Mistura	Relação a/c	Cimento	Areia	Escória	Brita	Consumo de cimento* (kg/m³)
Referência	0,41	1	1,363	-	2,459	477
	0,50		2,039	-	3,163	372
	0,64		2,716	-	3,867	301
70% areia + 30% escória	0,41	1	0,954	0,604	2,459	477
	0,50		1,427	0,904	3,163	372
	0,61		1,901	1,203	3,867	303
60% areia + 40% escória	0,38	1	0,817	0,806	2,459	484
	0,48		1,223	1,205	3,163	375
	0,57		1,630	1,605	3,867	307
50% areia + 50% escória	0,38	1	0,681	0,998	2,459	485
	0,48		1,020	1,494	3,163	376
	0,53		1,358	1,991	3,867	311

*Foi adotado o teor de 2% de ar no concreto para o cálculo do consumo de cimento.

Fonte: GONÇALVES et al (2009)

De acordo com a Tabela 7, os autores verificaram que os concretos contendo escória de cobre apresentavam trabalhabilidade superior ao limite estabelecido (70 ± 10 mm). Esse fato ocorreu, provavelmente, devido à granulometria da mistura (areia+escória de cobre), que é mais grossa, à superfície lisa dos grãos de escória, além da sua massa específica, que é bem mais elevada do que a dos demais

componentes da mistura. Porém, como os autores pretendiam manter o a mesma trabalhabilidade, os concretos contendo escória de cobre tiveram uma redução da relação água/cimento. Observou-se que os concretos com 50% de escória de cobre em substituição à areia apresentaram exsudação.

Moura, Gonçalves e Leite produziram o concreto em um misturador de eixo vertical e o tempo de mistura foi de cinco minutos após a colocação da água. Foram moldados doze corpos-de-prova de 10x20cm, para os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, e seis corpos-de-prova de 10x10x40cm, para os ensaios de resistência à tração na flexão. Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas e curados em câmara úmida (100% de umidade relativa) a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até a idade do ensaio. As propriedades foram avaliadas aos 7 e 28 dias de idade, sendo 03 corpos-de-prova para cada idade. A resistência à compressão axial foi avaliada numa prensa hidráulica de acordo com NBR 5739 (1994), enquanto a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão foram avaliadas de acordo com a NBR 7722 (1982) e a NBR 12142 (1991), respectivamente.

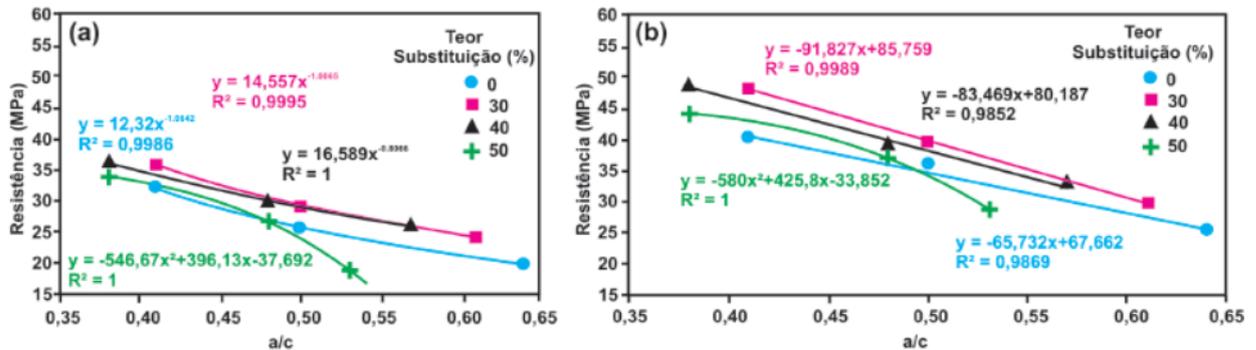
No segundo trabalho analisado, influência da pozolanidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis, foram avaliados argamassas e concretos com 100% de cimento como aglomerante e com substituição de 35% do cimento por escória. O efeito pozolânico da escória em estudo pode ser comprovado a partir das resistências de corpos de prova de argamassas, confeccionadas com fator água-cimento de 0,50, consistências de 210 a 220 mm e com substituição de cimento por escória básica granulada de 35%

4.2.1.4 Desempenho

Os autores do artigo “Avaliação de propriedades mecânicas de concretos contendo escória de cobre como agregado miúdo”, apresentaram gráficos para representar o resultado de seus ensaios.

Primeiramente foram analisados os ensaios de resistência à compressão axial dos concretos aos 7 e 28 dias, em que se pode conferir no Gráfico 4 elaborados pelos autores.

Gráfico 4 – Resultados de resistência à compressão dos concretos: (a) aos 7 dias e (b) aos 28 dias.



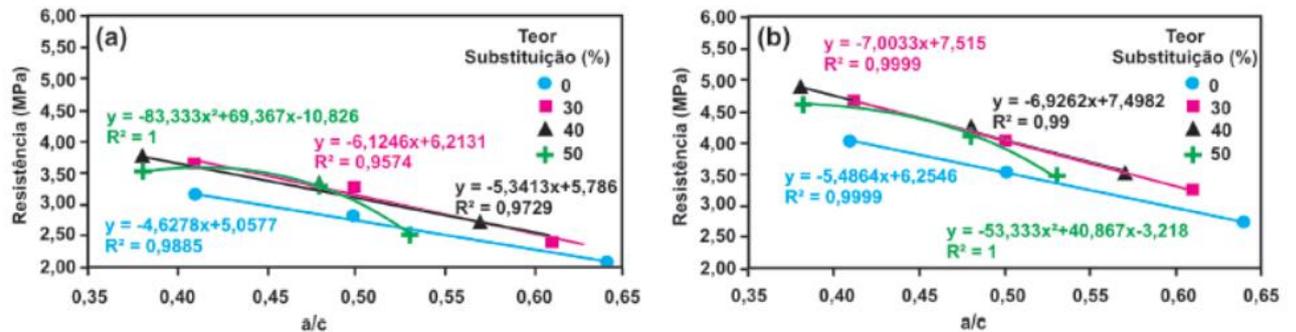
Fonte: GONÇALVES et al (2009)

Foi verificado que houve um aumento na resistência à compressão do concreto com a substituição da areia por escória de cobre. Esse incremento foi maior com o aumento do teor de substituição. Esse aumento ocorreu devido à redução da quantidade de água da mistura e, conseqüentemente, à relação água/cimento e a uma melhor distribuição dos grãos da escória no concreto, promovendo uma maior densificação da matriz.

(Washington Moura, Jardel Gonçalves e Mônica Leite 2006) Concretos contendo uma porcentagem acima de 40% de escória em substituição de areia apresentaram uma redução na resistência à compressão. Isso acontece pois, altos teores de substituição podem ter formado uma quantidade maior de zona de interface pasta-agregado, pois a escória de cobre apresenta diâmetro máximo característico e granulometria mais grossa que o agregado natural

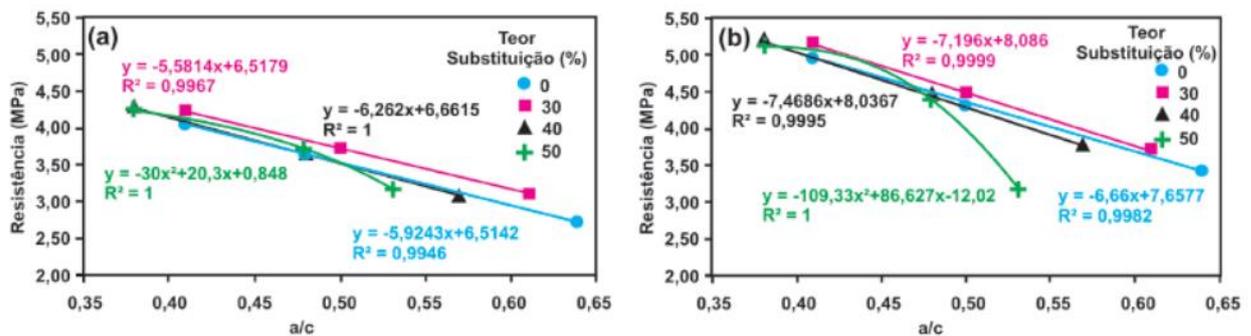
Em seguida, foram elaborados os gráficos, que estão apresentados No Gráfico 5, que representam os resultados de resistência à tração por compressão diametral e, no Gráfico 6 estão expostos os gráficos com os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos produzidos aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Gráfico 5 – Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos: (a) aos 7 dias e (b) aos 28 dias.



Fonte: GONÇALVES et al (2009)

Gráfico 6 – Resultados de resistência média à tração na flexão dos concretos: (a) aos 7 dias e (b) aos 28 dias.



Fonte: GONÇALVES et al (2009)

Através dos gráficos, seus autores puderam verificar que tanto na resistência à tração por compressão diametral, quanto na resistência à tração na flexão, houve um aumento de resistência à medida que há um aumento do teor de substituição da areia por escória de cobre até 40%. Há um aumento da resistência à tração quanto menor for a relação a/c. Pode ocorrer redução nas resistências mecânicas do concreto, principalmente com relação à tração por flexão, pelo fato de que os grãos de escória de cobre apresentarem uma textura lisa. Porém a redução dos vazios, devido à maior densificação da matriz, pode ter sido predominante sobre a possível redução da aderência.

Concluíram também que os concretos com teor de substituição acima de 40% e relação água/cimento (a/c) acima de 0,50 apresentaram uma redução da resistência à tração.

Pode-se concluir que a resistência à compressão axial do concreto aumentou com a substituição de parte da areia por escória de cobre, em todas as idades de ensaio. Entretanto, nos concretos com 50% de escória, com relação a/c igual a 0,53, a resistência foi inferior à do concreto de referência.

A resistência à tração dos concretos, seja por compressão diametral ou na flexão, também aumentou com a utilização da escória de cobre como parte do agregado miúdo. O aumento da resistência foi maior, quanto maior foi o teor de escória de cobre. Porém, nos concretos com 50% de escória, a resistência à tração por compressão diametral foi menor do que à do concreto de referência.

Pode-se concluir que a utilização de escória de cobre como parte do agregado miúdo, até 40% em volume, proporcionou melhor desempenho do concreto quanto às propriedades mecânicas avaliadas. Dessa forma, a utilização de escória de cobre como agregado miúdo para concreto apresenta-se como uma grande alternativa, não só pelas vantagens técnicas, mas pela redução do impacto ambiental provocado pela escassez e exploração descontrolada de areia.

Analisando o artigo influência da pozolanidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis, os autores chegaram em um resultado de resistência à compressão de 41 Mpa em 28 dias para a argamassa de referência e 28 Mpa para argamassas com substituição de substituição de 35%, demonstram que esta pozolanidade permite substituir parte do cimento por escória, uma vez que os valores obtidos são compatíveis com resistências à compressão de argamassas empregadas na construção civil, como mostra na Tabela 8.

Tabela 8 – Resistência à compressão de argamassas aos 28 dias.

Argamassa	Substituição de escória (%)	z	Consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa)
Referência	0	0,50	220	41
Escória	35	0,50	210	28

Fonte: COUTO et al (2010)

A Tabela 9 mostra os resultados de resistência à compressão aos 28 dias do concreto com substituição de 35% de cimento por escória permitiram atingir o valor de 22 MPa sendo que o concreto de referência apresentou 30 Mpa.

Tabela 9 – Resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

Concreto	% de substituição do cimento por escória de alto-forno	Aditivo Plastificante Polifuncional	Fator a/c	Resistência à compressão (MPa)	
				7 dias	28 dias
Referência	0	1%	0,50	20,0	30,0
Escória	35,0	1%	0,50	18,0	22,0

Fonte: COUTO et al (2010)

Os autores apresentaram, na Tabela 10, a absorção de água em argamassas, que foi de 8,8% para argamassa com substituição e 7,8% para as argamassas de referência.

Tabela 10– Ensaio de absorção de água, índices de vazios e massa específica em argamassas.

Argamassa	Substituição de escória (%)	Absorção de água por imersão (%)	Índice de vazios	Massa específica (kg/dm ³)
Referência	0	7,8	16,2	2.489
Escória	35	8,8	18,0	2.488

Fonte: COUTO et al (2010)

Já o ensaio de absorção de água por imersão dos concretos tanto com substituição como o de referência ficaram abaixo de 5% foi representado na Tabela 11.

Tabela 11– Ensaio de absorção por imersão do concreto

Concreto	Substituição de escória (%)	Absorção de água por imersão (%)
Referência	0	4,2
Escória	35	2,5

Fonte: COUTO et al (2010)

Conclui-se que a análise dos resultados permite confirmar que as escórias de alto-forno finamente divididas e em presença de umidade, ao reagirem com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento Portland, formam compostos com propriedades aglomerantes, justificando plenamente ampliar sua utilização como material substitutivo de parte do cimento em argamassas e concretos. Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias com substituição de 35% por escória são comparáveis as resistências da argamassa de referência e do concreto de referência

correntemente empregados na construção civil. Os valores de absorção de água por imersão dos corpos de prova, tanto na argamassa de referência como na argamassa com substituição, são compatíveis com valores de absorção indicados como parâmetros de durabilidade. A absorção do concreto com escória e do concreto de referência abaixo de 5% demonstra que os concretos produzidos atendem ao requisito básico de qualidade, apresentar uma baixa absorção, uma vez que este valor está bem abaixo dos 10% preconizado para garantir a durabilidade. Os critérios de durabilidade das argamassas e concretos produzidos com a escória de alto-forno básica granulada, constantes da metodologia proposta confirmam que este resíduo siderúrgico, pode se reinserido no processo produtivo da construção civil de forma sustentável.

4.2.2 Casca de cerâmica

Nos últimos anos o processo de microfusão, também conhecido como como cera perdida vem se destacando no mercado nacional e principalmente no mercado internacional.

No Brasil, recentemente operam mais de 30 empresas de microfusão, de todos os portes, situadas nas regiões Sul e Suldeste do país.

De acordo com Machado (2005 apud MACHADO; MORAVIA 2012), “o processo de microfusão proporciona inúmeras vantagens como excelente acabamento superficial precisão dimensional, obtenção de formatos simples a complexos e aplicação para diferentes tipos de liga.” Deste modo, o processo de fundição por cera perdida oferece peças com qualidade que atendem às exigências das indústrias, odontológica aeronáutica, automobilística, alimentícia, têxtil, petroquímica, agrícola, médica, e de esportes.

O processo da microfusão gera um resíduo, intitulado de casca refratária ou casca cerâmica. Sendo que, este resíduo tem como destinação final ser acondicionado na própria empresa, sem qualquer tipo de tratamento ou depositado em aterros sanitários.

4.2.2.1 Características do resíduo

Após ser utilizada no processo de fabricação de peças metálicas, pela microfusão, o molde de casca de cerâmica é quebrado gerando grandes quantidades de resíduo de casca de cerâmica.

Machado e Freitas (2001) há relatos antigos do processo de fundição de peças. Este processo resume-se em preencher o molde cerâmico em casca, é imergido em uma lama cerâmica, escoado, coberto com areia fina e após a secagem, repete-se o procedimento várias vezes, utilizando grãos gradualmente maiores, formando um molde oco, após a retirada da cera do seu interior, que servirá como base para preencher com metal líquido.

A casca refratária deve ser forte o suficiente para resistir a dois grandes esforços, a saída do material sobre atuação do calor e entrada do metal líquido resistindo até a completa solidificação. A espessura do molde varia entre 5 a 16 mm. Para evitar perdas de partículas do exterior do molde, a última camada, camada de vedação, é deixada sem estuco. (HENDRICKS et al., 2002).

Machado e Freitas (2001) ressaltam que os métodos de fundição, devem ser classificados de acordo com os moldes, em não permanente (moldes e areia, casca cerâmica e outros) ou ainda permanente (fundição sobre pressão, coquilha a gravidade e centrifugação). Além disso, de acordo com o modelo existem subclassificações, perdido (isopor, cera) ou não (madeira, resina, metálica).

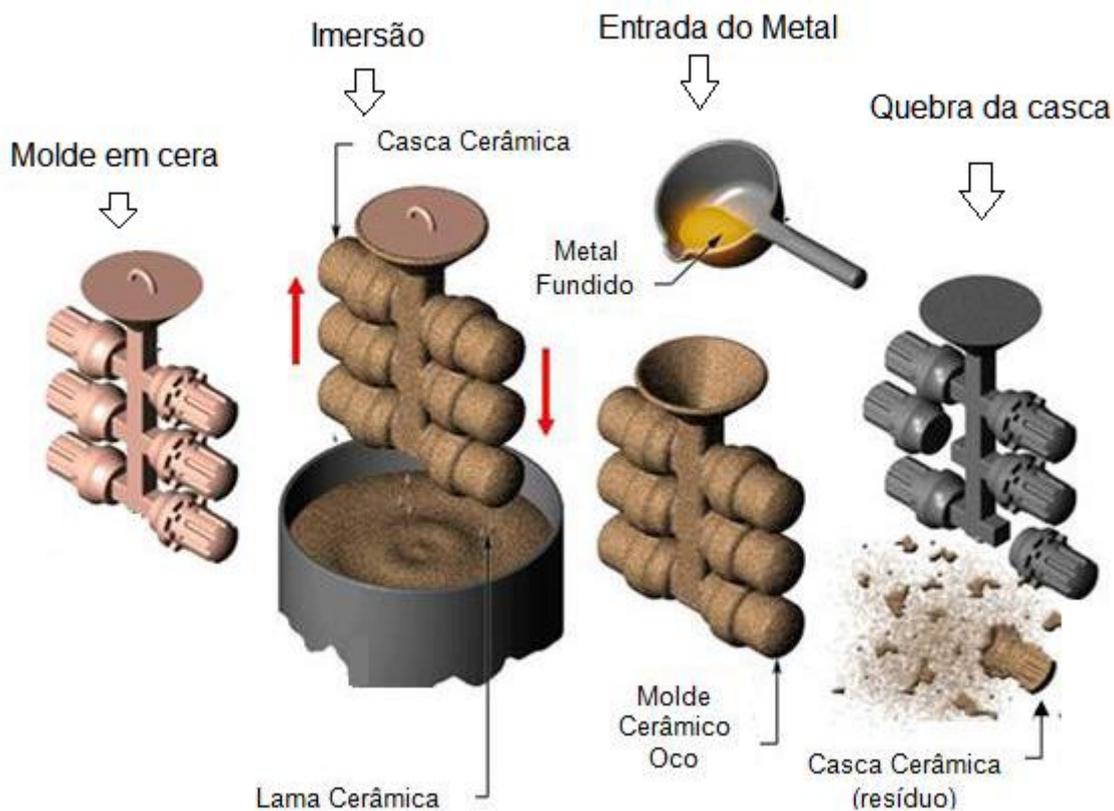
Os componentes utilizados nessa etapa suportam o metal fundido a temperaturas elevadas (de modo geral em torno de 1650°C) e para evitar reação entre o metal e o molde são materiais totalmente inertes. Para a produção da casca (estuco e lama) são utilizados: refratários, aglomerantes, agentes de molhamento, antiespumantes e outros aditivos.

A água pode mostrar alterações em diferentes regiões quanto ao teor de minerais e o pH. Estes critérios influenciam nas propriedades da água a ser empregada na lama.

De modo geral, é recomendado utilização da água destilada ou deionizada na lama. No caso da água com dureza elevada é inconveniente, já que cálcio e magnésio em pequenos teores desestabilizam a sílica coloidal.

A Figura 6 representa de forma resumida o processo de fabricação da casca de cerâmica que foi explicado até aqui.

Figura 6 – Processo de fabricação da casca de cerâmica



Fonte: Adaptado de custompart.net

4.2.2.2 Aplicações

O estudo de Machado (2012) sobre a caracterização do resíduo de casca cerâmica do processo de fundição por cera perdida para emprego como pozolana propõe a utilização de resíduos cerâmico como escolha atrativa, para serem empregados como adições pozolânicas em materiais cimentícios.

Os resultados da utilização de materiais pozolânicos em substituição parcial do cimento no processo de fabricação de concreto foram estudados por diferentes autores. Ganesan et al. (2007) analisaram características físicas e mecânicas do concreto com substituição de 20% do cimento por cinza do bagaço de cana e obtiveram resultados positivos. Vejmelková et al. (2012) concluíram que o resíduo

cerâmico de tijolos pode ser utilizado em substituição do cimento na produção de concretos de alto desempenho.

Já o estudo de Tedesco (2016) sobre estudo da utilização de resíduo de casca cerâmica de microfusão no concreto em substituição ao agregado graúdo e miúdo natural, como o próprio título diz o trabalho propõe a utilização do resíduo de casca de cerâmica como agregado.

Machado (2005), no processo de microfusão um dos maiores desafios é obter cascas de cerâmicas com resistência mecânica capaz de resistir a deceragem, manuseio e entrada do metal e ao mesmo tempo com permeabilidade que permita a saída dos gases durante o vazamento do metal, diminuindo também o custo sem interferir na qualidade final do produto e o meio ambiente. Após a finalização do processo, a casca cerâmica formada e posteriormente descartada torna-se um resíduo com enorme potencial de reciclagem, entretanto, sem muitos estudos para a aplicação efetiva.

A construção civil, é certamente a maior indústria consumidora de recursos naturais de qualquer economia e grande geradora de resíduos. Para diminuição dos seus impactos é preciso desenvolver técnicas de reciclagem que combinem desenvolvimento técnico com proteção ao meio ambiente (GONÇALVES, 2011 apud TEDESCO 2016). Técnicas que utilize a construção civil, mais especificamente o concreto, como fonte de incorporação do resíduo de casca cerâmica, como agregado graúdo e miúdo.

4.2.2.3 Dosagem

No estudo de Machado; Moravia (2012) a análise da atividade pozolânica pelo método químico foi adotado o método Chapelle modificado, segundo a NBR 15895 (ABNT, 2010). O método consiste em manter em agitação uma mistura de 1g de material supostamente pozolânico com 2 g de óxido de cálcio em 250 ml de água, à temperatura de 90 ± 5 °C, durante 16 horas. O resultado é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material analisado. Pelo método físico para realizar a avaliação a atividade pozolânica foi determinado o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland, segundo as orientações da NBR 5752 (ABNT 1996). O IAP foi calculado pela fórmula (8):

$$IAP = \frac{f_{cp}}{f_{cc}} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

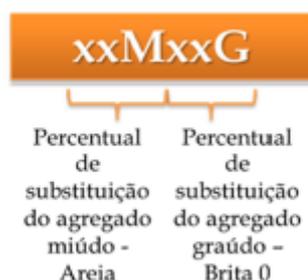
f_{cp} : resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova com resíduo cerâmico;

f_{cc} : resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova de referência apenas com o cimento.

As misturas foram feitas com o auxílio de um misturador planetário de eixo vertical para a moldagem de corpos-de-prova e posteriormente a avaliação da resistência à compressão. Seis corpos de prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura foram moldados. Três corpos de prova de referência (sem a adição do resíduo de casca de cerâmica) e três copos de prova com a adição do RCC (35% de substituição do volume de cimento). Durante 28 dias, após a cura, em água saturada com cal, os corpos de prova foram rompidos, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996) utilizando-se de uma prensa da marca EMIC DL 3000N.

Tedesco (2016) em seu estudo, utilizou o método IPT EPUSP, para realização das dosagens dos concretos. Seis dosagens foram realizadas, a primeira sem resíduo de casca de cerâmica(CC), posteriormente com 50% de resíduo como agregado miúdo (50M) - percentagem usada nas dosagens com incorporação de resíduo-, 50M mais 25% de resíduo como agregado graúdo (50M25G), 50M mais 50% de resíduo como agregado graúdo (50M50G), 50M mais 75% de resíduo como agregado graúdo (50M75G) e 50M mais 100% de resíduo como agregado graúdo (50M100G) (Figura abaixo).

Figura 7 – Percentual de dosagem



Fonte: Tedesco (2016, p. 23)

4.2.2.4 Desempenho

Segundo a dissertação de Machado; Moravia (2012) os resultados obtidos foram:

A Tabela 12 exibe o teor percentual (em massa) da composição química do resíduo de casca de cerâmica alcançada pelo método de fluorescência de raios X.

Tabela 12 – Composição química do resíduo da casca cerâmica RCC, expressa na forma de óxidos em % da massa da amostra analisada.

Composto	Teor (% em massa)
SiO _{2el}	74,70
Al ₂ O ₃	17,48
Fe ₂ O ₃	0,89
CaO	0,11
K ₂ O	0,04
MnO	0,042
MgO	<0,01
ZrO ₂	4,50
P ₂ O ₅	1,60
BaO	0,73
TiO ₂	0,66
Perda ao fogo: <2%	

Fonte: Machado; Moravia (2012, p. 2305)

A verificação química mostrou a SiO₂, Al₂O₃, e a ZrO₂ como os principais compostos presentes na constituição do RCC. Superando o limite mínimo de 70% determinado pela norma NBR 12653 (ABNT/1992), para que o material seja considerado pozolânico, o somatório dos teores dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ equivale a 93,07%. Portanto o RCC apresentou propriedades pozolânicas de acordo com este critério de avaliação. Definido pela norma NBR 12653, para materiais pozolânicos a perda ao fogo foi inferior ao valor máximo de 10%. Importante salientar que a composição química pode sofrer pequenas alterações, sobretudo em teores de óxidos, dependendo do processo de fabricação da casca cerâmica utilizado por cada

empresa de microfusão. As características físicas do RCC estão descritas na Tabela 13.

Tabela 13 – Características físicas do resíduo de casca cerâmica

Características	Valor (unidade)
Massa específica aparente	2,59 g/ml
Massa específica real	3,02±0,01 g/cm ³
Superfície específica, BET	3,8 m ² /g
Retido na peneira 325 mesh	25,5 %

Fonte: Machado; Moravia (2012, p. 2306)

A massa específica aparente do resíduo foi de 2,59 g/ml, valor este 16% abaixo da massa específica do cimento usado nesse trabalho, cujo valor foi de 3,1 g/ml. O RCC mostrou uma densidade real igual a 3,02±0,01 g/cm³, obtida por picnometria a hélio, valor bem próximo da massa específica real do cimento CPV ARI que é de 3,07g/cm³. O resíduo de casca cerâmica apresentou uma superfície específica de 2,62 vezes maior do que o cimento CPV ARI (1,45 m² /g). Significa, portanto, que o resíduo de casca de cerâmica é um material com maior área superficial em comparação com cimento, o que favorece a sua reatividade. O percentual retido na peneira 325 meshes, atende às definições estabelecidas pela NBR 12653 para material pozolânico, estando abaixo de 34%. A Tabela 14 mostra a distribuição do tamanho de partículas do RCC, obtida por granulometria a laser.

Tabela 14 – Distribuição do tamanho de partículas do resíduo da casca cerâmica

Amostra	D ₁₀ μm	D ₅₀ μm	D ₉₀ μm
RCC	0,93	4,50	27,07

Fonte: Machado; Moravia (2012, p. 2307)

O ensaio apresentou que o RCC é um material muito fino, do qual 90% dos grãos deste resíduo exibem diâmetros inferiores a 27,07 μm e 50% da amostra têm grãos inferiores a 4,50 μm. Uma vez que o cimento usado na fabricação de concretos

e argamassas possui D50 de 20,59 μm , esta granulometria confere ao resíduo a capacidade de atuar como adição mineral. A maior finura do resíduo em relação ao cimento colabora com a reatividade desse material e promove o efeito filler em matrizes cimentícias.

Em conformidade com as investigações de risco ambiental efetuadas, o RCC pode ser classificado como resíduo não inerte - classe II A. Neste contexto ressalta-se que, resíduos de classe II A podem apresentar características tais como combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Também foi observado a ausência de umidade, pH levemente básico e isenção de matéria orgânica.

A Tabela 15 mostra os resultados das análises da atividade pozolânica do RCC pelo método físico e pelo método químico.

Tabela 15 – Análise da atividade pozolânica do resíduo da casca cerâmica

Método	Resultados	Referência	Classificação
Físico	79,98%	75% (NBR 12653, 1996)	Pozolana
Químico	693 mg/g	330 mg/g (NBR 15895,2010).	Pozolana

Fonte: Machado; Moravia (2012, p. 2309)

A verificação da atividade pozolânica pelo método Chapelle modificado (método químico), observou-se que o RCC mostra valor de fixação igual a 693 mg/g (mg de CaO por g de amostra). O valor identificado é maior (110%) que o solicitado pela normalização para materiais pozolânicos, o que comprova quimicamente o caráter pozolânico do material.

Pelo método físico da atividade pozolânica, a avaliação do corpo-de-prova com adição do resíduo exibiu uma resistência média à compressão de 24,02 MPa, em contrapartida os corpos-de-prova de referência tiveram uma resistência média de 30,03 MPa. Estes resultados conferem ao RCC um índice de atividade pozolânica igual a 79,98% o qual supera o valor mínimo de 75% estabelecido pela NBR 12653 para ser denominado como material pozolânico.

Depois dos estudos dos resultados descobertos para a avaliação da atividade pozolânica, tanto o ensaio pelo método químico Chapelle, quanto o ensaio de resistência à compressão de argamassas, auxiliaram para comprovar a pozolanicidade do RCC.

Tedesco (2016) em sua dissertação obteve os seguintes resultados:

A distribuição granulométrica e as características físicas e da areia e da casca cerâmica – NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009) - são dispostas na Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16 – Propriedades do agregado miúdo – areia e casca cerâmica

	Agregado natural Areia	Agregado reciclado Casca cerâmica
Massa específica aparente do agregado seco	³ 2,58 g/cm	³ 2,68 g/cm
Absorção de água	0,4 %	2,64 %
Módulo de finura	2,65	3,10

Fonte: Tedesco (2016, p. 45)

Para a dosagem de concreto é essencial a determinação da massa específica aparente dos materiais, visto que conhecendo o seu resultado é possível calcular o consumo de materiais usados para elaboração das misturas. A massa específica aparente do material pode ser determinada como a massa do material por unidade de volume, abrangendo os vazios internos do mesmo. A massa específica do agregado miúdo natural é cerca de 3,7 % menor que a do agregado miúdo reciclado.

A taxa de absorção do material normalmente tem índices baixos, nos agregados naturais e não é considerada sua influência na fabricação de concretos convencionais, assim sendo, 0,4% para a areia e 0,18% para a brita 0 (Tabela 16 e Tabela 18). De acordo Djerbi Tegguer (2012) a quantidade de água absorvida depende especialmente da continuidade dos poros na partícula e da quantidade, a medida que a taxa de absorção depende do tamanho e também da continuidade

desses poros, fatores secundários como o tamanho das partículas também podem ter um efeito.

Resultando em um módulo de finura um pouco maior, o agregado miúdo reciclado tende a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que o agregado natural, como pode ser visto na Tabela 16(2,65 para a areia e 3,10 para o resíduo). Além de que, a forma das partículas desempenha uma influência enorme na produção de concretos, especialmente sobre a compactidade, trabalhabilidade, e quantidade da água de amassamento necessária à mistura.

Tabela 17– Distribuição granulométrica do agregado miúdo – areia e casca cerâmica

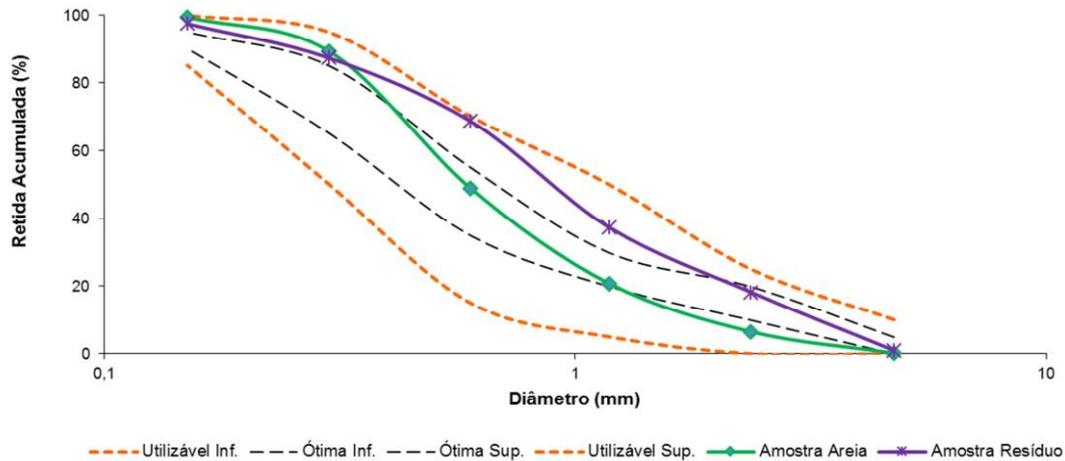
Peneiras (mm)	Limite Inferior (%)		Limite Superior (%)		Amostra (%) Areia	Amostra (%) Casca cerâmica
	Utilizável	Ótima	Ótima	Média	Média	Média
4,75	0	0	5	10	0,2	1,0
2,36	0	10	20	25	6,5	18,3
1,18	5	20	30	50	20,8	37,4
0,6	15	35	55	70	48,9	68,5
0,3	50	65	85	95	89,3	87,3
0,15	85	90	95	100	99,4	97,4

Fonte: Tedesco (2016, p. 46)

A moagem e posteriormente distribuição granulométrica foi concretizada em comparação com a areia usada, sendo que os ensaios seguiram a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Na Gráfico 7 pode ser verificado as distribuições granulométricas dos agregados miúdos utilizados, areia e casca cerâmica, ficaram com curvas/faixas muito próximas (dentro dos limites da norma), o que é desejável para o andamento apropriado dos ensaios.

Gráfico 7 – Distribuição granulométrica comparativa dos agregados miúdos – Areia e Casca cerâmicas



Fonte: Tedesco (2016, p. 47)

Ao ponderar os dados alcançados, notar-se que quanto maior o módulo de finura dos agregados, maior é o tamanho de suas partículas, o que diminui a superfície específica dos agregados e, por causa disso, a necessidade de pasta para lubrificar os grãos. Segundo o resultado do módulo de finura, seria plausível dizer que a demanda de água para o agregado miúdo reciclado deve ser maior a do agregado natural, entretanto outras características também devem observadas quando se analisa a quantidade de água necessária para as misturas, tal como, a textura e o formato das partículas.

Todas estas propriedades dos agregados reciclados tratadas são resultado do material de origem e do tipo de britador selecionado para o beneficiamento do material. Já que o britador giratório torna as partículas mais arredondadas e o britador de mandíbulas acentua a forma angular.

4.2.2.4.1 Agregado graúdo natural e reciclado – Brita 0 e casca cerâmica

As propriedades físicas e a distribuição granulométrica da Brita 0 e da casca cerâmica – NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009) - são exibidas na Tabela 18 e Tabela 19.

A taxa retirada de borra metálica (pedaços de metal) da amostra total de casca cerâmica utilizada foi de 1,9 %. Na etapa do processo de fundição este material é

deixado pelo processo de vazamento do metal líquido no molde, e pode ser reutilizado, podendo ser reincorporado no processo de fusão do aço.

Tabela 18 – Propriedades do agregado graúdo – Brita 0 e casca cerâmica

	Agregado natural Brita 0	Agregado reciclado Casca cerâmica
Massa específica aparente do agregado seco	³ 2,63 g/cm	³ 2,29 g/cm
Massa unitária	³ 1,33 kg/m	³ 1,26 kg/m
Absorção de água	0,18 %	4,68 %
Dimensão máxima característica	12,5 mm	12,5 mm
Índice de forma	4,73	2,61

Fonte: Tedesco (2016, p. 48)

A dimensão máxima característica do agregado graúdo é 12,5 mm com 99,38% dos grãos passantes nesta peneira para a brita 0 e 99,58% para a casca cerâmica, o que está incluso nos limites constituídos pela norma da NM 248 (ABNT, 2003).

A massa específica do agregado miúdo reciclado é cerca de 12,9 % maior que a do agregado miúdo natural.

Acredita-se que o sistema de beneficiamento dos resíduos e a sua constituição devem ter influência direta sobre os resultados alcançados quando em comparação dos resultados para os agregados reciclados miúdo (2,64%) e graúdo (4,68%).

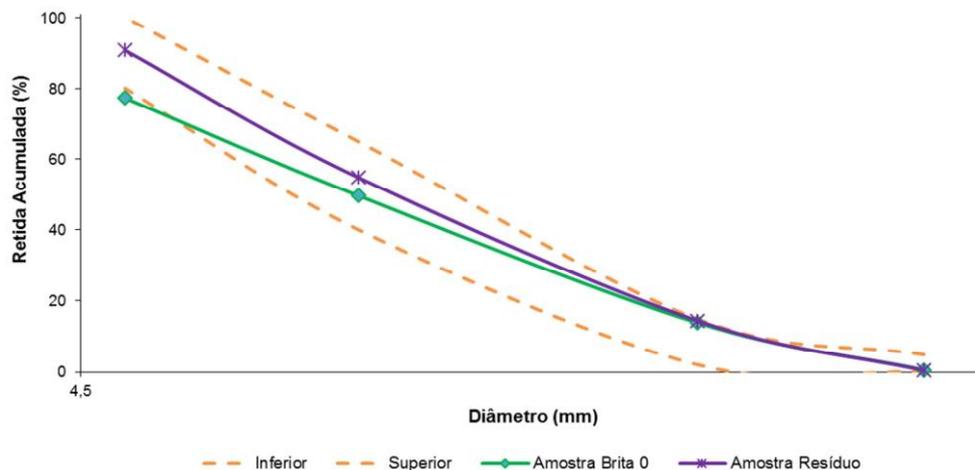
Tabela 19 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo – Brita 0 e casca cerâmica

Peneiras (mm)	Limites Brita 0 (%)		Amostra (%) Brita 0	Amostra (%) Casca cerâmica
	Superior	Inferior	Média	Média
12,5	0	5	0,6	0,4
9,5	2	15	13,9	14,4
6,3	40	65	49,6	54,8
4,75	80	100	77,3	90,7

Fonte: Tedesco (2016, p. 48)

A distribuição granulométrica é demonstrada graficamente na Gráfico 8.

Gráfico 8 – Distribuição granulométrica comparativa dos agregados graúdos – Brita 0 e Casca cerâmica



Fonte: Tedesco (2016, p. 49)

A moagem e posterior distribuição granulométrica foi realizada em comparação com a brita utilizada, sendo que os ensaios seguiram a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

4.2.2.4.2 Concreto em estado fresco – Massa específica aparente, relação a/c e consumo de cimento

Ao final da dosagem, alcançando o abatimento de tronco de cone desejado (60 ± 10 mm), obteve-se os valores para a massa específica de cada traço de cada dosagem realizada Gráfico 9, adquirida pelo meio da fórmula (9) a seguir.

$$ME = \frac{m_{cpd} - m_{cpa}}{V} \quad (9)$$

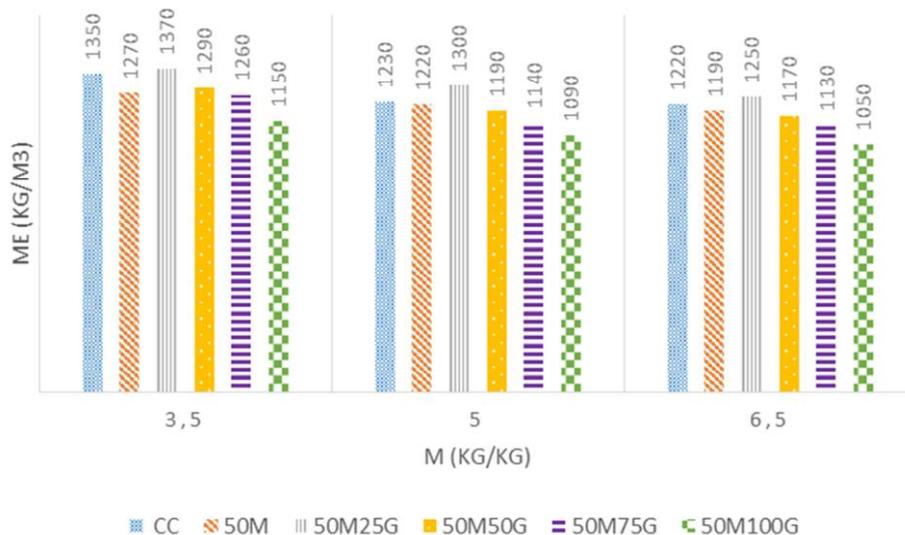
Onde:

m_{cpd} = massa do molde do corpo de prova preenchido com concreto, em kg;

m_{cpa} = massa do molde do corpo de prova sem concreto, em kg;

V = volume do molde do corpo de prova, neste caso corpo de prova cilíndrico nas dimensões de 10 cm (diâmetro) x 20 cm (altura), em kg/m^3 ;

Gráfico 9 – Massa específica para o concreto em estado fresco



Fonte: Tedesco (2016, p. 52)

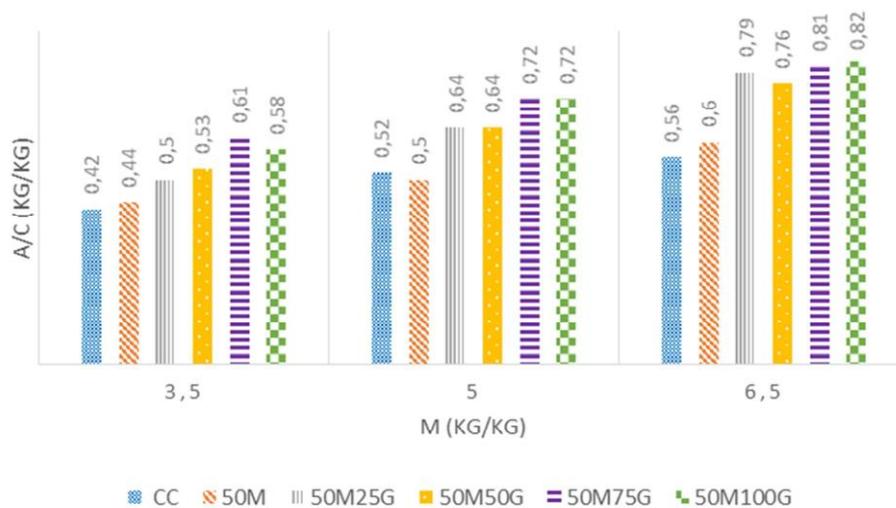
Na Gráfico 9, pode ser verificado que todos os tipos de concreto exibiram a mesma tendência, aonde a massa específica para o traço rico (rico em cimento) é maior, em seguida p traço intermediário e o traço pobre. O concreto convencional (CC)

mostrou a segunda maior massa específica, sendo menor apenas do concreto 50M25G.

Outra consideração importante a ser estudada é a relação a/c dos concretos produzidos.

O Gráfico 10 demonstra os resultados obtidos.

Gráfico 10 – Relação a/c para os diferentes concretos dosados

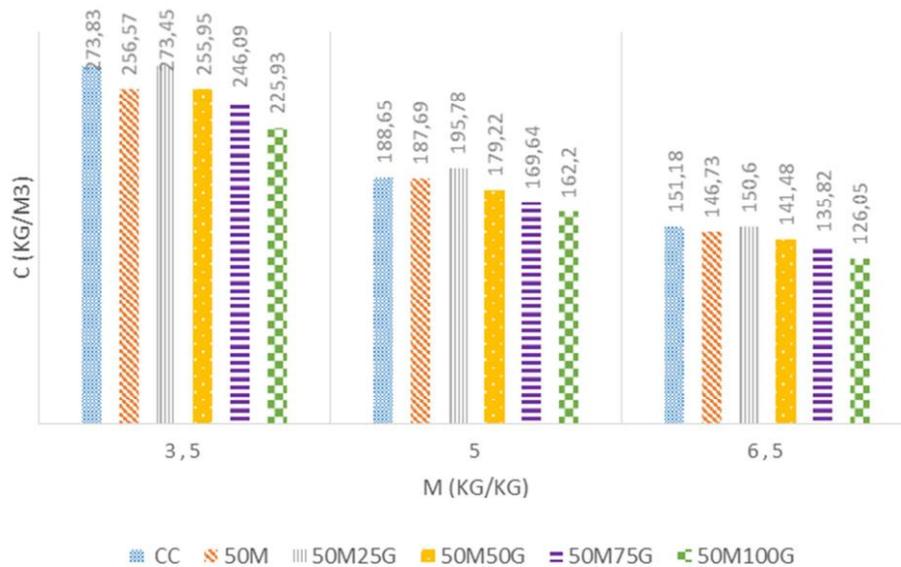


Fonte: Tedesco (2016, p. 52)

Como pode ser analisado, o desempenho da relação a/c com a adição do resíduo como agregado segue o previsto em literatura, sendo que ocorre um acréscimo de acordo com a incorporação da casca cerâmica no concreto, já que há maior absorção de água. González-Fonteboa et al. (2011) verificaram que o uso de agregado reciclado que tem maior disposição de absorção de água que os agregados naturais, tornou os valores de absorção de água obtidos para os concretos reciclados elevados em relação aos convencionais. Além disso, eles notaram que quando aumentava a porcentagem de substituição, maiores eram os valores de absorção de água.

Com os dados da massa específica e a relação a/c é adquirido o consumo de cimento (Lei de Molinari) para cada um dos casos analisados Gráfico 11.

Gráfico 11 – Consumo de cimento para os diferentes concretos dosados

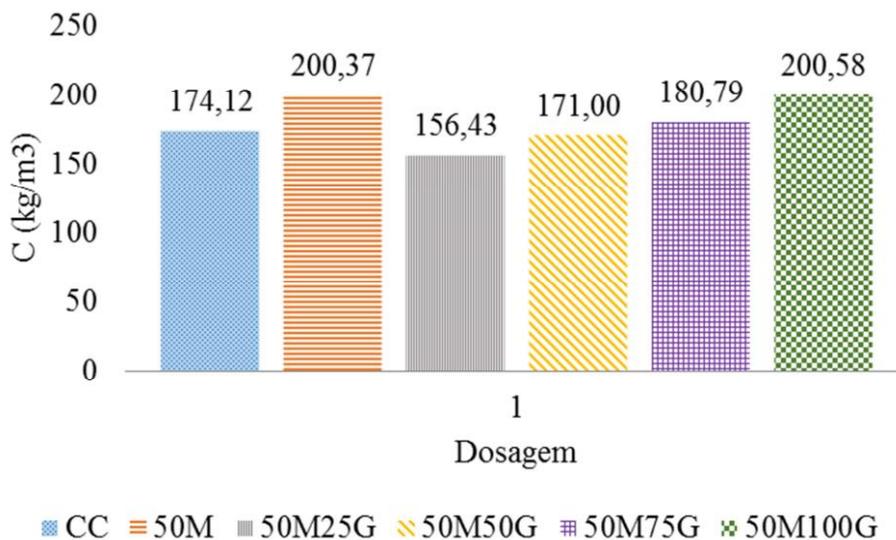


Fonte: Tedesco (2016, p. 54)

Conforme análise do gráfico o cimento é maior para o traço rico, seguido pelo traço intermediário e depois o traço pobre.

Ainda, foram usados os gráficos de dosagem para a comparação entre concreto convencional e as cinco substituições, com os parâmetros de 28 dias e 25 MPa de resistência à compressão Gráfico 12.

Gráfico 12 – Consumo de cimento para as dosagens, para um concreto de 28 dias e 25 MPa de resistência à compressão



Fonte: Tedesco (2016, p. 55)

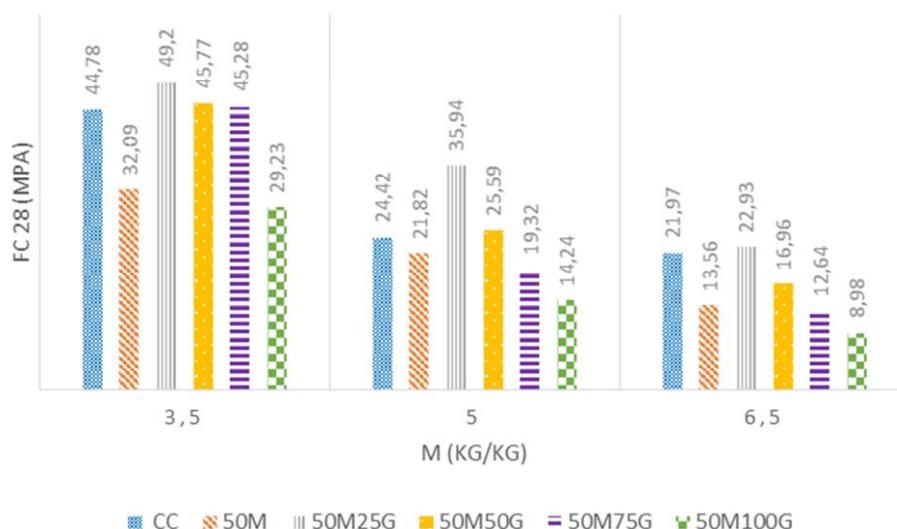
No Gráfico 12, é possível observar que o comportamento com a adição do resíduo de casca cerâmica mostrou-se satisfatório, podendo ser notado que o consumo de cimento é reduzido com a incorporação de uma forma geral. Minuciosamente, quando confrontada a dosagem CC e a 50M25G, nota-se uma redução de até 17,69 kg/m³ (para um concreto de 25MPA aos 28 dias), o que representa uma diminuição de custos e preservação de recursos naturais com a incorporação do resíduo de casca cerâmica no concreto.

4.2.2.4.3 Resistência à compressão

Os corpos de prova passaram por testes de compressão axial, após 7, 14 e 28 dias em processo de cura por imersão. Três rupturas foram realizadas para cada dosagem, em cada idade citada, sendo considerado como parâmetro a maior resistência.

Foram apresentados os dados para a resistência à compressão aos 28 dias, conforme no gráfico 13.

Gráfico 13 – Resistência à compressão axial aos 28 dias para as dosagens com relação a “m”



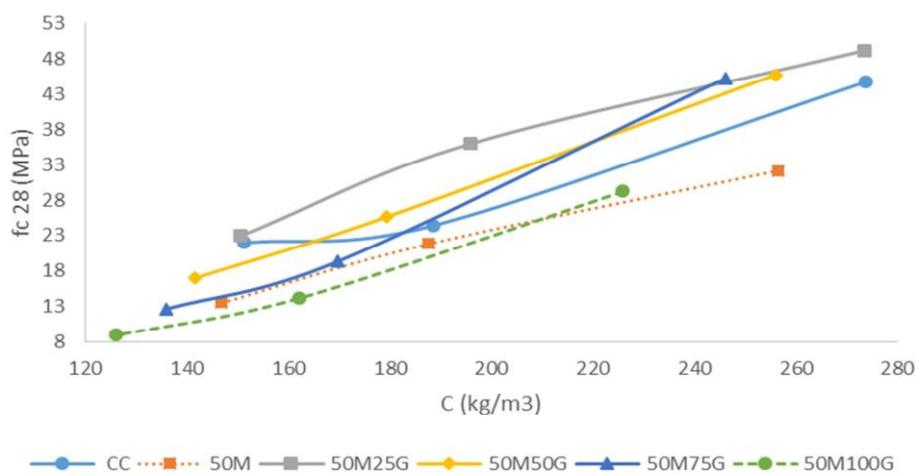
Fonte: Tedesco (2016, p. 57)

É possível perceber que o uso do resíduo somente como agregado miúdo deixou o concreto com resistência à compressão menor. Entretanto, sua utilização é

apropriada quando refletido em escala industrial, já que em sua fragmentação há ampla geração de finos, os quais podem ser usados e estão dentro da faixa granulométrica do agregado miúdo, o que provocaria uma otimização ambiental, gerando menos resíduo. Ainda, para o traço rico, pode-se notar que as adições 50M25G, 50M50G e 50M75G apresentaram maior resistência, inclusive em relação ao traço referência, sem resíduo. Para o traço intermediário, o resíduo continuou evidenciando vantagens quanto a este quesito para as incorporações 50M25G e 50M50G. Por fim, para o traço pobre em cimento, apenas a dosagem 50M25G proporcionou benefício em sua utilização com relação a resistência à compressão.

Também é importante de ressaltar que dependendo do produto que se almeja produzir, pode ser feita a escolha pela dosagem que melhor se adequa as propriedades desejadas e estipuladas em norma específica. Conseqüentemente, todas as substituições são utilizáveis e importantes, porém quanto maior a adição de resíduo e utilização das duas granulometrias (gráudo e miúdo) maior é reciclagem do material e menor é o impacto ambiental tanto para o processo de fabricação do concreto quanto para o gerador do resíduo. O consumo de cimento é um artifício importante a ser notado, já que representa o elemento de maior custo nas centrais de dosagem. Neste sentido, foram dispostos os dados do consumo de cimento e da compressão aos 28 dias, conforme Gráfico 14.

Gráfico 14 – Resistência à compressão aos 28 dias correlacionada ao consumo de cimento

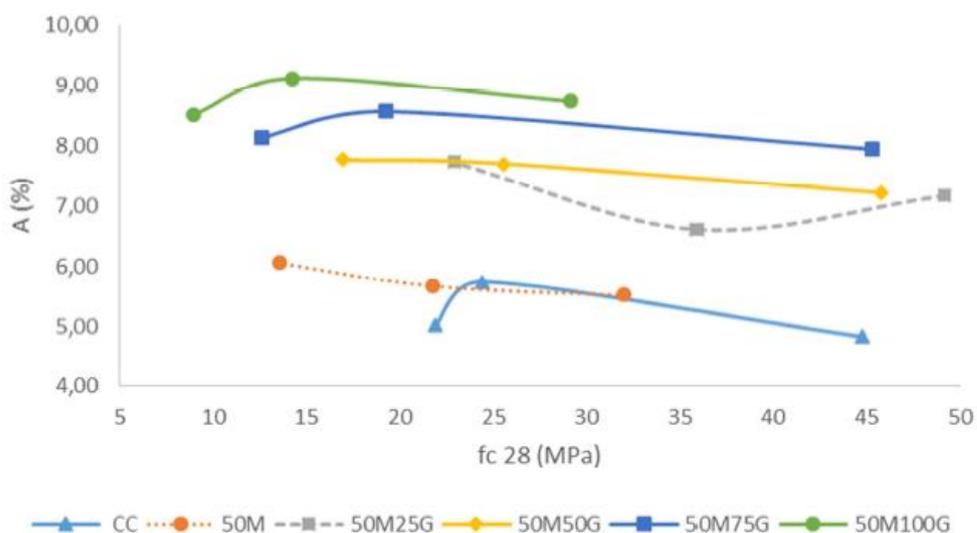


Fonte: Tedesco (2016, p. 59)

O Gráfico 14 torna-se interessante ao considerar as situações em particular, por exemplo, os concretos 50M50G e o 50M75G apresentam resistências muito próximas (45,77 e 45,28 MPa respectivamente) e uma diminuição de 9,86 kg/m³ no consumo de cimento. De modo geral, quanto maior a consumo de resíduo na mistura, menor a adição de cimento.

O Gráfico 15 relaciona a resistência à compressão aos 28 dias com a absorção de água do concreto em estado endurecido para os traços pobre, intermediário e rico. Compreender-se que as curvas características do concreto com incorporação de casca cerâmica como agregado graúdo e miúdo ofereceram comportamentos distintos quando comparado ao concreto convencional. Em todas as situações, a incorporação de agregado aumentou a absorção de água e a dosagem 50M25G, mesmo com a taxa de absorção maior, demonstrou um acréscimo de 9,87% na resistência à compressão entre os traços ricos. Para o traço pobre apenas o 50M25G mostrou uma resistência maior do que o concreto convencional. Em comparação os traços intermediários, o 50M25G teve grande benefício frente ao concreto convencional, sendo que o 50M50G também exibiu uma resistência maior. Os traços ricos das dosagens 50M50G, 50M50G e 50M75G ofereceram resultados para a resistência de compressão axial superiores aos valores achados no concreto convencional.

Gráfico 15 – Resistência à compressão aos 28 dias comparado com o percentual de absorção de água para os traços pobre, intermediário e rico.



Fonte: Tedesco (2016, p. 60)

4.3 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Entre os impactos ambientais causados pela construção civil, destacam-se o elevado volume de resíduos gerados, quem em sua grande maioria, principalmente no Brasil, são depositados em locais inapropriados. Isso torna a construção, um dos setores econômicos, de maior impacto ao meio ambiente.

Segundo Teixeira (2010 apud TESSARO; DE SÁ; SCREMIN 2012), este problema se generaliza por todo o planeta. Existe uma grande variação da composição dos resíduos sólidos e podem ser divididos em tipos, como doméstico, hospitalar, químico, industrial, além dos resíduos gerados pela construção civil. Se por um lado, a sociedade cresce e se desenvolve, proporcionalmente aumenta o entulho gerado. Tendo em vista também, que a sociedade se torna cada vez mais urbana, são vários fatores que contribuem para o crescimento na geração de resíduos.

De acordo com Oliveira (2008), os resíduos RCD provenientes da construção e demolição, possuem características específicas, que mudam de acordo com o local da geração, bem como as tecnologias empregadas.

Conforme Morais (2006), um dos maiores problemas, na gestão de municípios do Brasil, é o descarte inadequado destes resíduos, pois eles ocasionam impactos significativos no meio ambiente urbano da região, alterando e comprometendo a paisagem e o trajeto dos pedestres nas cidades, além da drenagem urbana, que pode ocasionar enchentes. As ações que necessitam urgentemente serem tomadas é o destino adequado dos resíduos, mas acima disso a redução da geração dos mesmos, contribuindo significativamente os impactos gerados (SOUZA, 2004).

4.3.1 Resíduos de cerâmica vermelha

A associação Brasileira de Cerâmica estima que existem aproximadamente 11.000 empresas específicas para produção de cerâmica vermelha, distribuídas por todo o país, gerando um faturamento de cerca de R\$ 2,8 bilhões, produzindo 70 milhões de toneladas ao ano (SEBRAE. 2008).

Por ser considerada uma matéria prima de baixo valor agregado, o local dessas empresas deve ser próximo as reservas de argila vermelha que estão espalhadas por praticamente todas as regiões do país. Por consequência, abrindo

espaço para muitas fábricas desde grande porte a micro, que é a grande maioria, que por muitas das vezes não utilizam técnicas atuais em seu processo de produção.

Apesar das técnicas se distinguirem o processo de produção é o mesmo, tendo desvantagem as empresas menores pois normalmente a produção é manual e de baixo controle tecnológico.

Segundo Cabral (2005), quando se utiliza a secagem em estufa, é recomendável a análise da curva de Bigot das argilas, que representa graficamente a retração linear de secagem em função da perda de água das massas cerâmicas conformadas, para que se possa conhecer o momento em que se é permitido acelerar a secagem, sem causar danos nos produtos finais.

Para avaliar o desempenho de produção de cerâmica vermelha incorporada no traço de concreto, foram analisados alguns estudos, que detalham seus objetivos, métodos e ensaios.

O primeiro texto analisado, Resíduo de cerâmica vermelha como agregado alternativo para construção civil, elaborado por Juzélia Santos da Costa e Adrielle Carpiné Favini, que foi escrito com o objetivo de beneficiar não só o meio ambiente, como também o construtor. Seus autores explicam que seu estudo foi impulsionado com a tentativa de reduzir a quantidade de rejeitos da construção civil depositados em locais inadequados e diminuir o número de minerais extraídos da natureza, visto que este também causa grandes danos ao meio ambiente, além de viabilizar a obra economicamente, facilitando para o construtor, visto que com a utilização de agregados reciclados no concreto, não haverá necessidade de comprar agregados naturais.

Já no segundo trabalho analisado sobre cerâmica vermelha, Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas *In Loco*, escrito por Patrycia Hanna Wada, visa estudar a influência da adição de resíduos de cerâmica vermelha (RCV), nas características mecânicas do concreto, em substituição ao agregado miúdo natural, tendo em vista a sua aplicação em fundações profundas moldadas *in loco*, propiciando para este resíduo uma aplicação nobre, apropriada e com respaldo técnico e científico.

4.3.1.1 Características do resíduo

O resíduo de casca de cerâmica utilizado por Costa e Favini consistiu de rejeito da demolição de uma edificação do CEFET-MT. As peças foram inicialmente fragmentadas com o uso de marretas e depois por um britador de mandíbulas. As autoras separaram o material obtido em frações granulométricas de interesse, para a preparação do concreto. O cimento utilizado para a moldagem do concreto, foi o Cimento Portland CII F – 32, da marca Itaú, com os dados descritos na Tabela 20. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7215 [5].

Tabela 20 – Caracterização de cimento Portland CII F -32.

Caracterização do Cimento CP II F - 32			
Ensaio Realizado	Norma Utilizada	Resultados Obtidos	Limites da Norma
Índice de Finura # 200	NBR 11579 [6]	3%	≤ 12%
Massa Unitária Solta	NBR 7251 [7]	1,15 g/cm ³	-
Massa Específica	NBR NM 23 [8]	3,26 g/cm ³	-

Fonte: FAVINI E COSTA (2008)

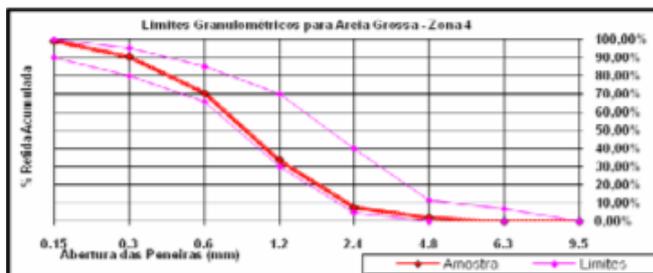
Os agregados grãos reciclados foram produzidos pela britagem e moagem até que o material cominuído tivesse granulometria passante em uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 12.5 mm, ficando retidos na peneira ABNT nº 4 (4,8mm). Os agregados miúdos reciclados também foram moídos e britados, tendo sua granulometria passante na peneira ABNT nº 4 (4,8mm) e sendo retidos no fundo da peneira. A Tabela 21 apresenta os valores da caracterização dos agregados naturais e reciclados. As Gráfico 16 e 17 apresentam as curvas granulométricas dos agregados reciclados.

Tabela 21 – Caracterização Física dos Agregados Naturais e Reciclados.

Propriedades	Agregado Natural		Cerâmica Vermelha		Normas
	Areia	Brita	Miúdo	Graúdo	
Diâmetro Máximo (mm)	4,8	19	4,8	12,5	NBR NM 248 [9]
Módulo de Finura	3,24	9,51	3,04	2,87	NBR NM 248 [9]
Massa Específica (g/cm ³)	2,56	2,45	2,27	2,27	NBR NM 52 [10]
Índice de Vazios (%)	5,83	1,19	10,23	39,78	NBR NM 53 [11]
Material Pulverulento (%)	0,53	0,37	7,00	0,80	NBR NM 46 [12]
Massa Unitária Solta (kg/dm ³)	1,56	1,38	1,054	0,93	NBR NM 45 [13]
Massa Unitária Compactada (kg/dm ³)	1,66	1,47	1,145	1,367	NBR NM 45 [13]
Absorção por Imersão (%)	0,26	0,49	11,18	12,44	NBR NM 53 [11]

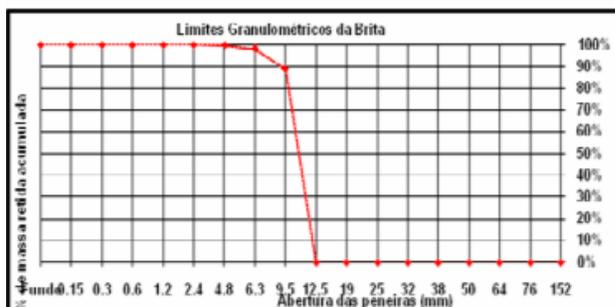
Fonte: FAVINI E COSTA (2008)

Gráfico 16– Curva Granulométrica do agregado miúdo reciclado de telha cerâmica vermelha (TVC). Diâmetro máximo característico: 4,8 mm; Módulo de finura: 3,4.



Fonte: FAVINI E COSTA (2008)

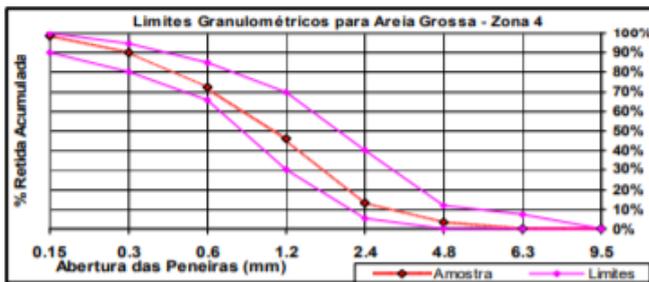
Gráfico 17 – Curva Granulométrica do agregado graúdo reciclado de telha cerâmica vermelha (TCV). Diâmetro máximo característico; 12,5 mm; Módulo de finura: 2,87.



Fonte: FAVINI E COSTA (2008)

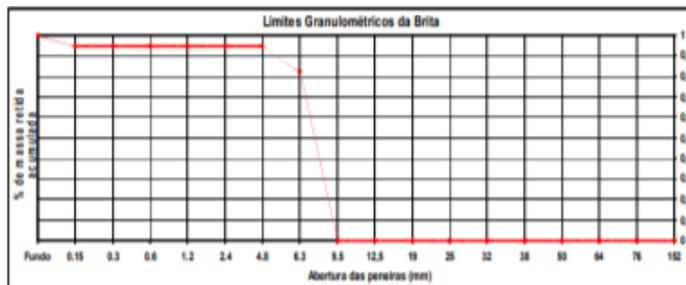
Os agregados naturais (areia lavada de rio e pedra britada), utilizados neste estudo, apresentaram granulometrias características de areia grossa e brita 1, conforme Gráfico 16 e 17. Os Gráficos 18 e 19 são ilustrações dos agregados produzidos com rejeito de telha cerâmica vermelha usada.

Gráfico 18 - Curva granulométrica do agregado miúdo – areia de rio. Diâmetro máximo característico: 4,8mm; modulo de finura: 3,24.



Fonte: FAVINI E COSTA (2008)

Gráfico 19 – Curva granulométrica do agregado graúdo – pedra britada. Diâmetro máximo característico: 19mm; Modulo de Finura: 9,51.



Fonte: FAVINI E COSTA (2008)

Figura 8 - Agregado graúdo produzido com telha cerâmica vermelha usada./
Agregado miúdo produzido com telha cerâmica vermelha usada.



Fonte: FAVINI E COSTA (2008)

Costa e Favini ressaltam que os materiais naturais e reciclados foram avaliados quimicamente, com o objetivo de conhecer suas propriedades diante da possibilidade de ocorrer reações do tipo álcali-agregado. Após os testes por meio do método de determinação da reatividade potencial do agregado, sendo este regido pela ASTM 1260 – C, obteve-se expansão inofensiva para valor menor que 0,10% aos 28 dias de ensaio, contados a partir da moldagem. Portanto, o agregado reciclado pode ser utilizado no concreto, pois não apresenta reação álcali-agregado com os hidróxidos alcalinos existentes no cimento.

No segundo trabalho analisado, “Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas *In Loco*”, a autora destaca que todos os materiais utilizados foram caracterizados pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil em Ilha Solteira por meio de ensaios normatizados, com exceção do aditivo superplastificante que foi fornecido pelo próprio fabricante.

O agregado miúdo natural utilizado no trabalho foi proveniente do Porto de Areia Brambilla, localizado à margem do Rio Tietê, na cidade de Pereira Barreto – SP. A autora realizou a caracterização deste agregado miúdo segundo as normas da ABNT. A Tabela 22 apresenta resultados dos ensaios de caracterização e a Tabela 23 a distribuição granulométrica do material.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural

φ máximo (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica			Massa Unitária		Absorção (%)	Pulverulento (%)	Matéria Orgânica
		S.S.S. (g/cm ³)	Seca (g/cm ³)	Aparente (g/cm ³)	Solta (g/cm ³)	4% de Umidade (g/cm ³)			
1,18	1,87	2,619	2,629	2,613	1,487	1,107	0,24	0,26	+ Clara

Fonte: WADA (2010)

Tabela 23 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural

Abertura (mm)	0,075	0,15	0,3	0,6	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5
% Retida Acumulada	100,0	97,6	70,7	12,7	4,5	1,5	0,4	0,2	0,0

Fonte: WADA (2010)

O agregado graúdo utilizado no trabalho foi a brita 1 proveniente da Pedreira Três Fronteiras – SP. Os resultados obtidos da caracterização do material obtidos por Wada são oferecidos na Tabela 24. A Tabela 25 apresenta a distribuição granulométrica do material.

Tabela 24 – Caracterização do agregado graúdo

φ máximo (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica			Massa Unitária (g/cm ³)	Absorção (%)	Pulverulento (%)
		S.S.S. (g/cm ³)	Seca (g/cm ³)	Aparente (g/cm ³)			
25	7,15	2,929	2,888	3,011	1,616	1,42	0,55

Fonte: WADA (2010)

Tabela 25 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Abertura (mm)	0,15	0,3	0,6	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
% Retida Acumulada	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,7	99,4	96,4	15,4	0,5

Fonte: WADA (2010)

O cimento utilizado foi o CP II - Z - 32 (Cimento Portland composto por 6 a 14% de pozolana). Por se tratar de um cimento bastante utilizado na região Noroeste do Estado de São Paulo e facilmente encontrado no comércio, Wada optou por usar este tipo de cimento. Foram feitos ensaios de caracterização do material e os resultados obtidos se encontram descritos na Tabela 26 disponibilizada pela autora.

Tabela 26 – Caracterização do cimento CP II – Z – 32.

Ensaio Realizado		Valores Obtidos	NBR 11578 / NBR 5737		
			mínimo	máximo	
Finura Peneira 200 (% retida)		0,53	-	12,0	
Finura Peneira 325 (% retida)		4,60	-	-	
Superfície específica Blaine (cm ² /g)		3755	2600	-	
Densidade aparente (g/cm ³)		1,09	-	-	
Densidade absoluta (g/cm ³)		3,11	-	-	
Água de consistência da pasta	Gramas	139	-	-	
	(%)	27,80	-	-	
Início de pega (h : min)		02:58	01:00	-	
Fim de pega (h : min)		04:28	-	10:00	
Expansão em autoclave (%)		3,695	-	0,8*	
Resistência à Compressão Axial	Consistência da argamassa	Gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		04.08.2008	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	19,2	10,0	-
		07 dias	23,4	20,0	-
28 dias		32,2	32,0	-	
Análise Química (%)	Perda ao fogo		6,00	-	6,5
	Insolúveis		9,88	-	16,0
			20,13	-	-
			2,75	-	-
			4,18	-	-
	CaO		57,89	-	-
	MgO		5,97	-	6,5
			2,12	-	4,0
			0,15	-	-
			0,88	-	-
	Equivalente Alcalino		0,72	-	-
Cal livre em CaO		2,72	-	-	

* Ensaio não especificado pela ABNT

Fonte: WADA (2010)

A água utilizada no preparo dos traços de concreto é potável e proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Ilha Solteira – SP.

O aditivo utilizado na confecção dos traços de concreto foi o VISCOCRETE 3535 CB, à base de policarboxilato, por ser um redutor de água de altíssima eficiência. A autora ressalta que, se utilizado na dosagem ideal, as propriedades obtidas poderão ser: Redução de água, resultando em altas resistências à compressão; Fluidez, resultando em grandes reduções nos custos de lançamento e adensamento do concreto; Redução de retrações e fissuras no concreto; Redução ou eliminação de cura a vapor; Redução da taxa de carbonatação do concreto; Concreto fluido com mínimo fator a/c (água/cimento) sem segregação e exsudação; Melhoramento da aderência e textura da superfície do concreto; Aumento do módulo de elasticidade; e Aumento da impermeabilidade e durabilidade do concreto. Segundo o fabricante, o VISCOCRETE 3535 CB deve ser adicionado na água de amassamento ou diretamente na mistura de concreto fresco. Nunca deve ser adicionado com os componentes secos do concreto (cimento e agregado).

O resíduo de cerâmica vermelha, Patrycia Wada, retirou da Cerâmica Jomina, que está localizada na cidade de Castilho- SP. Esta fábrica de artefatos em cerâmica, forneceu seu resíduo, que é composto por peças defeituosas, descartadas no controle de qualidade. Inicialmente o resíduo encontrava-se em pedaços de tamanhos variados, fragmentos de telhas e blocos cerâmicos. Em seguida o material foi triturado no britador de facas do LCEC em diâmetro inferior a 4,75 mm. A Figura 9 ilustra uma amostra do material cerâmico triturado.

Figura 9 – Agregado miúdo artificial (cerâmica vermelha) triturado



Fonte: WADA (2010)

Após o beneficiamento e escolha da melhor granulometria, o agregado miúdo artificial de cerâmica foi submetido aos mesmos ensaios de caracterização aplicados ao agregado miúdo natural, conforme as normas técnicas brasileiras já citadas. Na Tabela 27 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de caracterização do agregado miúdo artificial. Já a Tabela 28 mostra a distribuição granulométrica.

Tabela 27 – Resultados dos ensaios de caracterização do resíduo cerâmico

φ Máx (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica			Massa Unitária		Absorção (%)	Pulverulento (%)	Matéria Orgânica
		S.S.S. (g/cm ³)	Seca (g/cm ³)	Aparente (g/cm ³)	Solta (g/cm ³)	4% de Umidade (g/cm ³)			
2,36	2,15	2,181	2,596	1,922	1,056	1,077	13,5	15,02	-

Fonte: WADA (2010)

Tabela 28 – Distribuição granulométrica do resíduo cerâmico

Abertura (mm)	0,075	0,15	0,3	0,6	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5
% Retida Acumulada	100,0	77,2	62,7	46,5	24,3	4,7	0,0	0,0	0,0

Fonte: WADA (2010)

Os autores acentuam que, a avaliação da atividade pozolânica seguiu as diretrizes e o método de ensaio descrito na norma brasileira NBR 5752 (ABNT, 1992) - “Materiais Pozolânicos: Determinação da Atividade Pozolânica – Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland”, qual verifica o índice de atividade pozolânica (IAP) de uma adição mineral com cimento Portland. O IAP é a relação entre os valores de resistência à compressão de uma argamassa com 65% de cimento e 35% de pozolana e de uma argamassa de referência (100% de cimento como aglomerante). O material utilizado para a realização do ensaio foi obtido a partir da britagem do resíduo cerâmico utilizado no desenvolvimento deste trabalho, que foi posteriormente peneirado na peneira de abertura # 0,075 mm. Na Tabela 29 encontram-se os resultados obtidos no ensaio.

Tabela 29 – Atividade pozolânica

	Traço Controle (padrão)	Traço Ensaiado
Quantidade de Água (g)	161	191
Resistência aos 28 dias (MPa)	32,4	15,6

Fonte: WADA (2010)

No ensaio de atividade pozolânica (atividade com cimento) foi confeccionada uma argamassa padrão (1:3) e um traço de argamassa com emprego de material pozolânico (RCV) em substituição a um percentual do cimento empregado na composição da mistura. Foram moldados 3 corpos-de-prova de 5x10 cm² para cada traço e realizado o ensaio de ruptura na idade de 28 dias. A partir destes resultados foi calculado o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento, segundo a expressão a seguir: $IAP = (Resistência\ aos\ 28\ dias\ de\ Ensaio / Resistência\ aos\ 28\ dias\ padrão) \times 100$ Para o ensaio realizado com RCV, o IAP resultante foi de aproximadamente 48,15%.

4.3.1.2 Aplicações

Sugestão de uso na construção do concreto reciclado. SANTANA, A.C., COSTA, J.S.

- Contrapisos, calçadas externas e similares;
- Regularização de pisos sem função impermeabilizante;
- Reforços não armados em edificações;
- Reforços armados em elementos sem presença de umidade (cintas, vergas se similares);
- Execução de peças de reforço não armadas em muros de vedação;
- Regularização de pisos para revestimento cerâmico, preferencialmente em pavimentos não apoiados diretamente sobre o solo;
- Lastro para fundação em edificações térreas;
- Fabricação de componentes de alvenaria de vedação (tijolos maciços, blocos, meios-blocos, canaletas, entre outros);
- Fabricação de outros componentes de concreto, não armados;
- Lajotas de concreto para lajes mistas;
- Tubos e canaletas para drenagem;
- Briquetes e lajotas de pavimentação (para estacionamentos, vias de tráfego de pedestres, ciclistas e motociclistas);
- Meios-fios, sarjetas e similares para serviços auxiliares de pavimentação;
- Fixação de mourões e portões em cercamentos;
- Outros serviços simplificados, não armados.

4.3.1.3 Dosagem

No artigo, resíduo de cerâmica vermelha como agregado alternativo para construção civil, as autoras fabricaram corpos-de-prova de concreto, utilizando rejeitos de telha cerâmica como agregados. O traço unitário em massa usado na confecção dos concretos utilizado foi 1:6, tendo como base para determinação do traço o empacotamento dos agregados de forma a proporcionar maior massa unitária compactada e menor índice de vazios. O fator água/cimento adotado foi o que

proporcionou um Slump test de 6,0, cujo ensaio é padronizado pela ABNT NM 67 , de acordo com o proposto pelo estudo em questão, pois proporciona bombeamento do concreto se este for usinado. Para o procedimento de execução do empacotamento, misturaram-se os agregados de acordo com as proporções de mistura da Tabela 30. O melhor resultado foi a proporção 60% de agregado miúdo e 40% de agregado graúdo, determinando que o traço utilizado foi 1:3,60:2,40 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo).

Tabela 30 – Proporções das misturas dos agregados, pelo método do empacotamento

Proporções	
Agregado Miúdo (%)	Agregado Graúdo (%)
35	65
40	60
45	55
50	50
55	45
60	40

Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

As autoras, Costa e Favini detalham que os concretos foram misturados em betoneira de 100dm³, por um período de 3 minutos. A temperatura durante o preparo foi de 35°C ± 2°C e umidade relativa de 53% (ambiente do laboratório). Na Tabela 31 encontram-se os resultados das propriedades físicas após empacotamento dos agregados.

Tabela 31 – Propriedades Físicas do Agregado Após Empacotamento.

Amostra	Mistura (%)		Massa Específica (g/cm ³) NBR NM 52 [10]	Massa Unitária Compactada (g/cm ³) NBR NM 45 [13]	Índice de Vazios (%) NBR NM 53 [11]
	Miúdo	Graúdo			
CTC	60	40	2,27	1,367	39,78

Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Os corpos-de-prova de concreto foram moldados manualmente, no formato cilíndrico com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, segundo a NBR 5738 [16]. Estes corpos-de-prova foram submetidos à cura em água por 28 dias. Foram realizados ensaios de caracterização mecânica e física dos concretos, sendo verificada a resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, absorção por imersão e absorção por capilaridade.

Já no texto da Patrícia Wada, a autora abordou o estudo de dosagem com base no método do IPT/EPUSP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) (HELENE; TERZIAN, 1992). Este método de dosagem parte primeiramente de uma avaliação com mistura em betoneira do traço 1:m (cimento:agregados secos totais, em massa).

Inicialmente estabeleceu-se um teor ideal de argamassa seca de 53% para o traço intermediário 1:8. Em seguida, com as quantidades de materiais já estabelecidas, o traço foi moldado com o auxílio de uma betoneira de eixo vertical. Logo após, verificaram-se as características do concreto no estado fresco. A trabalhabilidade requerida foi de 170 ± 20 mm, que foi controlada pelo ensaio no tronco de cone (slump test). Este valor foi estimado para se trabalhar com concreto plástico para ser lançado em fundações apiloadas de 4,5 m de profundidade e o mesmo ser adensado sem o auxílio de vibração. Com o mesmo teor de argamassa e abatimento do tronco de cone aproximado, moldaram-se os dois traços auxiliares (rico e pobre). O aditivo superplastificante foi usado para se obter o alto valor do abatimento. Foram moldados 9 corpos-de-prova por traço, três para cada idade de ruptura, aos 7, 14 e 28 dias. Os resultados obtidos encontram-se descritos na Tabela 32.

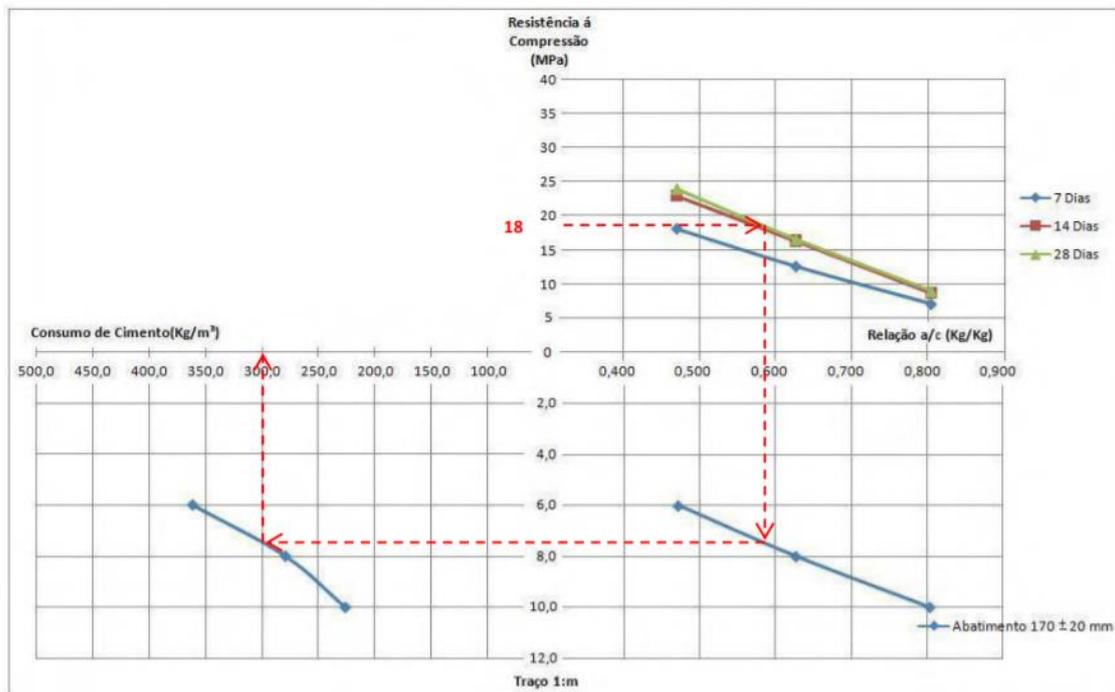
Tabela 32 – Dados do estado de dosagem; traço rico, intermediário e pobre

Traços para Estudo de Dosagem				
Traço 1:m		6,0	8,0	10,0
Dados da Dosagem	Teor de argamassa (%)	53	53	53
	Consumo de aglomerante (kg/m ³)	360,9	279,0	226,3
	Consumo de água (kg/m ³)	170	175	182
	Consumo de Areia (kg/m ³)	826	889	923
	Consumo de brita (kg/m ³)	1122	1115	1105
	Relação a/c (kg/kg)	0,471	0,627	0,804
	Consumo de Superplastificante (% sobre a massa de cimento)	0,4	0,4	0,4
Propriedades do Concreto Fresco	Slump (cm)	18,6	17,3	18,7
	Temperatura (°C)	24,4	23,6	24,1
	Ar incorporado (%)	9,3	-	-
	Densidade aparente (t/m ³)	2,353	2,315	2,259
Propriedades do Concreto Endurecido	Resistência aos 7 dias (MPa)	18,1	12,6	7,1
	Resistência aos 14 dias (MPa)	22,9	16,3	8,7
	Resistência aos 28 dias (MPa)	23,9	16,5	8,9

Fonte: WADA (2010)

Com os dados obtidos de abatimento, relação a/c, resistência à compressão e consumo de cimento por metro cúbico, traçou-se o diagrama de dosagem do concreto apresentado na Gráfico 20.

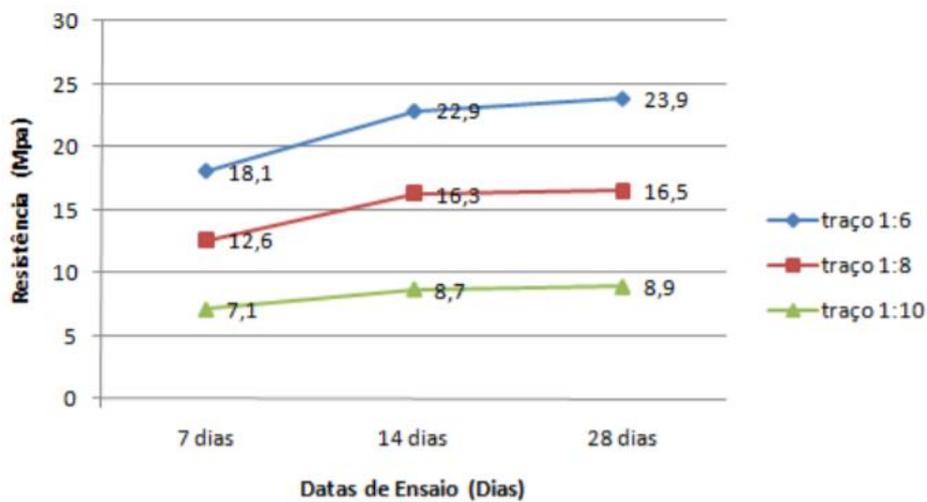
Gráfico 20 – Diagrama de dosagem, segundo o método proposto por Helene e Terzian (1992)



Fonte: WADA (2010)

O Gráfico 21 mostra o gráfico com as resistências do concreto aos 7, 14 e 28 dias obtidas no estudo de dosagem.

Gráfico 21 – Estudo de dosagem: resistência dos concretos aos 7, 14 e 28 dias.



Fonte: WADA (2010)

A Figura 10 mostra as diferentes colorações dos corpos-de-prova feitos para o estudo de dosagem. O traço mais rico (1:6) apresentou-se mais claro, pois a quantidade de cimento em massa é maior que nos outros traços.

Figura 10 – Corpos-de-prova moldados para estudo de dosagem – traços 1:10, 1:8 e 1:6



Fonte: WADA (2010)

Com as características do concreto já definidas, a partir da resistência característica do concreto definida para estacas que, segundo a NBR 6122 (ABNT, 1996), deve ser de $f_{ck}=18$ MPa. A Tabela 33 apresenta dados referentes à dosagem do traço padrão e as respectivas propriedades deste concreto no estado fresco.

Tabela 33 – Dados referente ao traço padrão

TRAÇO 1:m		1: 7,29
Dados da dosagem	Teor de Argamassa (%)	53
	Consumo de cimento (kg/m ³)	304,5
	Consumo de água (kg/m ³)	175,0
	Consumo de areia (%)	46,55
	Consumo de brita (%)	53,45
	Relação a/c (kg/kg)	0,575
	Consumo de aditivo Superplastificante (% sobre a massa de cimento)	0,4
Propriedades do Concreto Fresco	Temperatura (°C)	25,9
	Ar Incorporado (%)	8,9
	Densidade Aparente (t/m ³)	2,294

Fonte: WADA (2010)

De posse dos dados referentes ao traço padrão, foram moldados 3 corpos-de-prova para cada uma das idades de cura, ou seja, 7, 28, 56 e 120 dias, nas se realizaram os ensaios para a obtenção da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade.

Após realizar ensaios e obter os dados dos traços de concreto convencional, a autora deu início a dosagem do concreto com adição de resíduos de cerâmica vermelha.

A partir dos resultados dos ensaios com o concreto padrão, foram feitas as substituições em massa, do agregado miúdo natural pelo RCV nas quantidades de 20%, 40%, 60% e 80%. Estes traços foram ensaiados visando a obtenção de um teor ótimo de substituição, com o qual foram confeccionadas estacas apiloadas de comprimento $L = 4,5$ m e mini-estacas de $L = 1,0$ m. A Figura 11 mostra as diferentes colorações dos corpos-de-prova confeccionados com os RCV, que vão de 0% (concreto padrão) a 80% de substituição, respectivamente.

Figura 11 – Coloração dos corpos-de-prova com diferentes teores de substituição



Fonte: WADA (2010)

Primeiramente foram apresentadas as etapas dos ensaios do concreto fresco.

Conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), a partir do slump test, a autora verificou as consistências dos concretos. O abatimento fixado foi de 170 ± 20 mm para os traços, pois a principal característica destes concretos era a alta plasticidade, para que o concreto fosse apenas lançado, na confecção das estacas, sem a necessidade de vibração. Na Figura 12 a autora apresenta o momento da realização de um dos ensaios.

Figura 12 – Ensaio de abatimento (Slump test)



Fonte: WADA (2010)

Para determinar a quantidade de ar incorporado ao concreto fresco, segundo a NBR NM 47 (ABNT, 2002), utilizou-se um aparelho medidor, do tipo de pressão.

De acordo com a NBR 9833 (ABNT, 1987), foi realizado o ensaio de massa específica que se utiliza de uma balança e um recipiente metálico específico para este ensaio.

A Tabela 34 apresenta os resultados dos ensaios com os concretos no estado fresco.

Tabela 34 – Resultados dos ensaios com concreto fresco

TRAÇOS	AR INCORPORADO - Lb/in ² (%)	MASSA - Kg	TEMPERATURA - °C
PADRÃO	12,5 (8,9)	22,94	25,9
20% RESÍDUO	13,5 (7,3)	23,24	25,6
40% RESÍDUO	14,0 (6,6)	23,70	26,3
60% RESÍDUO	13,5 (7,3)	22,73	28,1
80% RESÍDUO	17,0 (2,9)	23,49	28,3

Fonte: WADA (2010)

Após os ensaios com os concretos ainda frescos, três corpos-de-prova foram moldados (para cada idade) e, decorridas 24 horas, estes foram retirados das fôrmas e submetidos à cura em câmara úmida. A Figura 13 mostra os corpos-de-prova moldados e em cura na câmara úmida.

Figura 13 – Moldagem dos corpos-de-prova e câmara úmida



Fonte: WADA (2010)

Com o concreto já no estado endurecido, a cada idade de ruptura (7, 28, 56 e 120 dias), três corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de compressão simples com determinação do módulo de elasticidade. Mas anteriormente a estes

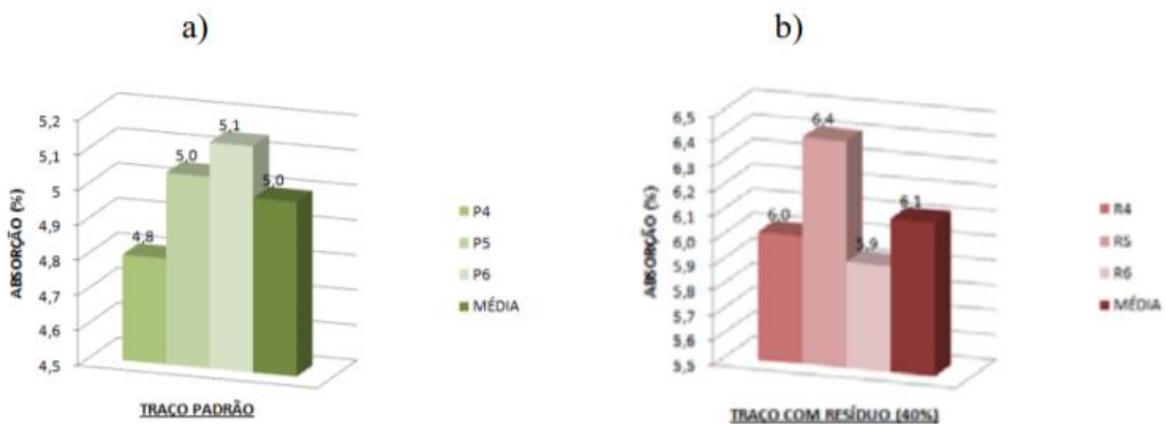
ensaios, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre de alta resistência, a fim de tornar suas faces planas e paralelas, essenciais para a realização dos ensaios.

A autora realizou o ensaio de compressão simples segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 1994). As idades do ensaio, como já citadas anteriormente, foram de 7, 28, 56 e 120 dias, após a cura em câmara úmida.

O módulo de elasticidade foi obtido aos 28 dias de idade para cada traço de substituição, atendendo às recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2003).

Seguindo a NBR 9778 (ABNT, 1987), foi realizado ensaio de absorção por imersão, no Laboratório de Engenharia Civil da UNESP, em corpos-de-prova com traço padrão e com o teor de substituição de 40%. O concreto foi apenas lançado dentro das fôrmas, sem auxílio de vibração. Isto se deveu ao fato de que as estacas de campo também seriam feitas apenas com o concreto lançado. Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 22 a seguir.

Gráfico 22 – Resultados de absorção (a) do traço padrão e (b) do traço com teor de substituição 40%.



Fonte: WADA (2010)

Foram realizados processos de cura em câmara úmida e também em condições de campo. Na câmara úmida foram curados corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20 cm² e para a cura em condições de campo foram confeccionadas três mini-estacas, as quais foram curadas no próprio local em que foram confeccionadas, ou seja, no Campo Experimental de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira.

Patrycia Wada surgiu com a ideia de se avaliar a cura em mini-estacas, pois representam uma boa simulação das condições reais de utilização em campo. Três

mini-estacas com 10 cm de diâmetro e 1,0 m de comprimento foram confeccionadas. A abertura no solo foi feita com um trado manual e logo após foi lançado o concreto com teor de substituição de 40%. O sistema de cura das mini-estacas foi o mesmo empregado nas condições de obra, ou seja, com molhagens sucessivas nos primeiros sete dias, seguida de pelo menos três molhagens após este período, até idade de 28 dias. A confecção das mini-estacas foi importante para a obtenção de informações sobre a resistência do material ao longo do tempo até atingir 60 dias, tempo de cura das estacas apiloadas de 4,50 m. A cada idade de ruptura (7, 28 e 56 dias), uma mini-estaca era retirada do campo experimental e ensaiada. De cada mini-estaca, foram retiradas três amostras, as quais foram preparadas para ficar com dimensões finais de 10 x 20 cm², iguais às dos corpos-de-prova cilíndricos. Os ensaios de compressão simples foram realizados aos 7, 28 e 56 dias e os de módulo de elasticidade, aos 28 dias. A Figura 14 apresenta as etapas de confecção das mini-estacas e as três mini-estacas já prontas no campo experimental. Uma das mini-estacas retiradas do campo é mostrada na Figura 15.

Figura 14 – Conclusão da concretagem de uma mini-estaca e em seu processo de cura



Fonte: WADA (2010)

Figura 15 – Mini estaca retirada do campo para ser ensaiada.



Fonte: WADA (2010)

Estas três estacas de concreto com 40% de resíduo foram confeccionadas ($L = 4,5$ m; $D = 0,2$ m) no Campo Experimental da UNESP de Ilha Solteira. Foram submetidas a provas de cargas por meio de carregamento rápido, seguindo-se as prescrições da NBR 12131 (ABNT, 2006). Provas de carga em estacas com essas mesmas dimensões, feitas com concreto simples (sem resíduos) foram executadas por Nacano (2001) neste mesmo Campo Experimental, propiciando uma análise comparativa entre os seus resultados e os obtidos neste trabalho.

4.3.1.4 Desempenho

Após ensaios realizados, Costa e Favini, apresentaram as propriedades que obtiveram do concreto no estado fresco, endurecido, sua absorção por imersão e capilaridade. Os resultados de ensaios realizados no estado fresco, dos concretos em estudo, estão mostrados na Tabela 35.

Tabela 35 – Índices físicos dos concretos estudados

Traço 1:6	Densidade Real (g/cm^3) NBR 7223 [15]	Fator Água-Cimento (a/c) NBR 7223 [15]	Abatimento do Concreto (cm) NBR NM 67 [15]
CTC	1,63	0,55	6,0
CC	2,36	0,58	6,5

Fonte: WADA (2010)

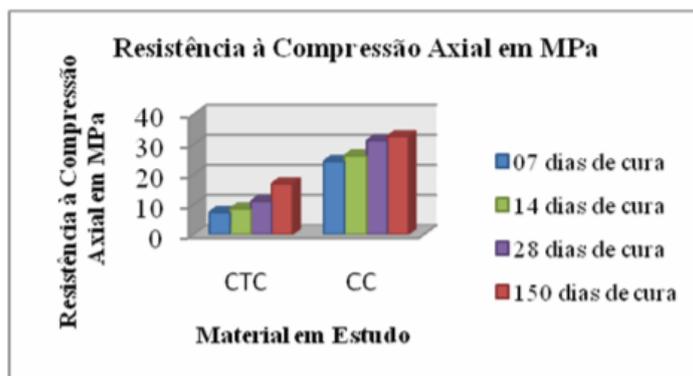
Segundo os autores, Costa e Favini, nas propriedades do concreto no estado endurecido, os ensaios de resistência mecânica à compressão axial e diametral são de fundamental importância para a utilização do concreto em obras, pois determina qual é sua resistência à compressão por tração axial e diametral, determinando assim os locais onde esse concreto pode ser utilizado. Foi realizada a avaliação no estado endurecido tanto do concreto convencional (concreto de referência) quanto do concreto reciclado, de acordo com a NBR 5739 [17] e NBR 7222, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 36 e 37, sendo representados graficamente nas Figuras 16 e 17.

Tabela 36 – Resistência à Compressão Axial dos Concretos em Estudo.

Concreto NBR 5739 [17]	Resistência à Compressão Axial em MPa			
	07 dias	14 dias	28 dias	150 dias
CTC	7,35	8,49	11,03	16,87
CC	24,30	26,18	31,19	32,57

Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Figura 16 - Resistência à compressão axial do concreto de telha de cerâmica e do convencional, em MPa.



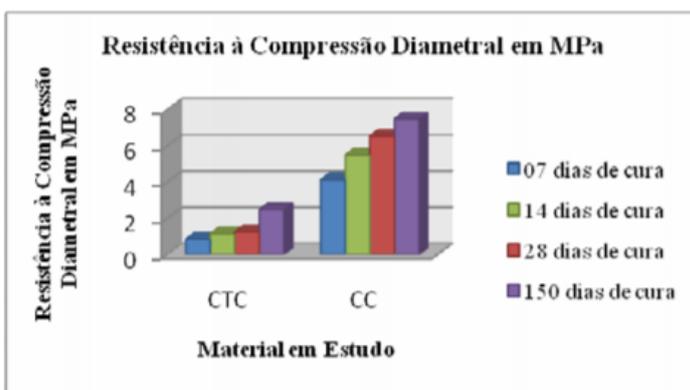
Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Tabela 37– Resistência à compressão diametral dos concretos em estudo.

Concreto NBR 7222 [18]	Resistência à Compressão Diametral em MPa			
	07 dias	14 dias	28 dias	150 dias
CTC	0,84	1,15	1,25	2,48
CC	4,13	5,49	6,54	7,49

Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Figura 17 – Resistência à Compressão Diametral do Concreto de Telha Cerâmica (CTC) e do Concreto Convencional (CC), dados em MPa.



Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Na questão de absorção, os autores ressaltaram que a quantidade de água absorvida pelo concreto no estado endurecido é uma propriedade de grande relevância, visto que esse produto confeccionado apresentando grande absorção de água consiste em um concreto com grande índice de vazios e, conseqüentemente, baixa resistência mecânica, pois após o envelhecimento do concreto, a água evaporada deixará lugares vazios na mistura. Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778. De acordo com a Tabela 38 e a Gráfico 23, verificam-se os resultados da absorção por imersão do concreto reciclado.

Tabela 38 – Absorção por Imersão dos Concretos em Estudo. Dados em %.

Concreto	Absorção por Imersão (%) - NBR		
	07 dias	14 dias	28 dias
CTC	9,84	9,27	4,59

Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Gráfico 23 – Absorção por Imersão do Concreto de Telha Cerâmica Vermelha (CTC). Dados em %.



Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

No caso da absorção por capilaridade, que indica a quantidade de água absorvida pelos vasos capilares do concreto é um fator que deve ser conhecido por quem o utiliza, pois define a possibilidade de umidade ascendente no concreto. Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9779. Os resultados da absorção por capilaridade do concreto de telha cerâmica (CTC) encontram-se na Tabela 39 e na Gráfico 24.

Tabela 39 – Absorção por Imersão dos Concretos em Estudo. Dados em g/cm².

Concreto	Absorção por Capilaridade (g/cm ²) - NBR		
	07 dias	14 dias	28 dias
CTC	0,842	0,500	0,210

Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Gráfico 24 – Absorção por Capilaridade do Concreto de Telha Cerâmica Vermelha (CTC). Dados em g/cm².



Fonte: COSTA E FAVINI (2008)

Os resultados dos ensaios mostram que a resistência à compressão do concreto reciclado foi menor que a do concreto convencional em todas as idades por apresentar uma alta absorção de água e índice de vazios, diminuindo assim sua resistência mecânica. Apesar desses resultados obtidos, o concreto de telha cerâmica vermelha apresentou boas propriedades químicas, não apresentando reatividade potencial. “Considerando que o concreto reciclado está em sua pior situação, pois este é 100% reciclado, conclui-se que qualquer porcentagem de agregado natural acrescentado em sua confecção, aumentará a resistência à tração por compressão axial e diametral do concreto produzido” (FAVINI, A.C., COSTA, J.S.) 2008. A absorção por imersão do concreto reciclado apresentou um resultado alto, porém, dentro do permitido pelas NBR’s da ABNT. Os vasos capilares do concreto absorveram em média cinco centímetros de altura, significando que o produto apresenta tendências de umidade ascendente, sendo necessário haver impermeabilização. Portanto, o concreto produzido com agregado de rejeito de telha cerâmica vermelha com mais de 50 anos de uso pode ser utilizado na construção civil, lembrando que o mesmo não apresenta função estrutural, e deve ser utilizado em locais onde não exijam grandes esforços mecânicos, como, por exemplo, em calçadas e em lastros de concreto magro em edificações térreas.

A seguir, estão apresentados os resultados dos ensaios feitos nas estacas no trabalho de Wada (2010), Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas *In Loco*.

Após as análises em laboratório, ensaios de caracterização dos materiais e estudo de dosagem, chegou-se a um teor de substituição ótimo de 40% de adição de resíduo. Com estes materiais, foram feitas três estacas de concreto com o teor de substituição ótimo de resíduo de cerâmica. A abertura dos furos foi feita com auxílio de um bate-estaca, utilizando-se um pilão com peso de 5,0 kN. Após o término da execução dos furos, antes de se iniciar a concretagem, foi colocado no fundo de cada furo um elemento de isopor com diâmetro também de 20 cm e espessura de 50 mm. O objetivo da colocação deste elemento de isopor foi o de eliminar a resistência de ponta no início das provas de carga, obtendo-se assim leituras apenas do atrito lateral.

Após a abertura dos furos, iniciou-se o lançamento do concreto. Foram colocadas armaduras de espera com 1,0 m comprimento, formadas por quatro barras de 8,0 mm, para a fixação dos blocos de coroamento, com dimensões de 40 x 40 x 20 cm³, como mostram a Figura 18.

Figura 18 – Momento final da concretagem de uma das estacas.



Fonte: WADA (2010)

Após sete dias de cura, foram confeccionados os blocos de coroamento com 40 x 40 x 20 cm². A Figura 19 mostra o momento da realização da concretagem de um dos blocos e o bloco já concluído.

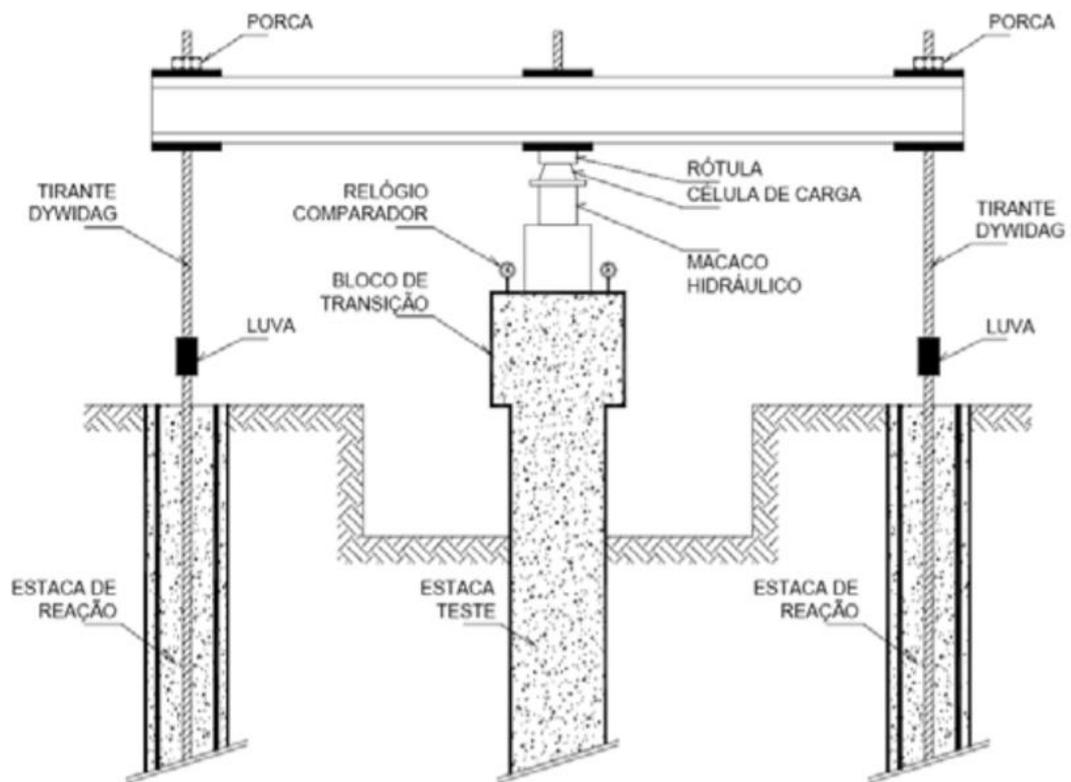
Figura 19 – Concretagem de um dos blocos e conclusão da execução de um dos blocos.



Fonte: WADA (2010)

Na realização das provas de carga, o sistema de reação utilizado foi o do tipo ação/reação, sendo que a aplicação da carga foi feita por intermédio de um conjunto macaco hidráulico e bomba, os quais foram instalados entre a viga de reação e o bloco de transição das estacas. A ancoragem entre a viga de reação e as estacas de reação foi feita por intermédio de peças especiais - porcas, placas, luvas e tirantes Dywidag - em aço especial ST-85/105. As estacas foram ensaiadas após 60 dias de sua confecção. A Figura 20 mostra o esquema de ensaio utilizado na realização das provas de carga.

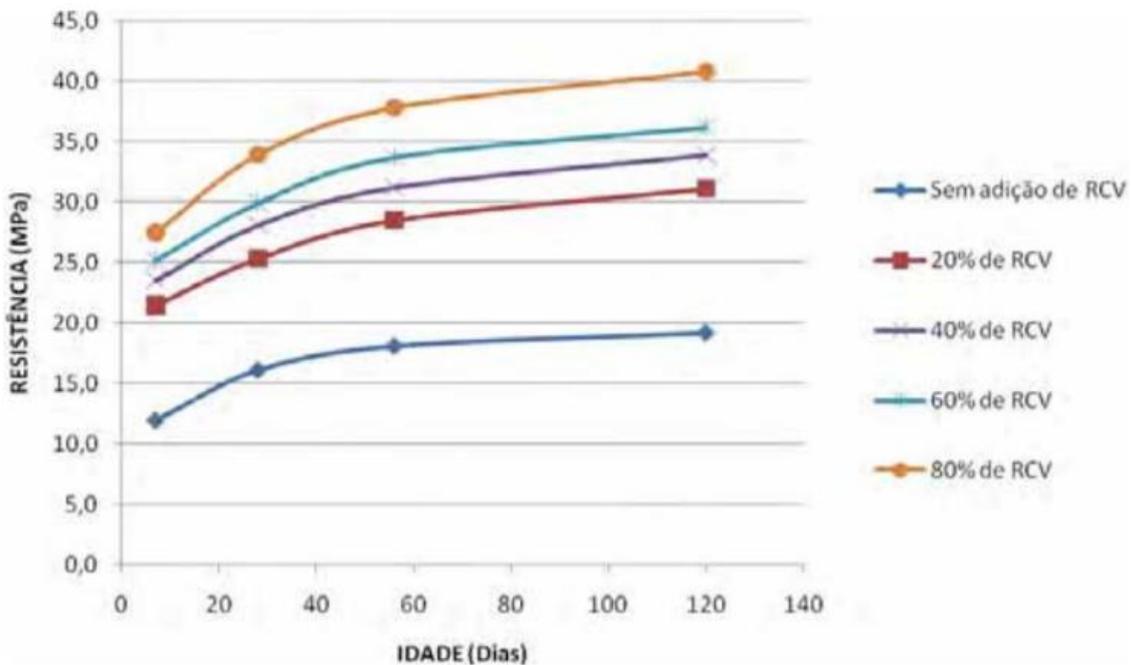
Figura 20 – Esquema de ensaio (prova de carga)



Fonte: WADA (2010)

Após todo o processo do ensaio, a autora chegou nos resultados de resistência a compressão representados no Gráfico 25 abaixo.

Gráfico 25 – Resultados das resistências de tração aos 7, 28, 56 e 120 dias.



Fonte: WADA (2010)

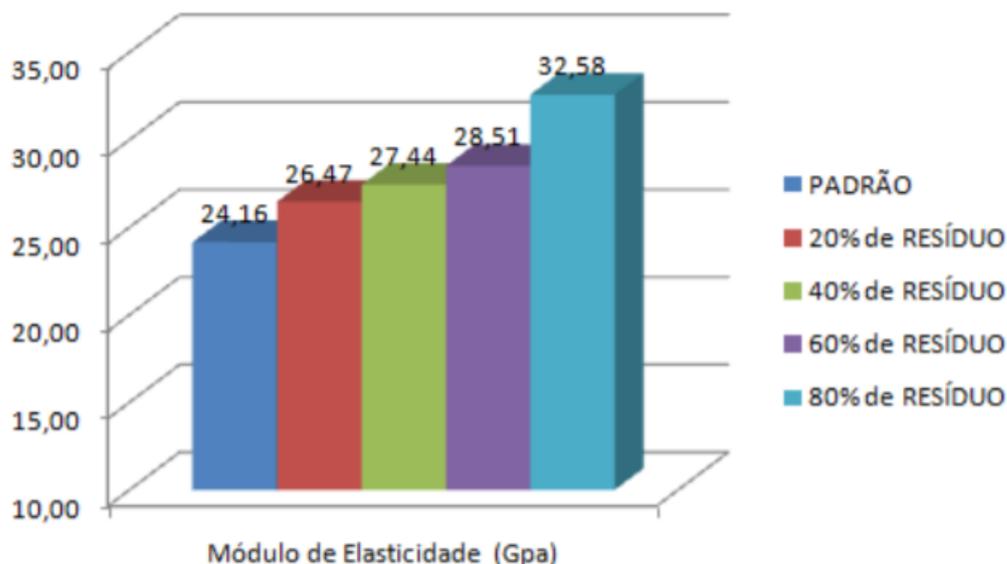
Pode-se observar pelos resultados encontrados por Wada que a adição dos RCV foi bastante positiva, promovendo aumentos substanciais de resistência em função da quantidade de resíduo adicionada. Estes resultados sinalizaram a possibilidade de o RCV possuir propriedades cimentícia, conforme já observado por outros pesquisadores. Aos 28 dias, com 80% de RCV, obteve-se resistência próxima a 35MPa, ou seja, praticamente o dobro do valor obtido com para o concreto de referência. Este aspecto é muito importante, pois o aumento da resistência implica também numa possível melhoria das outras propriedades do concreto, como aumento do módulo de elasticidade, resistência à tração, impermeabilidade e durabilidade, entre outras.

A autora ressalta que na maioria dos casos, a utilização de resíduo de cerâmica como agregado, melhora as propriedades físicas do concreto, como ocorrido neste trabalho. Em outros casos, devem ser feitas análises e ensaios específicos para caracterização e dosagem dos materiais.

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica. O módulo de elasticidade do concreto, diferentemente dos metais, varia em função das matérias-primas utilizadas e de sua resistência mecânica. No caso do concreto, o cimento hidratado não tem sempre a mesma estrutura, pois é formado por cristais de diferentes espécies. Além disso, a microestrutura da zona de transição (pasta-agregado) afeta o módulo de elasticidade (AGUILAR; SILVA; CORRÊA; CETLIN, 2006).

Foram feitos ensaios de módulo de elasticidade para todos os traços em estudo aos 28 dias. As médias dos resultados de cada traço são apresentadas na Gráfico 26.

Gráfico 26 – Médias dos resultados dos módulos de elasticidade para cada traço.



Fonte: WADA (2010)

Como esperado pela autora, os valores de módulo de elasticidade aumentaram com o aumento do teor de substituição de agregado miúdo natural por RCV.

Com base nas análises dos resultados de vários ensaios, chegou-se ao teor de ótimo de 40% de RCV em substituição à areia. Como pode ser visto nos gráficos, os resultados para o teor de substituição de 80% são os maiores, tanto para a resistência quanto para o módulo de elasticidade. O mesmo apresentou menor quantidade de ar incorporado. Mas o teor de substituição considerado ótimo foi o de 40%, pois aos 28

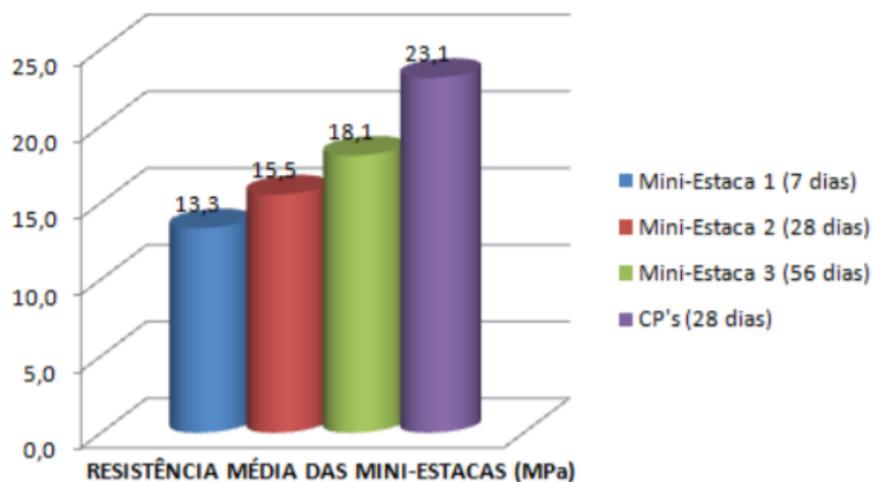
dias de idade já apresentava a resistência característica requerida para estacas ($f_{ck}=18$ MPa). Apresentou também módulo de elasticidade compatível para concretos. Com exceção do teor de 80% que foi o traço que apresentou menor quantidade de ar incorporado. O fator imprescindível para esta definição foi que, para o slump de 170 ± 20 mm, o traço com teor de 40% requereu uma quantia de superplastificante de 0,8%, dentro dos limites indicados pelo fabricante. Já o traço com teor de 80% demandou uma quantia muito acima do limite, aumentando, assim, seu custo.

Agora será abordado os resultados que a autora obteve das três estacas produzidas.

Com o traço de concreto com 40% de substituição, foram confeccionadas três miniestacas, como mencionado anteriormente, de 10 cm de diâmetro e 1,0 m de comprimento, três corpos-de-prova curados em câmara úmida e três estacas com 20 cm de diâmetro e 4,5 m de comprimento.

A Gráfico 27 apresenta os resultados das médias das resistências dos corpos-de-prova extraídos das mini-estacas e dos três corpos-de-prova confeccionados com o mesmo traço de concreto das estacas.

Gráfico 27 – Média das resistências à compressão dos corpos-de-prova extraídos das mini-estacas.



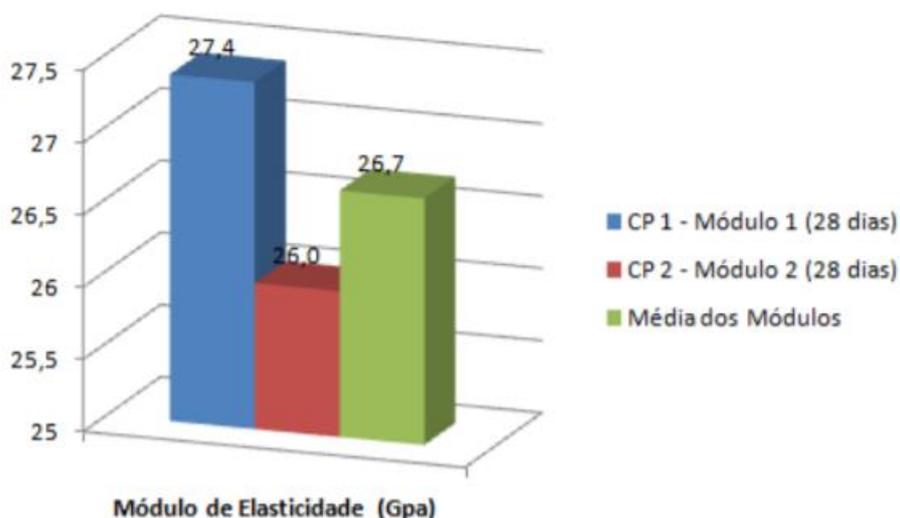
Fonte: WADA (2010)

A mini-estaca 3, ensaiada aos 56 dias, apresentou valor de resistência à compressão próximo de 18,0 MPa, valor este necessário para utilização nas estacas

em estudo. Aos 28 dias houve uma diferença de 7,6 MPa, entre a resistência da estaca 2 e dos corpos-de-prova, confeccionados na mesma data e com mesmo material. Um aumento de 49% na resistência. Esta diferença pode ser devida ao modo como estes foram confeccionados. O material das mini-estacas foi apenas lançado, sem auxílio de vibração para o adensamento. Os corpos-de-prova foram adensados em mesa vibratória e curados em câmara úmida.

A Gráfico 28 mostra o gráfico com os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade feitos em corpos-de-prova com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento.

Gráfico 28 – Módulo de elasticidade em corpos-de-prova com 40% de RCV.



Fonte: WADA (2010)

O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foi realizado somente com os corpos-de-prova 10x20 cm² curados em câmara úmida. Já as amostras extraídas das miniestacas não apresentaram uma regularidade dimensional que propiciasse a realização do ensaio com os equipamentos disponíveis.

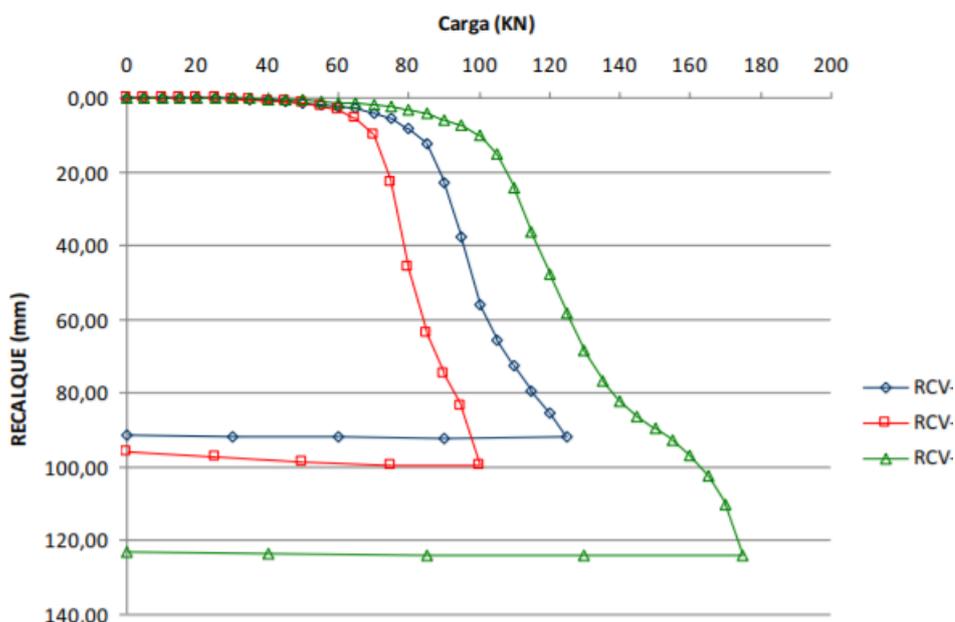
Como mostrado no tópico anterior, o traço padrão apresentou uma média de absorção de 5% e o traço com 40% de resíduo apresentou uma média de 6,1%, uma diferença de 1,1%. Porém, com relação ao traço padrão, o traço com resíduo apresentou um aumento de cerca de 20%. Desta forma, o ensaio demonstrou o alto índice de absorção do resíduo cerâmico.

O índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento aos 28 dias, em relação à argamassa de referência, foi de 48,15%. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), este índice deve ser no mínimo de 75 %, ou seja, o material avaliado não atendeu a

esta exigência da norma para ser considerado pozolânico. Isto se deve ao fato de que, como já citado por Winkler e Müller (1998), o IAP depende de vários fatores, em especial o modo como foram confeccionadas as peças de cerâmica e da argila utilizada.

Costa e Favini comparam seus resultados com Nacano (2001). Gráfico 29 são apresentadas as três curvas de carga x recalque. Na Tabela 40 estão apresentados os valores obtidos nas provas de carga e na Tabela 41 são mostrados os valores obtidos por Nacano (2001). Na Gráfico 30 são mostradas as curvas obtidas por Nacano (2001).

Gráfico 29 – Carga x recalque das estacas em concreto com RCV.



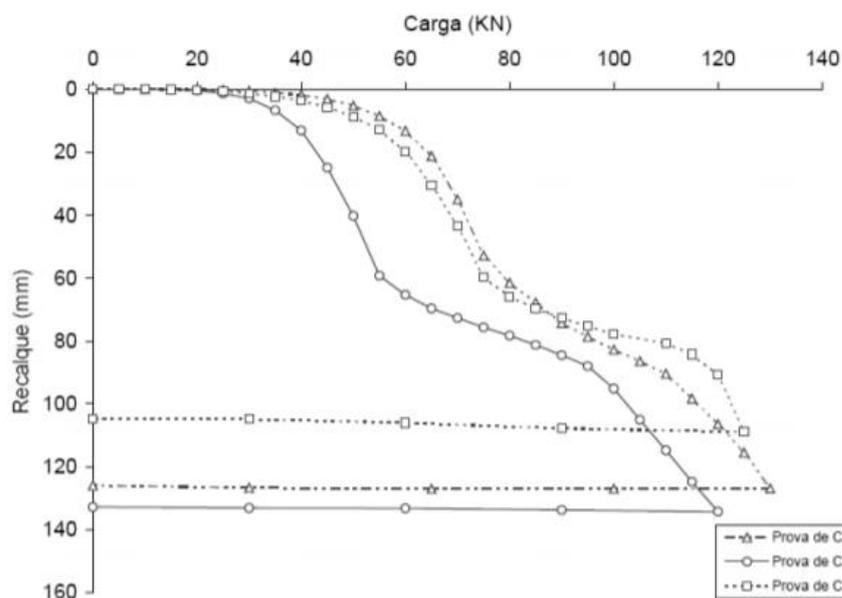
Fonte: WADA (2010)

Tabela 40 – Resultados das resistências dos corpos-de-prova extraídos das mini-estacas e dos CP's confeccionados com o mesmo material.

		Resistências (Mpa)	Médias das Resistências (Mpa)
Estaca 1 (7 dias)	CP1	13,6	
	CP2	12,7	13,3
	CP3	13,7	
Estaca 2 (28 dias)	CP1	15,3	
	CP2	16,8	15,5
	CP3	14,5	
Estaca 3 (56 dias)	CP1	18,5	
	CP2	17,7	18,1
	CP3	18	
CP's (28 dias) (10 X 20 cm)	A1	21,6	
	A2	23,6	23,1
	A3	24,2	

Fonte: WADA (2010)

Gráfico 30 – Carga x recalque das estacas em concreto simples ensaiadas por Nacano (2001).



Fonte: WADA (2010)

Tabela 41 - Resumo das cargas máximas obtidas nas provas de carga em estacas em concreto convencional (CON-1, CON-2 e CON-3) e em estacas com resíduo (RCV-1, RCV-2, RCV-3).

Estaca	$Q_{\text{máx}}$ (kN)	ρ (mm)	$Q_{\text{méd}}$ (kN)	$\rho_{\text{méd}}$ (mm)
RCV-1	125	92,02	133,3	105,2
RCV-2	100	99,75		
RCV-3	175	123,93		
CON-1	130	127,05	125,0	123,4
CON-2	120	134,29		
CON-3	125	108,90		

$Q_{\text{máx}}$: carga máxima de ensaio; ρ : recalque; $Q_{\text{méd}}$: carga média máxima de ensaio; e $\rho_{\text{méd}}$: recalque médio.

Fonte: WADA (2010)

Para finalizar, a Tabela 42 mostra a carga média máxima para estacas com RCV de 133,3 kN e para estacas em concreto convencional de 125,0 kN. Os recalques médios foram de 105,2 mm e 123,4 mm, para estacas com RCV e em concreto convencional, respectivamente.

Tabela 42 - Resultados dos ensaios de absorção com os traços padrão e teor de 40% de RCV.

TRAÇOS	CP's	MASSA SECA (Ms) (g)	MASSA ÁGUA (Mw) (g)	ABSORÇÃO (%)	Média (%)
TRAÇO PADRÃO	P4	3394,2	3557,2	4,8	5,0
	P5	3312,5	3479,7	5,0	
	P6	3277,9	3446,6	5,1	
TRAÇO COM RESÍDUO (40%)	R4	3245,1	3440,3	6,0	6,1
	R5	3252,2	3460,8	6,4	
	R6	3277,7	3472,0	5,9	

Fonte: WADA (2010)

Conclui-se que a resistência e o módulo de elasticidade do concreto aumentaram em função dos acréscimos efetuados nos teores de substituição. Acima de 40% de teor de substituição, o concreto tornou-se inviável, pois houve necessidade de um grande aumento na quantidade de aditivo para se manter o abatimento desejável. Os resultados obtidos permitem concluir que o concreto com RCV apresenta plenas condições de uso na confecção de estacas moldadas *in loco*,

podendo, neste caso ser utilizado com segurança. O RCV não apresentou o índice necessário para ser considerado um material pozolânico, mas sua utilização, em substituição ao agregado miúdo melhorou suas propriedades mecânicas. Isto possivelmente ocorreu devido ao efeito filler do RCV atuando na estrutura do concreto, ocupando os espaços vazios deixados pelas partículas de grãos maiores. Os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade sofreram grande influência devido aos diferentes processos de adensamento e tipos de cura utilizados. A utilização do RCV ocasionou aumento na absorção do concreto, mas não afetou as suas propriedades mecânicas. Para cargas maiores, nas provas de cargas, notou-se que os recalques foram menores para as estacas com RCV. As estacas com RCV manifestaram resistência de atrito lateral para cargas aplicadas nas cabeças, em média, em torno de $103,33 \text{ kN} \div 2,83 \text{ m}^2 \approx 36,5 \text{ kPa}$. As curvas carga x recalque obtidas nas provas de carga realizadas com as estacas em concreto convencional CON e nas com RCV mostram um comportamento bastante similar.

4.3.2 Resíduo de concreto

Na construção civil, os resíduos de concretos são gerados, em grandes quantidades, pelas demolições de estruturas além da execução de novas obras e empreendimentos. Por exemplo, no Brasil estão sendo executadas algumas estradas com pavimento rígido de concreto, que após o intervalo de vida útil é necessário a substituição, sendo que a quantidade de resíduo de concreto gerado neste processo é enorme.

Dos diversos resíduos gerados pela construção civil, os resíduos de concreto são apresentados um potencial elevado de reaproveitamento, visto que além de possuir um índice de contaminação menor por outros elementos, quando se comparado com os demais materiais, contêm propriedades básicas conhecidas.

Os principais agentes geradores, de resíduos de concreto, são as usinas de concreto pré-misturado, as demolições de construções e de pavimentos rodoviários de concreto, e as fábricas de pré-moldados.

4.3.2.1 Características do resíduo

As empresas de serviços de concretagem, ou centrais dosadoras de concreto (CDC) são as principais fontes de concreto residual e, de acordo com Benini, Repette e Concotto (2007), uma das grandes dificuldades encaradas pela indústria produtora de concreto é o impacto ambiental que a sua fabricação causa, especialmente com relação à enorme quantia de resíduos gerados. Os autores citaram, ainda, que as três principais origens de resíduos nas CDCs são: a lavagem do pátio da central, a lavagem interna do balão do caminhão betoneira ao final do dia de trabalho, e a devolução de concretos frescos que não foram empregados nas obras. Quando o concreto não é reutilizado no estado fresco, acaba gerando resíduos do lodo de decantação da limpeza e de concreto endurecido. Empregados no controle da produção, soma-se o volume, de resíduo gerado de corpos-de-prova ensaiados.

Segundo Dal Molin (2005 apud BENETTI 2012), uma das condições limitantes para o emprego dos agregados de resíduos da construção e demolição é a característica dos mesmos. Entre estas propriedades, no concreto reciclado, destacam-se a alta porosidade e diferenças de forma e textura superficial. Desta forma, o seu desempenho no concreto perante as deformações pode ser variável (LEITE, 2001).

Os agregados derivados de concreto reciclado são formados de agregados naturais e argamassa aderida, logo, as propriedades físicas deste material dependem tanto da quantidade desta argamassa quanto da qualidade (ETXEBERRIA et al., 2007 apud BENETTI 2012). Além do que, a argamassa é altamente porosa e faz com que a porosidade dos ARC seja ainda maior que a de agregados convencionais.

Outra característica significativa dos agregados reciclados, que se diverge dos agregados convencionais, é a massa específica, que geralmente é menor nos reciclados. O estudo de Zega, Zaccardi e Maio (2010) confirma esta declaração, pois os mesmos descobriram valores entre 2,48 e 3,03 Kg/dm³ para agregados naturais, e entre 2,37 e 2,66 kg/dm³ para agregados reciclados de concreto.

As características do ARC são decorrentes das propriedades do concreto que lhe deu origem e do tipo de beneficiamento escolhido. O beneficiamento do ARC é um procedimento que compreende diversas fases, tais como a forma de coleta, o

transporte, a classificação do resíduo, a britagem, o peneiramento, entre outras. Beneficiar o ARC implica na utilização de um co-produto com menor heterogeneidade, o que estima esta opção. Segundo Leite (2001), a classificação do resíduo deve ser feita o mais rápido possível, de preferência no decorrer do processo de demolição. Todavia, mesmo trabalhando-se apenas com ARC, o agregado ainda se compõe em um material heterogêneo. Em um mesmo concreto, é possível ter, agregados derivados de concretos de diversas idades, que passaram por diferentes processos de cura, além de composições variadas. Katz (2003) britou concretos com um, três e vinte e oito dias de idade e constatou que as características, tais como densidade, massa específica e absorção dos agregados resultantes, foram bem semelhantes, mas que, entretanto, as propriedades do agregado de concreto britado com três dias foram melhores que os demais.

4.3.2.2 Aplicações

Os resíduos de concreto possuem um dos mais elevados potenciais de utilização, dentre os vários resíduos da construção civil, visto que suas propriedades básicas são conhecidas e, especialmente, ao seu menor grau de contaminação por outros materiais quando comparado com diversos resíduos.

Visando à preservação das reservas de matérias primas a reutilização dos resíduos é fundamental, além das vantagens de caráter econômico e ambiental. Em alguns países da Europa, a escassez de matéria prima, provoca até na importação de resíduos de outros países para fabricação de agregado. Além de que, as restrições ambientais aumentam o custo ou impossibilitam os processos extrativos minerais, bem como a deposição final dos resíduos gerados por construções e reformas viárias. Apesar da disponibilidade de agregado primário, na América do Norte, as distâncias de transporte são expressivas, aliadas à escassez de áreas adequadas para deposição ou o seu alto valor (COELHO, 2000).

As pesquisas envolvendo agregados reciclados são unânimes em assegurar a ampla aplicabilidade do material, principalmente, o agregado graúdo reciclado, em aplicações não-estruturais e estruturais. Uma das limitações para a emprego dos agregados reciclados se refere à existência de poucas regulamentações normativas tratando do material.

4.3.2.3 Dosagem

Segundo estudo de Buttler (2003) sobre concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados, apresenta a composição dos agregados na Tabela 43.

Tabela 43 - Composições de agregados nas dosagens dos concretos (GONÇALVES, 2000).

Dosagem	Composição
1 (concreto natural – referência)	Agregado miúdo – natural Agregado graúdo – natural – brita 1
2	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado
3	Agregado miúdo – 50% de areia + 50% de agregado miúdo reciclado Agregado graúdo – Agregado reciclado
4	Agregado miúdo – 50% de areia + 50% de agregado miúdo reciclado Agregado graúdo – Agregado natural – brita 1

Fonte: Buttler (2003, p. 52)

4.3.2.4 Desempenho

O pesquisador Buttler (2003) analisou as propriedades dos agregados reciclados e dos concretos reciclados no estado fresco e endurecido. Avaliou os resultados, obteve os seguintes entendimentos:

- As características dos agregados reciclados são muito influenciadas pelas propriedades do resíduo de concreto, ou seja, a qualidade do concreto original.
- Os agregados naturais possuem um valor de massa específica maior que a dos agregados reciclados, e uma absorção de água menor.
- Diferentemente do valor do módulo de elasticidade que têm uma diminuição

considerável, a resistência à compressão é pouco influenciada pelos agregados reciclados.

- A fração miúda reciclada tem uma influência significativa nas propriedades do concreto, especialmente na redução do módulo de elasticidade.

AJDUKIEWICZ & KLISZCZEWICZ (2002) estudaram resíduos de concretos provenientes de estruturas confeccionadas com concreto de média e alta resistência. Tais concretos apresentavam resistências variando de 40MPa a 70MPa e caracterizavam-se por apresentar um elevado consumo de cimento. Segundo os autores, no Leste Europeu está ocorrendo um programa intensivo de modernização e reconstrução de rodovias e pontes desde o início da década de 90. Devido a isso, está sendo gerada uma grande quantidade de resíduos provenientes de estruturas de concreto armado e protendido os quais, apresentam um grande potencial para ser reutilizado como agregados. Acredita-se que os agregados reciclados provenientes de concretos com elevado consumo de cimento possuam propriedades aglomerantes, esse fato pode ser importante do ponto de vista econômico devido à redução no consumo de cimento.

Os pesquisadores utilizaram agregados reciclados provenientes de seis estruturas distintas. As estruturas foram demolidas com dois, cinco ou sete anos de idade, sendo que em cinco delas foram utilizados agregados graníticos e em apenas uma o agregado basáltico. Os agregados reciclados foram utilizados cerca de dois a três meses após a britagem.

Os concretos com agregados graúdos reciclados que foram provenientes de resíduos de concreto com resistência superior a 60MPa e alto consumo de cimento (550kg/m^3), apresentaram valores de resistência à compressão superior aos obtidos para o concreto com agregados naturais e valores praticamente similares com relação ao módulo de elasticidade. Com relação à retração por secagem, os pesquisadores notaram a influência significativa dos agregados reciclados. A retração dos concretos reciclados é cerca de 35 a 45% maior do que a retração dos concretos com agregados naturais. Para a fluência foram observados valores até 20% menores para o concreto com agregados reciclados se comparado com o concreto de referência. De maneira geral, o efeito conjunto da fluência e da retração é ligeiramente maior para o concreto reciclado se comparado com o concreto de agregados naturais.

Os resultados obtidos pelos mesmos pesquisadores evidenciam que as propriedades dos resíduos de concreto têm influência significativa nas propriedades mecânicas do concreto com agregados graúdos reciclados, sendo possível obter concretos reciclados com resistência superior ao concreto com agregados naturais.

KREZEL & McMANUS (2002) desenvolveram barreiras acústicas feitas com concreto reciclado. Nas dosagens utilizou-se apenas a fração graúda reciclada uma vez que todas se distinguem por exibirem carência da fração miúda visando fornecer um concreto com duas camadas diferentes; uma delas com alta porosidade buscando conferir propriedades de absorção sonora e reflexão das demais ondas sonoras e outra camada sólida com baixa porosidade proporcionando suporte estrutural e rigidez ao painel acústico. De modo geral, os resultados encontrados pelos pesquisadores foram bastante satisfatórios admitindo a aplicação de resíduos de concreto para a fabricação de barreiras acústicas. Na Figura 21, observa-se um dos painéis acústicos produzidos.

Figura 21 – Painel acústico confeccionado com concreto reciclado



Fonte: Buttler (2003, p. 55)

PADMINI et al. (2002 apud BUTTLER 2003) classificaram pontos relativos à

durabilidade do concreto reciclado; para isso, definiram-se propriedades referente à permeabilidade do material (volume de poros permeáveis e absorção - vazios). Os agregados reciclados foram originados de concretos com agregados naturais que apontam resistências variadas, na Tabela 44 podem ser verificada as propriedades físicas dos agregados reciclados e do agregado natural.

Tabela 44 - Propriedades físicas dos agregados reciclados e do agregado natural.

Agregado	Resistência do concreto original (MPa)	Dimensão máxima do agregado (mm)	Massa especif. (kg/dm ³)	Absorção (%)	Massa Unitária (kg/m ³)	
					Solto	Compactado
Agregado natural granítico		10	2,8	0,3	1408	1561
		20	2,8	0,3	1462	1625
		40	2,8	0,3	1406	1590
Reciclado	35	10	2,46	4,6	1338	1468
	49		2,40	4,8	1327	1438
	56		2,38	5,0	1324	1427
	37	20	2,52	3,65	1432	1568
	50		2,51	4,1	1421	1536
	58		2,48	4,86	1394	1498
	31	40	2,56	2,2	1341	1480
	45		2,53	2,5	1334	1474
	52		2,52	2,8	1329	1470

Fonte: Buttler (2003, p. 56)

Após a produção dos concretos usando os agregados graúdos fornecidos na Tabela 44, os pesquisadores avaliaram diferentes características e suas associações. As discussões fundamentais são descritas abaixo:

- Para uma determinada resistência, o volume de vazios dos concretos reciclados é menor quando igualado com o concreto natural. Este desempenho é conferido a menor relação água/cimento usada para o concreto reciclado para que seja atingida uma resistência semelhante à alcançada para o concreto natural. Assim sendo para uma dada trabalhabilidade, uma menor relação água/cimento provém num maior consumo de cimento para o concreto reciclado acarretando um menor índice de vazios.
- A qualidade do agregado reciclado tem pouca influência na variação do volume

de vazios.

- Para uma resistência estabelecida, um agregado com maior dimensão máxima produz uma redução na absorção de água do concreto reciclado.
- Embora o agregado reciclado mostre uma absorção de água significativamente maior àquela alcançada pelo agregado natural, às diferenças localizadas entre a absorção de água do concreto natural e do concreto reciclado foram bem pequenas. Para uma certa resistência, o concreto reciclado necessita uma menor relação água/cimento e, portanto, um maior consumo de cimento quando igualado com o concreto de referência; deste modo, haverá a desenvolvimento de uma nova matriz que mostrará menor permeabilidade por causa desse consumo de cimento e, que acarretará a resultados aproximadamente semelhantes entre a absorção do concreto reciclado e o natural.
- A absorção de água do concreto é maior para concretos produzidos com agregados de resíduos de resistência elevada. Devido a maior quantidade de argamassa aderida a esses agregados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do estudo realizado verificou-se que alguns resíduos incorporados ao concreto além de apresentar resultados satisfatórios, preservam o meio ambiente diminuindo a quantidade de resíduos depositados em aterros e a utilização de recursos naturais. Apesar de apresentar um desempenho eficiente é necessário verificar aplicação do concreto reciclado.

Evidenciou-se, durante a execução deste trabalho, que é possível incorporar ao concreto convencional diversos tipos de resíduos sólidos, dependendo da sua classificação segundo a NBR 100004 (ABNT, 2005). Podendo se destacar a escória, casca de cerâmica, cerâmica vermelha e o próprio resíduo de concreto.

Dentre os resíduos escolhido, a escória e a casca de cerâmica apresentam propriedades pozolânicas, sendo que a reatividade desse tipo de material é de fundamental importância para a melhoria de propriedades mecânicas em argamassas e concretos. Já a cerâmica vermelha é composta por argila, material de baixa granulometria, que apresenta plasticidade quando umedecida. Enquanto o resíduo de concreto é um dos melhores resíduos para incorporação em traços de concreto convencional, devido a compreensão das suas características primárias, principalmente pelo grau baixo de contaminação se comparado com outros resíduos.

Nos concretos com adição de casca de cerâmica como agregado, foi possível verificar que para apresentar resultados satisfatórios o fator água cimento foi maior que o traço de referência. Enquanto que os concretos com adição de resíduos de concreto são muito influenciados pelas características do resíduo, ou seja, a qualidade do concreto original, sendo que os agregados reciclados possuem um valor de massa específica menor que a dos materiais naturais, e uma absorção de água maior já a resistência à compressão é pouco influenciada pelos agregados reciclados, diferentemente do valor do módulo de elasticidade que têm uma diminuição considerável. Para os concretos com adição de escória concluiu-se que em relação a compressão, a substituição de 35% em parte do cimento ou argamassa mostrou resultados compatíveis as resistências convencionais de referência correntemente

empregados na construção civil. Já a incorporação de escória de cobre como parte do agregado miúdo proporcionou um melhor desempenho do concreto, quanto as propriedades mecânicas, com um volume máximo de 40%. Dessa forma, a utilização de escória de cobre como agregado miúdo para concreto apresenta-se como uma grande alternativa, não só pelas vantagens técnicas, mas pela redução do impacto ambiental provocado pela escassez e exploração descontrolada de areia. Nos concretos com adição de cerâmica vermelha, para a incorporação nas estacas *in loco*, o teor de substituição de adequado seria também de 40%, pois acima disso o concreto se tornou inviável. O concreto com RCV oferece boas condições de uso na produção de estacas *in loco*, podendo ser utilizada com segurança. Já no estudo de Costa e Favini, a substituição de rejeitos de telhas de cerâmica de 50 anos como agregado alternativo mostrou uma resistência menor à compressão do que o concreto convencional em todas as idades, mas independente disso, podem ser usados na construção civil, sem função estrutural, em locais onde não exijam grandes esforços mecânicos.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para estudos futuros tem-se:

- Estudo da aplicação de outros tipos de resíduos em concreto para realização do mesmo estudo;
- Influência da variação de dosagem dos resíduos;
- Realizar um levantamento de custos para o processo convencional e o processo com a incorporação de cada resíduo incorporado no concreto;
- Avaliar parâmetros característicos para os produtos que podem ser produzidos a partir do concreto reciclado e se estes se enquadram nas normas em cada caso específico.
- Realizar ensaio de laboratório dos resíduos abordados neste trabalho, avaliando características físicas e mecânicas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: cimento portland resistente a sulfatos: especificação. Rio de Janeiro. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996. 33 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. 3. ed. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade, de deformação e da curva de tensão/deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman, Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa de concreto endurecido: determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica; especificação. Rio de Janeiro, 1987b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: concreto fresco: determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12131**: estacas: prova de carga estática – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: cimento portland composto: especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653** (ABNT/1992),

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895** (ABNT, 2010).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregado miúdo: determinação do material fino que passa na peneira de 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: determinação do teor de ar em concreto fresco: método pressométrico; procedimento. Rio de Janeiro, 2002. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: agregado miúdo: determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: Determinação de massa específica e massa

específica aparente. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa

específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003d.

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

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

BARROS, Paulo. **Traço de concreto: a importância do controle de água**. 2016. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/traco-de-concreto-a-importancia-do-controle-de-agua/>>. Acesso em: maio 2020.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; CRUZ, Fabrício Rossi da. **Cimento: diferentes tipos e aplicações**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>>. Acesso em: abr. 2020.

BENETTI, Joana Kirchner. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/4523/joanabenetti.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: set. 2020.

BENETTI, Rafael Kirchner. **Traços de concreto convencional com incorporação de aditivo acelerador de pega: análise da resistência nas primeiras idades**. 2007. Disponível em: <http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/tccs/tcc-titulos/2007/Tracos_de_Concreto_Convencional_com_Incorporacao_de_Aditivo_Acelerador_de_Pega_Analise_da_Resistencia_nas_Primeiras_Idades.pdf>. Acesso em: abr. 2020.

BEUREN, Ilse Maria. **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2003.

BIDONE, F. A. **Resíduos Sólidos Provenientes de Coletas Especiais: eliminação e valorização**. Prosab, 2001.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: maio 2020.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: estudo do reaproveitamento de resíduos de construção civil**. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00178.pdf>>. Acesso em: maio 2020.

BUTTNER, Alexandre Marques. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. Disponível em:

<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06082003-172935/publico/buttler.pdf>>. Acesso em: out. 2020.

CIMENTO.ORG. **Concreto**. 2008. Disponível em: <<https://cimento.org/concreto/>>. Acesso em: abr. 2008.

COSTA, M. L.; COSTA, L. G.; NEVES, M. C. D. A investigação em educação em ciência no contexto da educação especial: algumas considerações sobre as dificuldades da pesquisa bibliográfica. **Revista Benjamin Constant**, Rio de Janeiro, n. 23, p. 35-47, dez. 2007.

COUTO, Carmen *et al.* **Influência da pozolanicidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis**. 2010. Disponível em: <http://www.fumec.br/revistas/construindo/article/view/1728/1097>. Acesso em: 01 out. 2020.

CUSTOMPART.NET. **Fundição de investimento**. Disponível em: <<http://custompartnet.com/wu/investment-casting>>. Acesso em jun. 2020

DIAS, A. M.; SILVA, T. J. V.; POGGIALI, F. S. J. **O concreto sustentável brasileiro**. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/construindo/>>. Acesso em: maio 2020.

FREITAS, Renan Pereira de. **Controle de qualidade em concreto endurecido: ensaios mecânicos**. 2012. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/engenhariacivil/files/2012/10/TFC-FIM.pdf>>. Acesso em: jun. 2020.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GONÇALVES, Jardel Pereira *et al.* **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos contendo escória de cobre como agregado miúdo**. 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rem/v62n2/v62n2a14.pdf>>. Acesso em: out. 2020.

GONÇALVES, Rodrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de resíduos de concreto - um novo material para dosagens estruturais**. 2001. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2001ME_RodrigoDantasCasilloGoncalves.pdf>. Acesso em: set. 2020.

GUEDES, Flaviane Helena. **Reaproveitamento de resíduo de casca de ovo e chamote na produção de material cerâmico para isolamento térmico**. 2014. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/disserta%C3%A7%C3%A3o-completa1.pdf>>. Acesso em: maio 2020.

GUIMARÃES, Laio (tradutor). **A História do Concreto**. 2017. Disponível em: <<https://civilizacaoengenheira.wordpress.com/2017/03/22/a-historia-do-concreto/>>. Acesso em: abr. 2020.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>>. Acesso em: mar. 2020.

HENDRICKS, M. J. **Ceramic Shell Permeability**. In: ANNUAL TECHNICAL MEETING, 38, 1990, Ohio. Proceedings...Ohio: ICI, 1990. Paper n. 8.

ISAIA, Geraldo Cechella. **A Evolução do Concreto Estrutural**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 1. p. 1-56.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto de Cimento Portland**. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf>>. Acesso em: abr. 2020.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/21839/000292768.pdf?sequence=1&is>>. Acesso em: mar. 2020.

MACHADO, Carine Ferreira. **Reutilização da casca cerâmica do processo de fundição por cera perdida, como adição em matrizes cimentícias**. Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, fev. 2013.

MACHADO, Carine Ferreira; MORAVIA, Wagner Guadagnin. **Caracterização do resíduo de casca cerâmica do processo de fundição por cera perdida para emprego como pozolana**. 2012. Disponível em: <https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/56/PDF/13-068.pdf>. Acesso em: set. 2020.

MACHADO, Ioná Macedo Leonardo. **Avaliação microestrutural de cascas cerâmicas utilizadas na produção de moldes para o processo de fundição por cera perdida**. 2005. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/747M.PDF>>. Acesso em: jun. 2020.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestruturas, Propriedades e Materiais**. 3ªEd., São Paulo, Editora Pini, 2008.

MELO, José Roberto de Souza. **A reciclagem de resíduos de cerâmica para utilização no processo de argamassa**. Disponível em: <<http://ppgep.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Dissertacao2017-PPGEP-MP-JoseRobertodeSouzaMelo.pdf>>. Acesso em: mar. 2020.

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

NOVELLI, Rafael Passos. **As vantagens de utilizar concreto sustentável**. Disponível em: <<https://www.novesengenharia.com.br/as-vantagens-de-utilizar-concreto-sustentavel/>>. Acesso em: abr. 2020.

OLIVEIRA, Éder Alves de; FENILLI, Felipe Gustavo. **Estudo de dosagem para determinação de traço de concreto**. 2019. Disponível em: <<https://riuni.unisul.br/handle/12345/7395>>. Acesso em: abr. 2020.

PASSOS, Elisa Kimus Dias. **Avaliação das rotas alternativas de produção de ferro gusa**. 2009. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003483.pdf>>. Acesso em: out. 2020.

PEREIRA, José Almir Rodrigues. **Geração de resíduos industriais e controle ambiental**. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jose_Almir_Pereira/publication/228719448_Geracao_de_residuos_industriais_e_controle_ambiental/links/53d7e6430cf2e38c632dec0b/Geracao-de-residuos-industriais-e-controle-ambiental.pdf>. Acesso em: out. 2020.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. Revisão técnica de Vladimir Antonio Paulon. 12. ed. São Paulo: Globo, 1993.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. Estruturas de Concreto: Capítulo 2. *In: Características do concreto*. São Paulo: USP, 2004. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/Concreto.pdf>>. Acesso em: maio 2020.

PINHEIRO, Libânio M. *et al.* **Estruturas de concreto – capítulo 2. In: Características do concreto**. São Paulo: USP, 2010. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/02%20Concreto.pdf>>. Acesso em: maio 2020.

PEREIRA, José Almir Rodrigues. **Geração de resíduos industriais e controle ambiental**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jose_Almir_Pereira/publication/228719448_Geracao_de_residuos_industriais_e_controle_ambiental/links/53d7e6430cf2e38c632dec0b/Geracao-de-residuos-industriais-e-controle-ambiental.pdf>. Acesso em: abr. 2020.

SANTIS, Bruno Carlos de. **Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do estado de São Paulo**. 2012. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-01022013-153644/publico/brunodissertacaooriginal.pdf?>>. Acesso em: 01 out. 2020.

SANTOS, Ana Amélia Mota Dos. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção**. 2016. Disponível em: <http://www.ppgecea.uefs.br/arquivos/File/dissertacoes/2016/Ana_Amelia_Mota_dos_Santos.pdf>. Acesso em: maio 2020.

TEDESCO, Marina. **Estudo da utilização de resíduo de casca cerâmica de microfusão no concreto em substituição ao agregado graúdo e miúdo natural**.

2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/156789>>. Acesso em: mar. 2020.

TEDESCO, M.; TUBINO, R.M.C. **Proposta de incorporação do resíduo de casca cerâmica em concreto**. 2018. Disponível em: <http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_2_5518_20180808111448.pdf>. Acesso em: mar. 2020.

TERA. **Como realizar a caracterização e classificação de resíduos sólidos**. 2019. Disponível em: <<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/como-realizar-a-caracterizacao-e-classificacao-de-residuos-solidos>>. Acesso em: maio. 2020.

TESSARO, Alessandra Buss *et al.* **Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS**. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ac/v12n2/08.pdf>. Acesso em: out. 2020.

WADA, Patrycia Hanna. **Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas *In Loco***. 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91448/wada_ph_me_ilha.pdf;jsessionid=55E1681F0E4C443CB27C68DD17D50621?sequence=1>. Acesso em: out. 2020.