

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - Mestrado

VINÍCIUS ISSAMU WATANABE HIROTOMI

**ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS**

MARINGÁ
2018

VINÍCIUS ISSAMU WATANABE HIROTOMI

**ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto

MARINGÁ
2018

VINÍCIUS ISSAMU WATANABE HIROTOMI

ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas para obtenção do título de Mestre.

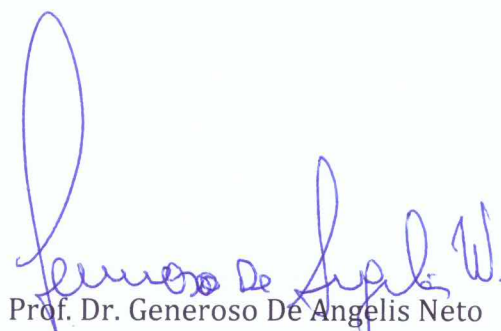
Aprovada em 30 agosto de 2018.


Profa. Dra. Nara Villanova Menon

Membro PCV/UEM


Profa. Dra. Berenice Martins Toralles

Membro UEL/LDA


Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto

Orientador - PCV/UEM

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR, Brasil)

H675a Hiroтоми, Vinícius Issamu Watanabe
Análise térmica e mecânica de concretos produzidos com incorporação de resíduos de materiais refratários / Vinícius Issamu Watanabe Hiroтоми. -- Maringá, PR, 2018.
74 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

1. Resíduos de construção civil (RCC). 2. Resíduos cerâmicos - Construção civil. 3. Resíduos de tijolos refratários. I. De Angelis Neto, Generoso, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 693.1

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter concebido mais esta oportunidade em minha vida e dado forças para conseguir completar mais esta etapa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto, obrigado por todos os conhecimentos passados ao longo do curso. Agradeço pela amizade, paciência, disponibilidade de orientação a todos os momentos e por ser uma pessoa bastante compreensiva.

Ao Professor Dr. José Wilson Assunção e ao técnico de laboratório do DEC Marcio Alencar Rocha, obrigado por todo suporte no laboratório e pela amizade.

Ao Departamento de Química – UEM, em especial ao Professor Dr. Andrelson Wellington Rinaldi, Me. Vicente Lira Kupfer e Me. Hugo Henrique Carline de Lima. Ao Departamento de Geografia – UEM, Professora Dr^a. Marta Luzia de Souza e ao Professor Dr. Nelson Vicente Lovatto Gasparetto. Ao Departamento de Física – UEM, agradeço o Professor Dr. Reginaldo Barco.

Por fim, aos meus familiares e a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho deixo meus sinceros agradecimentos. Só espero poder um dia retribuir toda a alegria de mais este momento único.

Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho que se tem... Ou que seus planos nunca vão dar certo... Ou que você nunca vai ser alguém... Confie em si mesmo.
Quem acredita sempre alcança...

Renato Russo

RESUMO

O aumento desordenado da quantidade de resíduos da construção civil tem se tornado uma preocupação em todo o mundo em função de questões ambientais, econômicas e sociais. Neste contexto o emprego de resíduos da construção civil como fonte alternativa de matéria-prima tem se mostrado como uma opção consideravelmente eficiente no sentido de reduzir os impactos ambientais. Devido à potencialidade apresentada, pesquisas têm sido desenvolvidas considerando-se a viabilidade técnica e ambiental para incorporação de resíduos cerâmicos na indústria da construção civil. Diante disto, este trabalho tem como objetivo principal analisar o efeito da temperatura no comportamento físico e mecânico de corpos de prova de concreto produzidos com a substituição dos agregados naturais por resíduos de tijolos refratários gerados em uma indústria de papel e celulose localizada na região de Ponta Grossa/PR. Com este objetivo em mente, os resíduos de tijolos refratários foram coletados de seus locais de origem e levados até as centrais de reciclagem para o processamento destes materiais na forma de agregados. A partir da obtenção do traço referência foram preparados quatro diferentes tipos de dosagens com substituição dos agregados reciclados. Os níveis de incorporação dos resíduos de tijolos refratários foram inicialmente de 25% até finalmente 100%, em relação à massa. Para estudar essas matrizes cimentícias, foi fixado o *slump* em 70 ± 10 mm e utilizado aditivo plastificante em alguns traços. Na sequência, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm, que foram ensaiados em laboratório à temperatura ambiente e após a elevação de temperatura. À temperatura ambiente foi verificada a resistência mecânica à compressão simples, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios e massa específica, com base nas Normas Brasileiras. Já após exposição a temperaturas de 110°C, 600°C e 900°C foram analisadas a resistência à compressão, perda de massa e análise visual dos corpos de prova. Desta forma, foi possível concluir que os índices de substituição de areia por resíduos de tijolos refratários trouxeram resultados satisfatórios quando comparados com o traço referência. Assim, a seleção de um teor adequado de incorporação de resíduos de tijolos refratários pode levar a um melhor desempenho dos concretos quando submetidos a temperaturas.

Palavras-chave: Resíduos da construção civil. Resíduos cerâmicos. Resíduos de tijolos refratários.

ABSTRACT

The disorderly increase in the amount of waste from construction has become a concern worldwide due to environmental, economic and social issues. In this context, the use of construction waste as an alternative source of raw material has proved to be a considerably efficient option in reducing environmental impacts. Due to the presented potential, researches have been developed considering the technical and environmental feasibility for the incorporation of ceramic residues in the construction industry. The main objective of this work is to analyze the effect of temperature on the physical and mechanical behavior of concrete specimens produced with the substitution of natural aggregates for refractory brick residues generated in a pulp and paper industry located in the Ponta Grossa / PR. With this objective in mind, the refractory brick residues were collected from their places of origin and taken to the recycling centers for the processing of these materials in the form of aggregates. From the reference trace, four different types of dosages were prepared with substitution of the recycled aggregates. The incorporation levels of the refractory brick residues were initially from 25% to finally 100%, relative to the mass. To study these cementitious matrixes, the slump was fixed at 70 ± 10 mm and plasticizer additive was used in some traces. Then, cylindrical specimens of dimensions 10 cm x 20 cm were made, which were tested in laboratory at room temperature and after temperature rise. At room temperature, the mechanical resistance to simple compression, modulus of elasticity, water absorption, voids index and specific mass was verified, based on the Brazilian Standards. After exposure to temperatures of 110 ° C, 600 ° C and 900 ° C the compressive strength, mass loss and visual analysis of the specimens were analyzed. In this way, it was possible to conclude that the sand substitution indexes for refractory brick residues presented satisfactory results when compared with the reference trace. Thus, selection of an appropriate content of incorporation of refractory brick residues may lead to better performance of concretes when subjected to temperatures.

Keywords: Waste from construction. Ceramic residues. Waste of refractory bricks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Composição dos resíduos sólidos urbanos.....	15
Figura 2.2 – Distribuição da Composição dos RCC.....	16
Figura 2.3 – Inauguração de usinas de RCC ao longo dos anos no Brasil.....	20
Figura 2.4 – Modelo de gerenciamento ambiental de resíduos.....	23
Figura 5.1 – Tijolos refratários utilizados.....	32
Figura 5.2 – Máquina para processamento primário dos resíduos.....	34
Figura 5.3 – Máquina para processamento secundário dos resíduos.....	35
Figura 5.4 – Processo para caracterização do resíduo.....	36
Figura 5.5 – Difratorômetro.....	36
Figura 5.6 – Espectrômetro.....	37
Figura 5.7 – Realização do ensaio de abatimento de tronco.....	40
Figura 5.8 – Determinação da massa específica do concreto no estado fresco.....	41
Figura 5.9 – Prensa hidráulica de 100 toneladas.....	42
Figura 5.10 – Prensa universal.....	42
Figura 5.11 – Forno estufa operado a 110°C.....	43
Figura 5.12 – Forno mufla operado a 600°C.....	44
Figura 5.13 – Forno mufla operado a 900°C.....	44
Figura 5.14 – Balança digital de precisão utilizada.....	45
Figura 6.1 – Curva de distribuição granulométrica da areia.....	46
Figura 6.2 – Curva de distribuição granulométrica da brita.....	47
Figura 6.3 – Resultado dos tijolos refratários após trituração.....	48
Figura 6.4 – Resultado final do agregado miúdo reciclado triturado.....	48
Figura 6.5 – Acondicionamento dos resíduos.....	49
Figura 6.6 – Curva de distribuição granulométrica do agregado reciclado.....	49
Figura 6.7 – Difratorograma de raios-X dos resíduos refratários.....	50
Figura 6.8 – Corpos de prova moldados.....	53
Figura 6.9 – Corpos de prova após 24 horas da moldagem.....	54
Figura 6.10 – Evolução da resistência à compressão das amostras ao longo do tempo.....	56
Figura 6.11 – Comportamento do módulo de elasticidade das amostras.....	57
Figura 6.12 – Absorção de água aos 28 dias.....	59

Figura 6.13 – Comportamento da resistência à compressão das amostras expostas a temperaturas.....	61
Figura 6.14 – Comportamento da perda de massa das amostras após exposição térmica.....	62
Figura 6.15 – Aparência da superfície dos concretos após queima.....	64
Figura 6.16 – Desintegração de concreto referência após ensaio.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características do concreto à exposição térmica	28
Tabela 5.1 – Exigências físicas e mecânicas	30
Tabela 5.2 – Propriedades dos tijolos provenientes de fornos de cal	32
Tabela 5.3 – Propriedades dos tijolos provenientes de caldeiras	33
Tabela 5.4 – Parâmetros iniciais de dosagem.....	38
Tabela 5.5 – Parâmetro de dosagens dos concretos.....	39
Tabela 6.1 – Caracterização física da areia	46
Tabela 6.2 – Caracterização física da brita.....	47
Tabela 6.3 – Caracterização física dos resíduos de tijolos refratários.....	49
Tabela 6.4 – Análise química FRX dos resíduos refratários	51
Tabela 6.5 – Proporção de mistura dos concretos	52
Tabela 6.6 – Programa experimental.....	53
Tabela 6.7 – Abatimento do tronco de cone.....	54
Tabela 6.8 – Massa específica no estado fresco	55
Tabela 6.9 – Resistência à compressão	56
Tabela 6.10 – Módulo de elasticidade aos 28 dias	57
Tabela 6.11 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos	58
Tabela 6.12 – Resistência à compressão após exposição a temperaturas.....	60
Tabela 6.13 – Perda de peso das amostras após exposição térmica	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	15
2.1	USINAS DE RECICLAGEM	19
2.2	GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RCC	21
3	ESTUDO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS	24
4	EXPOSIÇÃO TÉRMICA – ALTERAÇÕES EM CONCRETO	28
5	MATERIAIS E MÉTODOS	30
5.1	MATERIAIS	30
5.1.1	Cimento Portland.....	30
5.1.2	Areia.....	30
5.1.3	Brita	31
5.1.4	Água	31
5.1.5	Aditivo.....	31
5.1.6	Resíduos de tijolos refratários	31
5.2	MÉTODOS	33
5.2.1	Caracterização da areia	33
5.2.2	Caracterização da brita.....	34
5.2.3	Processamento dos resíduos refratários	34
5.2.4	Caracterização dos resíduos de tijolos refratários	35
5.2.5	Difração de raio-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX)	36
5.2.6	Preparo do concreto	37
5.2.6.1	Determinação do traço referência	38
5.2.6.2	Substituição da areia por resíduos de tijolos refratários	39
5.2.7	Ensaio no concreto à temperatura ambiente	40
5.2.7.1	Tronco de cone (<i>Slump Test</i>)	40
5.2.7.2	Massa específica	41
5.2.7.3	Resistência à compressão	41
5.2.7.4	Módulo de elasticidade	42
5.2.7.5	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	43

5.2.8	Exposição térmica dos corpos de prova.....	43
5.2.8.1	Resistência à compressão	45
5.2.8.2	Perda de massa.....	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA	46
6.2	CARACTERIZAÇÃO DA BRITA	47
6.3	PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS REFRACTÁRIOS.....	47
6.4	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE TIJOLOS REFRACTÁRIOS	49
6.5	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	50
6.6	PREPARO DO CONCRETO	52
6.7	ENSAIOS NO CONCRETO FRESCO.....	54
6.7.1	Tronco de cone (<i>Slump Test</i>).....	54
6.7.2	Massa específica	55
6.8	ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO – TEMPERATURA AMBIENTE	55
6.8.1	Resistência à compressão	55
6.8.2	Módulo de elasticidade.....	57
6.8.3	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	58
6.9	ANÁLISES NO CONCRETO APÓS A ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA	60
6.9.1	Resistência à compressão	60
6.9.2	Perda de massa.....	62
6.9.3	Análise visual das amostras após a queima.....	63
7	CONCLUSÃO.....	66
	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população no planeta aliado ao desenvolvimento tecnológico favorecem ao maior consumo em todas as áreas. No setor da construção, pode-se constatar uma considerável demanda na produção de bens de forma a suprir as necessidades do homem.

Associada a esta demanda pode-se verificar uma maior quantidade de resíduos sólidos gerados pelo setor que, quando mal gerenciados, implicam em uma cadeia de prejuízos, causando principalmente danos à saúde humana e ao ecossistema como um todo.

Neste sentido, pode-se verificar legislações cada vez mais severas que instituem o propósito de desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas voltadas à utilização de resíduos na cadeia produtiva das indústrias. Assim, o material que seria descartado é beneficiado e passa a ser utilizado como matéria-prima na fabricação de novos produtos ou até mesmo empregado como fonte para otimizar o consumo de energia.

No Brasil, a partir da aprovação da Lei 12.305 (BRASIL, 2010) e da Resolução 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) foram criados instrumentos em nível federal que determinam as responsabilidades do gerador de resíduos sólidos urbanos e da construção civil, de forma a incentivar o desenvolvimento de técnicas que visam à preservação do meio ambiente e à sustentabilidade no setor da construção civil.

A construção civil é tida como uma das indústrias responsáveis por grande parte do volume gerado de resíduos sólidos. Desta forma, a utilização de concretos produzidos a partir da incorporação de resíduos de construção civil (RCC) surgiu como uma alternativa construtiva que visa principalmente o combate à poluição e preservação de recursos naturais.

Considerando a grande quantidade de insumos utilizados na construção civil, este setor oferece potencial no aproveitamento de materiais inservíveis. Aliado a isto, é possível verificar a potencialidade do aproveitamento dos resíduos de tijolos refratários, por apresentarem melhor qualidade e homogeneidade quando comparados com outros resíduos da construção civil.

Mesmo descartados após o uso, pode-se dizer que os resíduos de tijolos refratários ainda possuem propriedades de resistência ao calor devido a presença de óxidos e fases mineralógicas refratárias. Assim, tem-se materiais com potenciais de serem aplicados em processos onde as solicitações mecânicas, químicas e térmicas não são tão consideráveis quanto as especificadas pelo fabricante destes produtos (LIMA, 2014).

Os tijolos refratários são geralmente empregados em fornos e caldeiras de indústrias químicas, siderúrgicas, usinas nucleares e indústrias de celulose e papel. Desta forma pode-se dizer que estes são os principais locais de fonte de geração em escala de resíduos destes materiais. A Resolução nº 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) define estes tipos de resíduos como pertencente à classe A-b, ou melhor, são resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados e são provenientes de manutenções realizadas de forma a garantir o bom funcionamento dos equipamentos, a segurança e a qualidade do processo produtivo. Além disso, a utilização dos resíduos de tijolos refratários em diferentes dosagens permite a redução dos custos envolvidos no processo de extração de agregados naturais bem como a diminuição do volume destes materiais dispostos inadequadamente no meio ambiente.

Diante deste contexto, espera-se que o presente trabalho apresente contribuições para o estudo da incorporação de resíduos de tijolos refratários (RTR) e permita avaliar a influência destes materiais em concretos após serem expostos a temperaturas.

Assim, como **objetivo geral** tem-se: analisar a influência da substituição do agregado miúdo proveniente da reciclagem de resíduos de tijolos refratários, na melhoria das propriedades mecânicas do concreto sob efeito de diferentes temperaturas em relação ao concreto comum.

E os **objetivos específicos** são:

- Analisar o comportamento dos resíduos de tijolos refratários como agregado miúdo, por meio de análises físicas e químicas;
- Desenvolver traços de concreto com potencial de substituição de agregados naturais por reciclados, na fração miúda;
- Avaliar a influência dos diferentes teores de resíduos de tijolos refratários no comportamento físico e mecânico do concreto à temperatura ambiente;
- Estudar o efeito do teor de substituição da areia pelos dos resíduos refratários nas propriedades mecânicas e perda de massa do concreto após exposição térmica.

A seguir é apresentado o Quadro 1.1 que contém a síntese da sequência de procedimentos a serem adotados e desenvolvidos de forma atingir ao objetivo principal do trabalho.

Quadro 1.1 – Síntese das ações metodológicas a serem seguidas

n.	Objetivos Específicos	Ações Metodológicas
1	Analisar o comportamento dos resíduos de tijolos refratários como agregado miúdo, por meio de análises físicas e químicas;	Para caracterização física será realizada a análise granulométrica e a determinação da massa específica por meio das seguintes normas: ABNT NBR NM 248:2003 – Composição granulométrica dos agregados e ABNT NBR NM 52:2009 – Massa específica de agregado miúdo, respectivamente; Amostras trituradas do resíduo de tijolos refratários serão caracterizadas quimicamente e mineralogicamente por fluorescência de raios-X e difração de raios-X, respectivamente.
2	Desenvolver traços de concreto com potencial de substituição de agregados naturais por reciclados, na fração miúda;	Com base na literatura, esta etapa constitui em realizar estudos de dosagens de concretos já consagrados de forma a determinar um traço puro, denominado como referência, para concretos com consistência plástica. Na sequência, definir os traços que contemplem a substituição do agregado miúdo do concreto por agregados reciclados provenientes de resíduos refratários.
3	Avaliar a influência dos diferentes teores de resíduos de tijolos refratários no comportamento físico e mecânico do concreto à temperatura ambiente;	Para cada um dos cinco traços serão moldados e curados corpos de prova de acordo com a ABNT NBR 5.738:2015. A determinação da resistência à compressão será realizada de acordo com ABNT NBR 5.739:2007. Os ensaios serão realizados decorridos 3, 7, 14 e 28 dias da moldagem dos elementos; O ensaio de módulo de elasticidade será realizado conforme ABNT NBR 8.522:2008; A absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos será realizada de acordo com a ABNT NBR 9.778:2005 versão corrigida 2:2009.
4	Estudar o efeito do teor de substituição da areia pelos dos resíduos refratários nas propriedades mecânicas e perda de peso do concreto após exposição térmica.	Para cada um dos cinco traços serão moldados e curados corpos de prova de acordo com a ABNT NBR 5.738:2015. Após todos os exemplares experimentarem as temperaturas de 110°C, 600°C e 900°C será realizada a determinação da resistência à compressão seguindo prescritos da ABNT NBR 5.739:2007; Os dados para a análise da perda de massa serão obtidos após a elevação de temperatura dos corpos de prova.

Fonte: Autor

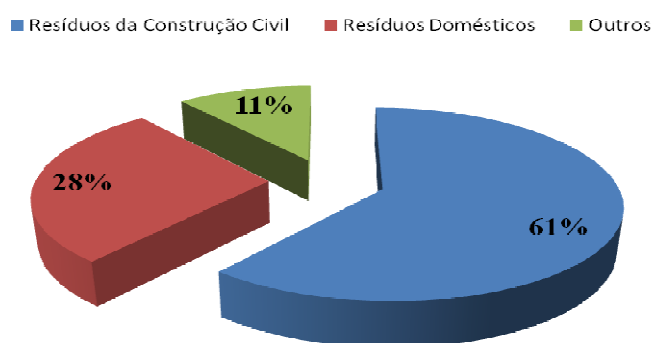
2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O crescimento desordenado da população nas cidades no mundo, aliado ao intenso surgimento de indústrias, novas tecnologias e ao aumento do consumo de bens e serviços têm causado sérias transformações no meio ambiente. Segundo John (2010), estes são alguns dos temas atuais para discussão, em que pode-se verificar as consequências das atitudes tomadas pelo homem sendo refletidas na natureza. Sendo assim, o cenário da natureza tornou-se atualmente uma preocupação à humanidade e uma possível ameaça às futuras gerações.

Em se tratando da indústria da construção civil, este setor é conhecido como um dos principais responsáveis em causar grande parte dos impactos ambientais na atualidade, devido ao elevado consumo de matérias-primas. Segundo estimativas, o setor da construção civil é responsável pelo consumo de 15 a 50% dos recursos naturais extraídos do planeta. Todavia, a utilização de resíduos como fonte de matéria-prima torna-se uma alternativa além de sustentável, eficiente, substituindo parcialmente os agregados naturais empregados em concretos, blocos, *pavers* etc (FIORITI; INO; AKASAKI, 2007).

A construção civil constitui como uma das indústrias responsáveis por grande parte do volume gerado de resíduos sólidos. Dados estatísticos apresentam que este setor é capaz de gerar aproximadamente 60% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (BUTTLER, 2007). A mesma estimativa foi verificada por Pinto (2008), onde a Figura 2.1 apresenta os dados referentes à quantidade de resíduos da construção civil, os resíduos domésticos e demais resíduos gerados no Estado de São Paulo. Pode-se verificar uma diferença considerável entre a percentagem gerada pela indústria da construção civil e demais fontes de resíduos.

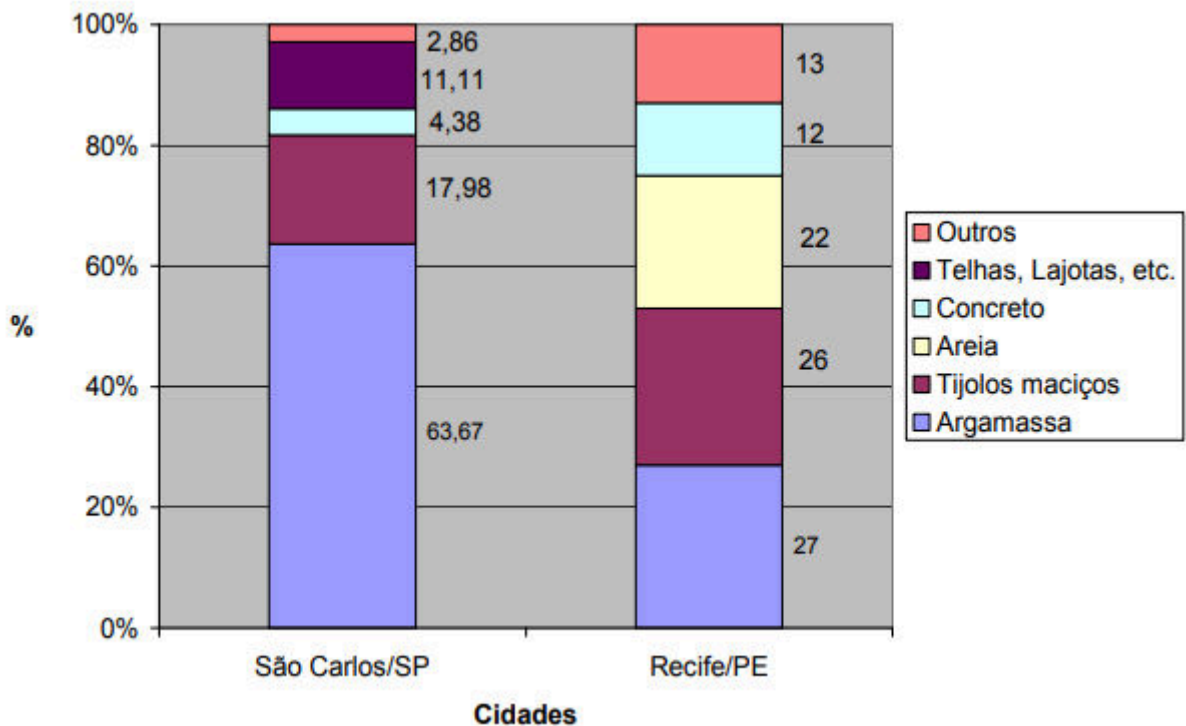
Figura 2.1 – Composição dos resíduos sólidos urbanos



Fonte: adaptado de Pinto (2008)

Segundo Angulo et al. (2005), materiais pertencentes a Classe A, como rochas, solos, cerâmicas, concreto etc, representam em torno de 90% da massa de RCC no Brasil. Para Santos (2007) a variabilidade dos elementos que compõem os RCC depende de características regionais como fatores históricos, condições topográficas, panorama político e nível de desenvolvimento econômico. A Figura 2.2 apresenta a distribuição porcentual de RCC em duas cidades no Brasil: São Carlos/SP, apresentada no trabalho de Pinto (1986) e Recife/PE, apresentada no trabalho de Souza et al. (2004).

Figura 2.2 – Distribuição da Composição dos RCC



Fonte: Santos (2007)

A Resolução nº 307/2002 do CONAMA, que trata dos resíduos da construção, no Art. 2º, define:

I – Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha; (BRASIL, 2002, p. 1).

Em estudo realizado na cidade de Fortaleza – CE, Lima e Cabral (2013) apresentam em seu trabalho de pesquisa a caracterização e composição física dos RCC do município, por meio da análise de amostras coletadas em duas unidades licenciadas ambientalmente para receber tais resíduos. As atividades foram realizadas em uma área de recuperação e uma usina de reciclagem. Primeiramente, a coleta procedeu-se seguindo orientações prescritas na ABNT NBR 10.007:2004d. Na sequência, foi realizada a análise da composição gravimétrica e classificação dos RCC conforme a Resolução 307 do CONAMA/2002 (BRASIL, 2002). Os resultados da composição gravimétrica apresentaram que o RCC é composto em média, por 24,60% de areia e solo; 22,00% de argamassa; 15,60% de concreto; 14,30% de cerâmica vermelha; 10,40% de tijolo branco; 6,30% de cerâmica de revestimento; 5,00% de gesso; 1,40% de outros (plástico, papelão, madeira, vidro e ferro); 0,02% de espuma, couro e tecido; e 0,20% de embalagens de tinta, solvente e amianto. Desta forma, de acordo com a Resolução 307 do CONAMA/2002 (BRASIL, 2002) os autores apresentaram que 93,40% do RCC de Fortaleza são pertencentes à Classe A; 6,40% Classe B; 0,02% Classe C; e 0,20% Classe D. Assim, com base nos dados obtidos da composição gravimétrica da massa de resíduos gerados no local, verifica-se a predominância de materiais com alto potencial de reutilização ou reciclagem.

De forma a tentar contornar esta situação, há estudos, pesquisas e trabalhos sendo realizados relacionados à utilização de resíduos no setor industrial. Ou melhor, maneiras de tentar minimizar os impactos negativos causados ao meio ambiente. Para Brasil e Santos (2004) a reciclagem torna-se uma ferramenta utilizada para amenizar problemas ambientais, além disso, a adoção deste processo é capaz de gerar diversos benefícios à sociedade e ao meio ambiente, tais como:

- Economia no consumo de energia e matérias-primas no processo de fabricação;
- Diminuição da exploração de recursos naturais;
- Diminuição da contaminação do solo, da água, do ar;
- Melhoria na qualidade de vida e limpeza urbana;
- Melhor aproveitamento dos materiais;
- Geração de renda e empregos e
- Formação de uma consciência ecológica.

A cada ano que passa mais casas, mais prédios, mais obras em geral surgem no Brasil e ao redor do mundo. Assim, com novas obras surgindo, é possível verificar paralelamente a presença de construções em processo de reforma e/ou recuperação. Ao longo das etapas

construtivas é inevitável até o momento e com as tecnologias atuais evitar a não geração efetiva de resíduos. Desta forma, os resíduos da construção civil (RCC) geram, cada vez mais, sérios problemas em domínios ambientais, sociais e econômicos. Por meio do desenvolvimento de um modelo dinâmico auxiliado por um *software*, Marzouk e Azab (2014) avaliaram os impactos econômicos e ambientais, tendo em conta duas alternativas: resíduos reciclados e resíduos descartados. Verificou-se que ao longo de um período total de 20 anos a alternativa mais viável para destinação dos RCC e qualquer outro é a reciclagem. No caso no Egito, local onde foi realizado a pesquisa, dados revelam que até 2024 seriam substituídos 12,3 milhões de toneladas de matérias-primas primárias, que leva a preservação dos recursos naturais, redução dos espaços limitados de aterros, dentre outros benefícios.

Na Irlanda, a preocupação com a escassez de aterros devido à redução dos espaços limitados destinados a este fim, e o custo cada vez mais elevado destes locais tornam-se motivos para que as empresas geradoras de resíduos e políticos locais encontrem métodos de forma a desviar os RCC de aterros. O trabalho desenvolvido por Duran, Lenihan e O'Regan (2006) traz um modelo para avaliar a viabilidade econômica da criação de mercados para materiais reciclados da construção e demolição. Segundo a pesquisa a criação destes locais para comercialização torna-se viável quando o custo de deposição em aterro exceder o custo de transporte dos resíduos para o centro de reciclagem e o custo em utilizar agregados naturais exceder o custo do emprego de agregados reciclados aprovados dentro dos requisitos de qualidade.

Em função dos graves impactos socioambientais causados das atividades de construção e demolição, em São Carlos – SP, desde 2001 a Prefeitura Municipal adota uma política pública fundamentada em um plano de gestão e gerenciamento de resíduos da construção civil (RCC). Esta iniciativa tomada no município consiste na implantação de uma Usina de Reciclagem. Pelo fato de São Carlos contar com um plano de gestão e gerenciamento de resíduos da construção civil, inclusive com a operação da Usina de Reciclagem de RCC, o município atualmente torna-se referência, já que a prática de reciclagem não é algo comum das administrações públicas. Neste sentido ressalta-se que a implantação de uma gestão pública de RCC além de trazer benefícios ambientais, verifica-se melhores resultados no desenvolvimento social e econômico local (FAGURY; GRANDE, 2007).

Ao fato do concreto convencional ser largamente utilizado no mundo todos e composto basicamente por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, este material

pode ser visto como um potencial para utilização de resíduos reciclados em sua composição. No caso dos agregados utilizados na confecção do concreto, estes compreendem cerca de 60% a 75% do volume total de concreto, com isso, a redução no consumo de agregados naturais pode trazer resultados benéficos ao meio ambiente (CACHIM, 2009).

A pesquisa realizada por Soutsos, Tang e Millard (2011) mostrou que os níveis de incorporação de agregados reciclados provenientes da construção civil podem levar a produção de blocos de pavimentação com propriedades mecânicas semelhantes aos comercialmente vendidos e sem a necessidade de aumentar o teor de cimento. Portanto constatou-se significativa redução de custos, onde os agregados reciclados de construção e demolição podem ser fornecidos ao fabricante de bloco a um preço inferior ao dos agregados naturais. Este estudo pode incentivar empresas/usinas de reciclagem a desenvolver processos mais avançados para gestão destes resíduos para este novo mercado de valor que tende avançar cada vez mais.

2.1 USINAS DE RECICLAGEM

Para o processo de reciclagem de RCC, as usinas de reciclagem utilizam geralmente equipamentos do setor de mineração, onde são adaptados ou simplesmente utilizados no processo de reciclagem (LIMA, 1999, p.29).

Em função da variabilidade e contaminação dos RCC, Wilburn e Goonan (1998) relatam que o processo de reciclagem de RCC é uma atividade que necessita de um sistema de controle de qualidade diferenciado, necessitando de trabalho manual e até mesmo equipamentos complementares, como separador magnético, para separação dos contaminantes.

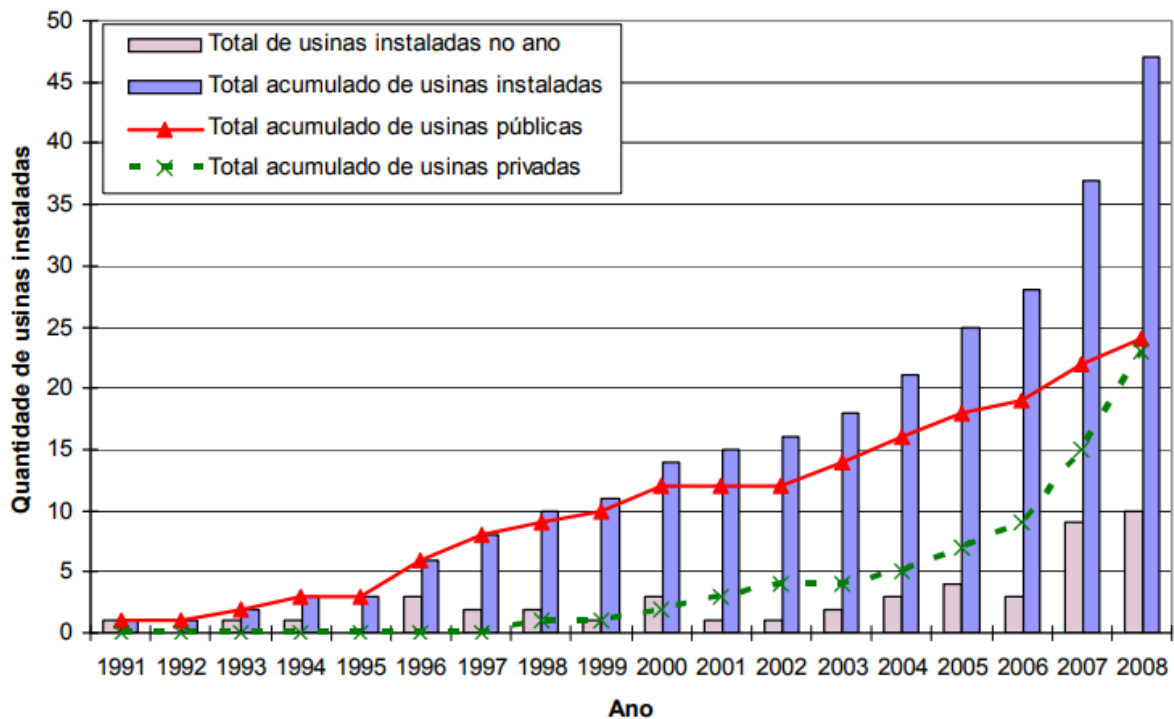
Segundo Angulo (2005), países como Holanda, Dinamarca, Alemanha e Suíça, entre outros, reutilizam e reciclam entre 50% e 90% do RCC produzidos. Em trabalho realizado por Mueller (2007), têm-se que na Alemanha existem cerca de 3.000 usinas móveis e 1.600 usinas fixas.

No Brasil, a atividade de reciclagem de resíduos, apesar de recente, tem demonstrado evoluções significativas a partir de 2000. As primeiras usinas de reciclagem no país surgiram em propriedade de prefeituras de São Paulo/SP (1991), de Londrina/PR (1993), e de Belo Horizonte/MG (1994). No país cerca de 1% das construtoras tidas como de grande e médio portes adotam medidas que instituem a reciclagem de resíduos da construção civil no canteiro

de obra. Vale lembrar que, após a publicação da Resolução 307/2002 do CONAMA, houve aumento na taxa de instalação de usinas ao redor do país, no caso de Belo Horizonte, registrou-se um aumento de três a nove usinas por ano. Em 2008, registrou-se um total de 47 usinas de reciclagem de RCC espalhadas pelo Brasil (MIRANDA, ANGULO E CARELI 2009).

A Figura 2.3 apresenta a quantidade de usinas de reciclagem de resíduos classe A instaladas no Brasil.

Figura 2.3 – Inauguração de usinas de RCC ao longo dos anos no Brasil



Fonte: Miranda, Angulo e Careli (2009)

Segundo Miranda, Angulo e Careli (2009), até 2002 haviam no país cerca de 16 usinas de reciclagem instaladas. Com a publicação da Resolução 307 do CONAMA e o exemplo de gestão pública bem-sucedida de Belo Horizonte a taxa de usinas instaladas por ano cresceu de 3 a 9 usinas por ano. “Atualmente, já podem ser citadas pelo menos 47 usinas de reciclagem, sendo 24 públicas (51% do total) e 23 privadas (49% restante). Das 36 usinas que estão em operação ou em instalação, 15 (42%) são públicas e 21 (58%) são privadas” (MIRANDA, ANGULO e CARELI, 2009, p. 63).

De forma garantir o controle de qualidade, homogeneidade e confiabilidade do produto, experiências promissoras para o emprego destes materiais vem sendo testadas. No Japão, por meio de tais tecnologias é realizado, por exemplo, a lavagem dos materiais na fração miúda, separação da fração orgânica leve e britagem combinada com aquecimento para a remoção da argamassa de cimento porosa dos agregados graúdos reciclados (SHIMA et al., 2005).

Em Portugal, segundo Pereira (2002), do total de resíduos gerados na construção civil, cerca de 76% são destinados a aterros, 11% são reutilizados novamente em obras ou destinados à outras finalidades, uma parcela de 4% são incorretamente destinados à incineração, e a parcela restante correspondente a 9% são reciclados no país. Neste sentido, devido ao potencial de reciclabilidade destes materiais, a alta demanda na geração e o baixo índice de tal medida/procedimento, Coelho e Brito (2013) apresentaram uma análise de viabilidade econômica de uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil instalada na região metropolitana de Lisboa. De acordo com a pesquisa, utilizando de um método mecanizado, que exige pouco da mão de obra, e desde que a usina seja bem localizada para o recebimento dos RCC, uma vez que a localização torna-se um fator determinante em termos de custos, as estatísticas geradas ao longo do trabalho revelam que o retorno do investimento pode ser obtido num período de 2 anos. Em 2013, as taxas para o despejo de tais resíduos em aterros giravam em torno de 10,3 milhões de euros por ano. Por outro lado, o valor aproximado para o processamento de 350 toneladas/h de resíduos apresentavam taxas médias de 48 euros/tonelada para resíduos mistos e 8 euros por tonelada para os materiais de entrada já separados.

2.2 GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RCC

A preocupação do homem com a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos já é considerado como algo antigo, uma vez que no ano 500 a.C os gregos publicaram o primeiro registro citando a criação de um local específico para disposição desses resíduos e proibindo que os mesmos fossem jogados nas ruas e, em 1898, na cidade de Nova York já haviam registros de um centro municipal de reciclagem dos resíduos sólidos urbanos (LOUIS, 2004).

Atualmente, uma considerável parcela das nações do mundo já tem adotado ações com filosofia de preservação do meio ambiente. Este despertar para a proteção ambiental é claro

em função do número de leis, normas, tratados e protocolos existentes referente a melhores práticas da interferência do homem com o meio ambiente (CABRAL, 2007).

Segundo o Art 9º da Resolução 307, de 05 de julho de 2002 (BRASIL, 2002), tem-se que, o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) elaborado por pessoa física ou jurídica, trata de um documento onde é identificado a quantidade de diferentes tipos de resíduos gerados em obras, reformas, demolições etc. O objetivo deste documento é registrar o cumprimento, por parte dos geradores de resíduos, do correto manejo e destinação ambientalmente correta destes materiais. Os PGRCC's deverão contemplar as seguintes etapas:

- I – Caracterização: etapa em que é realizada a identificação e quantificação dos resíduos;
- II – Triagem: nesta etapa há separação dos resíduos de acordo com suas classes, este processo é realizado pelo próprio gerador ou por empresas licenciadas para essa finalidade (terceirização);
- III – Acondicionamento: de forma a possibilitar sua reutilização ou reciclagem, nesta etapa o gerador deve garantir o correto confinamento dos resíduos;
- IV – Transporte: deve ser realizado de acordo com normas vigentes para tal finalidade; e
- V – Destinação: nesta etapa o gerador deve garantir que os resíduos tenham uma destinação ambientalmente correta.

No Art. 8º a Lei 12.305, de 02 de Agosto de 2010, verifica-se os instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL 2010), sendo um deles os sistemas de logística reversa. Segundo Santos (2013) a logística reversa trata do retorno de produtos, reciclagem, substituição de materiais, reuso de materiais, disposição de resíduos, reforma, reparação e remanufatura de bens retornados.

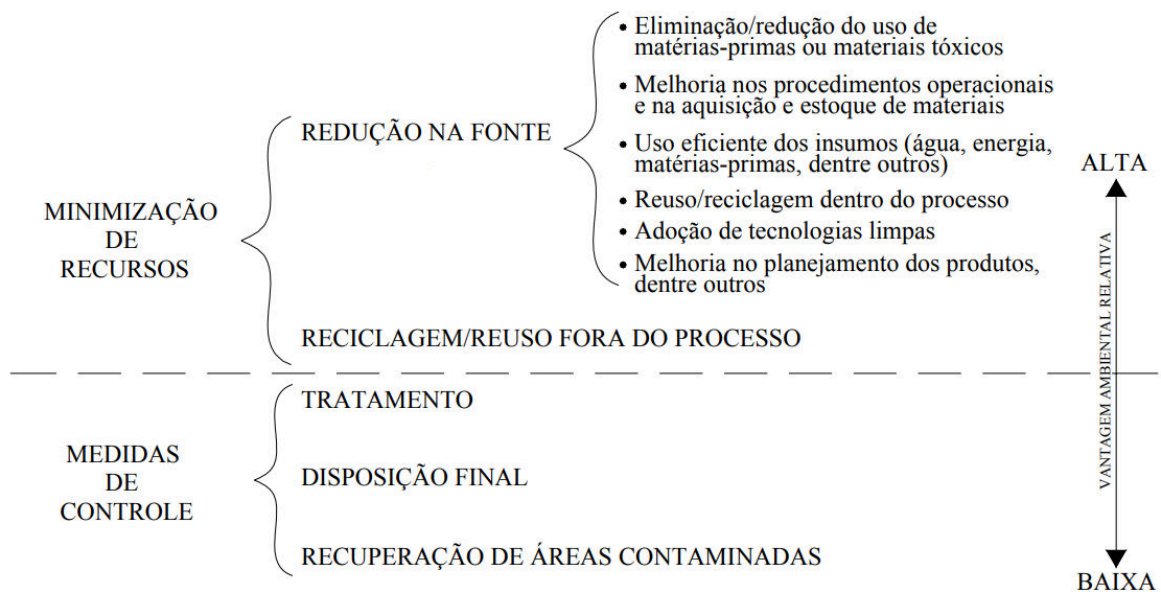
No Art. 9º, tem-se elencado a ordem de prioridades na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos, a saber:

- Não geração;
- Redução;
- Reutilização;
- Reciclagem;
- Tratamento dos resíduos sólidos; e
- Disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

O ponto principal da Política Nacional de Resíduos Sólidos é a redução, ou seja, a não geração de resíduos sólidos que pode ocorrer por meio do beneficiamento destes materiais, permitindo assim sua reutilização como novos insumos ou produtos. Já no que diz respeito aos resíduos que apresentam esgotadas todas as possibilidades de aproveitamento, também conhecidos como rejeitos, a Lei prevê destinação final ambientalmente correta a estes materiais, de forma a não agredir a saúde humana e ao meio ambiente (BRASIL, 2010).

Para a CETESB (2005), a eficiência de um gerenciamento de resíduos depende inicialmente da minimização da utilização de recursos, sendo que esta inclui qualquer prática, ambientalmente segura de preservação à poluição, reuso, reciclagem e recuperação de materiais e do conteúdo energético dos resíduos, objetivando reduzir a quantidade de resíduos a serem tratados e posteriormente dispostos. A Figura 2.4 apresenta esquematicamente um modelo proposto de gerenciamento ambiental, que visa ações para minimização de resíduos e poluentes.

Figura 2.4 – Modelo de gerenciamento ambiental de resíduos



Fonte: adaptado de CETESB (2005a)

Para a CETESB (2005a), as práticas de reciclagem fora do processo, conforme apresentado na Figura 2.4, atuam de forma corretiva sobre os efeitos e as conseqüências provenientes do resíduo gerado

3 ESTUDO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS

Em pesquisa realizada por Hansen (2004), o autor descreve que o primeiro caso registrado e documentado na história de uso de tijolos triturados junto com o cimento Portland na produção de concretos ocorreu na Alemanha em 1860. Também há relatos de que após a Segunda Guerra Mundial já haviam registros do emprego do tijolo triturado como agregado para o concreto na reabilitação do país após a Segunda Guerra Mundial.

Para Baradaran-Nasiri e Nematzadeh (2017), os principais benefícios verificados ao se utilizar tijolos triturados como agregados para concretos encontram-se na redução da densidade da mistura, diminuição de uso de agregados naturais por ser um método ecológico, entre outros. Com base em estudos realizados até hoje pode-se verificar que a aplicação do tijolo triturado como agregados reciclados para concretos já é algo consideravelmente difundido e satisfatório.

Em estudo realizado por Moon, Kim e Shin (2001), a propriedade da cinza volante foi comparada por meio de ensaios com a do resíduo cerâmico mineral. Devido a predominância de elementos como a sílica e alumina no resíduo cerâmico, os resultados indicaram que este material pode ser utilizado como agregado graúdo ou miúdo em concretos.

A adição de resíduos de cerâmica vermelha em compósitos cimentícios é um tema abordado na literatura. A grande vantagem de se utilizar o resíduo da cerâmica vermelha em materiais cimentícios é pela sua atuação como *filler* e pela possibilidade de desenvolvimento de atividade pozolânica por parte desse material.

O efeito *filler* é um efeito físico e consiste no fato de grãos menores de algum material inerte (*filler*), dentro do compósito cimentício, preencherem o espaço deixado entre o contato dos grãos maiores bem como outros vazios da matriz cimentícia (poros capilares e de gel). Para tal, a obtenção de uma fina granulometria é fundamental a fim de diminuir a porosidade, permeabilidade e índice de vazios do sistema. Como consequência, aumenta-se sua compactidade e ganha-se em resistência e durabilidade. O *filler* é considerado o material mais fino, sendo constituído por partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075 mm (BAHIENSE et al., 2008). Dentro da matriz cimentícia, atuam como pontos de nucleação para as reações de hidratação e de ancoragem.

Já a atividade pozolânica é de natureza química. A pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, em si mesmo, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas

quando finamente moída e em contato com umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentantes (METHA; MONTEIRO, 1994).

Um exemplo de pozolana artificial é a argila calcinada (AY; ÜNAL, 2000), que forma a cerâmica vermelha. Os argilominerais que compõem a cerâmica vermelha são compostos predominantemente por sílica e alumina e passam por um processo de desidroxilação e amorfismo durante o aquecimento nos fornos de calcinação das fábricas (NACERI; HAMINA, 2009). Tal fato provoca uma reestruturação do seu arranjo atômico, que passa de cristalino para amorfo instável e com significativa reatividade química, dando características pozolânicas ao material (GARCIA et al., 2015).

A produção de concreto contendo tijolo triturado como agregado graúdo foi estudado por Zakaria e Cabrera (1996). Nesta pesquisa os autores relatam que para menores idades os concretos confeccionados com os agregados reciclados apresentavam resistências relativamente menores do que o concreto com agregado natural. Tal fato foi atribuído devido à maior absorção de água do agregado reciclado do tijolo em comparação com o agregado natural. Mais adiante os autores verificaram que para idades maiores os concretos produzidos com a incorporação de tijolos triturados apresentavam resistências superiores. Este comportamento foi justificado em função do efeito pozolânico da fração finamente moída do agregado de tijolos.

Fonseca (2006) produziu concretos com substituição parcial e total do agregado graúdo por agregado reciclado de telha cerâmica. Os concretos produzidos foram comparados nos estados fresco e endurecido. No estado endurecido foram testadas as propriedades de resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade. Os concretos com agregados reciclados, de uma maneira geral, apresentaram resistência mecânica mais baixa comparativamente aos concretos de referência. A substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado de telha provocou queda de 42% na resistência à compressão. Entretanto, a substituição parcial de 50% resultou em resistência à compressão mais próxima da resistência do concreto de referência.

A possibilidade de substituir os agregados naturais na fração miúda e graúda por resíduos de tijolos triturados foi estudada por Debieb e Kenai (2008). Verificou-se que propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade não foram tão prejudicadas, permanecendo com características semelhantes ao concreto referência, desde que limitada a porcentagem de incorporação de agregado graúdo e miúdo em 25% e 50%, respectivamente

Alcantara, Nóbrega e Silva (2012) desenvolveram argamassas de revestimento com resíduos de cerâmicas vermelhas (RCV) em substituição em massa aos agregados nos teores de 10%, 15%, 20% e 30%. Dentre as propriedades analisadas, estava a de resistência à compressão. Por efeito *filler*, obteve-se ganhos de resistência de mais de 100%. Foi constatado que as modificações nas outras propriedades pela incorporação do resíduo cerâmico até o teor de 20% não afetaram significativamente a viabilidade da aplicação da argamassa em obras.

Souza (2007) pesquisou o emprego do resíduo proveniente de porcelanato (RPP) para a produção de concreto por motivos econômicos e ambientais. Os teores de resíduo incorporados ao traço variaram de 10% a 50% em relação à massa de cimento, em traços com aditivo plastificante e sem aditivo plastificante. O acréscimo do resíduo do porcelanato alterou significativamente a consistência do concreto fresco. A utilização do resíduo no concreto resultou em um aumento de até 40% na resistência a compressão, sendo proporcional à concentração do resíduo de porcelanato no traço. A microestrutura também foi favorecida, à medida que a porosidade e a absorção do concreto diminuíram com a utilização do resíduo. Esses parâmetros atestaram a qualidade e a durabilidade do concreto produzido com o resíduo. A utilização do RPP na composição do concreto não gerou mudanças significativas no comportamento térmico.

Almeida (2012) avaliou a incorporação do RPP na fabricação de blocos de concreto em substituição parcial, em massa, do pó de pedra (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) moldados com base em um traço comercial e curados nas condições de uma fábrica de pré-moldados. A fim de não introduzir energia ao processo e viabilizar a aplicação prática do resíduo saindo da indústria de porcelanato e sendo reutilizado diretamente na indústria de pré-moldados de blocos estruturais, não houve nenhum pré-tratamento no resíduo. Os blocos com substituições do RPP ao pó de pedra de 75 e 100% não atingiram resultados satisfatórios em termos de resistência à compressão e absorção de água; e, por esse motivo, não podem ser utilizados como blocos de alvenaria estrutural. Os melhores resultados foram encontrados nos blocos com 50% de pó de porcelanato para todas as características ensaiadas, atingindo a classificação A, sendo superior à classificação do bloco de referência, condição essa provavelmente ocasionada pelo efeito *filler*, que além de melhorar a compacidade e absorção de água, também melhorou a resistência à compressão.

As proporções de substituição de 0, 25, 50, 75 e 100% de agregado fino de tijolo refratário ao invés de areia natural foram estudadas por Baradaran-Nasiri e Nematzadeh

(2017). Os autores realizaram estudos visando analisar o efeito de temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas do concreto com agregado de tijolo refratário reciclado na fração miúda e cimento de aluminato de cálcio. Os resultados mostraram o emprego destes materiais melhoraram o comportamento do concreto quando expostos acima de 800°C.

Ao trabalhar com incorporação de resíduos de tijolos em concreto Debieb e Kenai (2008) observaram que o uso de aditivos plastificantes proporcionou um efeito positivo nas misturas, uma vez que foi possível obter melhores resultados de resistência à compressão e à flexão das amostras, devido à redução do teor de água. Os autores também verificaram a redução na porcentagem de absorção de água nas amostras produzidas com plastificante.

A reciclagem de resíduos refratários silico aluminosos foi analisada por Lima (2014). O autor apresentou em seu trabalho uma tecnologia de reciclagem de resíduos refratários como agregados para materiais de proteção passiva de estruturas metálicas. Com base nos resultados verificou-se que estes resíduos podem ser usados como uma opção viável como agregado de argamassas para proteção passiva.

A utilização de tijolos refratários na produção de concretos também foi estudada por Kavas et al. (2006). Neste estudo os autores verificaram a possibilidade de utilizar materiais refratários compostos por alumina e cromita. Os resultados mostraram que as propriedades do agregado reciclado eram compatíveis às do concreto convencional

As características do concreto sob efeito térmico foi estudado por Khalaf e DeVenny (2004). Neste estudo os autores constaram que os parâmetros de resistência do concreto contendo agregado de tijolo apresentou desempenho semelhante e/ou melhor que o concretos contendo agregados de granito sob temperaturas elevadas.

4 EXPOSIÇÃO TÉRMICA – ALTERAÇÕES EM CONCRETO

O efeito do fogo em concretos pode ser considerado um grave problema, uma vez que o concreto é um produto confeccionado a partir de um conjunto de materiais, onde a reação de cada um é distinta diante de altas temperaturas. O aumento de temperatura pode afetar as propriedades dos materiais alterando significativamente a sua capacidade mecânica (MORALES, CAMPOS e FAGANELLO, 2011).

Segundo Figueiredo, Costa e Silva (2002), em situações de incêndios, o aumento da temperatura em elementos estruturais causa alterações na micro e na macro-estrutura do concreto.

Na Tabela 4.1 são apresentadas algumas alterações apresentadas pelo concreto quando expostos a elevadas temperaturas.

Tabela 4.1 – Características do concreto à exposição térmica

Temperatura [°C]	Cor	Aspecto visual / Desempenho
< 250	Cinza	Perda de resistência pequena e irregular
285 - 300	Cinza-Roseo	Fissuração superficial, lascamento explosivo (vapor)
300	Rosa	Início de mudança de cor
50 - 400		Redução do módulo de deformação
535 - 550	Roxo	Fissuração profunda - friabilidade superficial
575	Vermelho pálido	Pipocamento dos grãos de quartzo
650	Cinza esbranquiçado	Perda das propriedades mecânicas
790 - 800		Lascamento do cobrimento das armaduras, com exposição até 25% da superfície da mesma
900	Amarelo alaranjado	Superfície pulverulenta
1000	Amarelo claro	

Fonte: Rosso (1975) apud Neville (1923)

De acordo com a Tabela 4.1 também apresentada por Morales, Campos e Faganello (2011), pode-se constatar visualmente uma alteração mais acentuada no concreto a partir de 535°C, sendo possível observar alteração de cor e surgimento de fissuras profundas.

A expansão volumétrica é um fenômeno que pode ser observado principalmente em agregados silicosos e areias, que contêm quartzo em sua composição, quando expostos a altas temperaturas. Aos 573°C há registros de expansão na ordem de 5,7% podendo ser verificadas fissuras ao redor dos agregados, em função desta expansão, como observado por Annerel e Taerwe (2009).

A zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados também sofre efeitos das altas temperaturas. O aquecimento do concreto é capaz de ocasionar a expansão térmica diferenciada entre os agregados e a pasta de cimento, ao modo que a pasta de cimento sofre o processo de retração devido o aquecimento e os agregados sofrem o processo de expansão, resultando assim em fissuras na zona de transição devido à maior fragilidade (HAGER, 2013).

Associado a fragilização da zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados verifica-se o processo de deslocamento do concreto ocasionando perda de resistência e redução da seção transversal dos elementos (BOLINA, 2016).

Khaliq e Khan (2015) investigaram as propriedades do concreto contendo aluminato de cálcio e constataram que a redução da resistência à compressão com aumento da temperatura foi menor que do concreto normal. Ambos os tipos de concreto apresentaram redução significativa da resistência à compressão acima de 600°C. Além disso, após observação visual foi possível verificar que o dano físico e microestrutural foi menor no concreto contendo agregados reciclados em comparação com concreto normal sob temperaturas elevadas.

Segundo Neville (1923), às temperaturas entre 600°C e 700°C ocorre a perda total e irreversível das propriedades mecânicas do concreto convencional.

Para Ahn, Jang e Lee (2016), apesar das propriedades mecânicas do concreto serem reduzidas consideravelmente em situações de incêndios, o concreto é um material que apresenta historicamente um bom desempenho em obras. Neste sentido, entre os materiais que demonstram uma boa resistência ao calor estão os tijolos refratários e cimento de aluminato de cálcio. Vale lembrar que o primeiro foi utilizado neste estudo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e os métodos utilizados para obtenção dos resultados previamente definidos nos objetivos deste trabalho.

5.1 MATERIAIS

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados para realização da pesquisa. Vale lembrar que os resíduos citados ao longo do corpo do trabalho foram incorporados como substituto dos agregados na fração miúda no processo de moldagem dos corpos de prova.

5.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II-F-32, de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP para aplicações gerais. As características físicas e mecânicas do cimento são apresentadas na Tabela 5.1, segundo os dados fornecidos pelo fabricante e segundo critérios da Norma ABNT NBR 11.578:1991.

Tabela 5.1 – Exigências físicas e mecânicas

	3 dias	7 dias	28 dias
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
Tempo de início de pega (horas)	$\geq 1,0$		
Tempo de fim de pega (horas)	$\leq 10,0$		

Fonte: ABNT NBR 11.578:1991

5.1.2 Areia

Como agregado na fração miúda natural, foi utilizada areia de origem quartzosa da região de Maringá/PR.

5.1.3 Brita

O agregado graúdo utilizado neste trabalho foi a brita comercializada como ½” de origem basáltica, proveniente da região de Maringá/PR.

5.1.4 Água

A água utilizada para realização da homogeneização dos insumos foi a disponível para o abastecimento local, fornecida por uma empresa que detém a concessão dos serviços públicos de saneamento básico em Maringá/PR, SANEPAR.

5.1.5 Aditivo

Para execução de algumas misturas de concreto com agregados reciclados na fração miúda foi necessária a utilização de um aditivo empregado para a produção de concretos conhecido como aditivo plastificante. Trata-se de um produto preparado à base de Lignosulfonato, cor marrom e densidade de 1,22 g/cm³. Segundo especificações, este produto é recomendado para casos onde há a necessidade de redução de água para concreto.

De forma a garantir aplicação correta do aditivo, o produto foi adicionado somente após a homogeneização de todos materiais que compõem o concreto junto com a segunda parte da água de amassamento a ser utilizada na mistura.

Vale lembrar que de forma a garantir as propriedades esperadas do concreto moldado, este material será dosado conforme descrições do fabricante, onde para cada 100 kg de cimento recomenda-se a utilização de 170 ml a 250 ml do produto.

5.1.6 Resíduos de tijolos refratários

Os resíduos foram coletados em uma indústria de celulose e papel localizada na região de Ponta Grossa/PR. Para o desenvolvimento desta pesquisa a empresa disponibilizou o total de 259 kg dos resíduos de tijolos refratários, conforme amostras apresentadas na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Tijolos refratários utilizados

(a) Tijolo refratário de fornos de cal

(b) Tijolo refratário de caldeiras

Fonte: Autor

Por meio da Figura 5.1 é possível verificar a presença de dois diferentes tipos de materiais. Segundo a empresa o material mais claro (Figura 5.1 a) trata-se de um produto desenvolvido principalmente para utilização na zona de queima dos fornos de cal. Apresenta alta refratariedade sob carga e baixa porosidade. A Tabela 5.2 apresenta algumas das propriedades do resíduo conforme especificações do fabricante.

Tabela 5.2 – Propriedades dos tijolos provenientes de fornos de cal

PROPRIEDADES QUÍMICAS	Unidade	Valor Típico
SiO ₂	(%)	34,0
Al ₂ O ₃	(%)	63,0
Fe ₂ O ₃	(%)	1,0
Na ₂ O+K ₂ O	(%)	0,4
PROPRIEDADES	Unidade	Valor Típico
Densidade Aparente	(g/cm ³)	2,6
Porosidade Aparente	(%)	14,0
Tensão de Esmagamento a Frio	(MPa)	69,0
Mudança Linear Permanente (1500°C x 5h)	(%)	0,3
Expansão Térmica (a 1200°C)	(%)	0,7
Refratariedade sob Carga (0,2MPa - T2)	(°C)	1700,0

Fonte: fornecido pelo fabricante

Já o material de cor mais escura apresentado na Figura 5.1 b, segundo a empresa, trata-se de material que também é capaz de suportar altas temperaturas mantendo suas propriedades

originais. A Tabela 5.3 apresenta algumas características do material segundo especificações do fabricante.

Tabela 5.3 – Propriedades dos tijolos provenientes de caldeiras

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Unidade	Valor Típico
Al ₂ O ₃	(%)	60,5
SiO ₂	(%)	35,5
TiO ₂	(%)	1,0
Fe ₂ O ₃	(%)	1,0
PROPRIEDADES	Unidade	Valor Típico
Densidade Aparente	g/cm ³	2,6
Tensão de Esmagamento a Frio	MPa	120

Fonte: fornecido pelo fabricante

Com base nos dados apresentados na Tabelas 5.2 e 5.3 observam-se altas porcentagens de alumina e sílica na composição de ambos os tijolos. Sendo assim, pode-se classificar tais produtos como tijolos refratários sílico aluminosos.

Devido à predominância e teores próximos de alumina e sílica na composição de ambos os tijolos, destaca-se que o resíduo utilizado neste trabalho foi composto pela mistura dos dois tipos de materiais apresentados nesta seção.

5.2 MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os ensaios de caracterização dos insumos para a produção dos concretos e os ensaios de desempenho dos mesmos.

5.2.1 Caracterização da areia

A caracterização do agregado miúdo baseou-se nos ensaios descritos nas normas:

- ABNT NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente;
- ABNT NBR NM 45:2006: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;

- ABNT NBR NM 248:2003: Agregados – Determinação da composição granulométrica.

5.2.2 Caracterização da brita

O agregado graúdo foi caracterizado por meio dos ensaios descritos nas normas:

- ABNT NBR NM 45:2006: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- ABNT NBR NM 248:2003: Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- ABNT NBR NM 53:2003 – Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

5.2.3 Processamento dos resíduos refratários

O processamento dos resíduos coletados na indústria de celulose e papel aconteceu em duas etapas. Primeiramente resíduos de tijolos refratários foram encaminhados a uma central de reciclagem de resíduos da construção civil (RCC), localizada na cidade de Maringá-PR. Tal local é equipado com triturador de entulhos. A Figura 5.2 ilustra o exemplar utilizado para o processamento primário dos materiais. Trata-se de um reciclador de resíduos da construção civil, modelo Queixada 300 PR. Nesta etapa foi produzido o agregado graúdo e miúdo reciclados.

Figura 5.2 – Máquina para processamento primário dos resíduos



Fonte: Autor

De forma a obter após a britagem do material os agregados reciclados na fração miúda (< 4,8 mm), conforme prescrito na ANBT NBR 7.217:1987, os materiais foram encaminhados ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM) e processados novamente com auxílio de um triturador da Máquinas Renard, modelo MRa 180 x 200, conforme Figura 5.3.

Figura 5.3 – Máquina para processamento secundário dos resíduos



Fonte: Autor

A validação do emprego destes agregados reciclados foi avaliada por meio da ABNT NBR 15.116:2004.

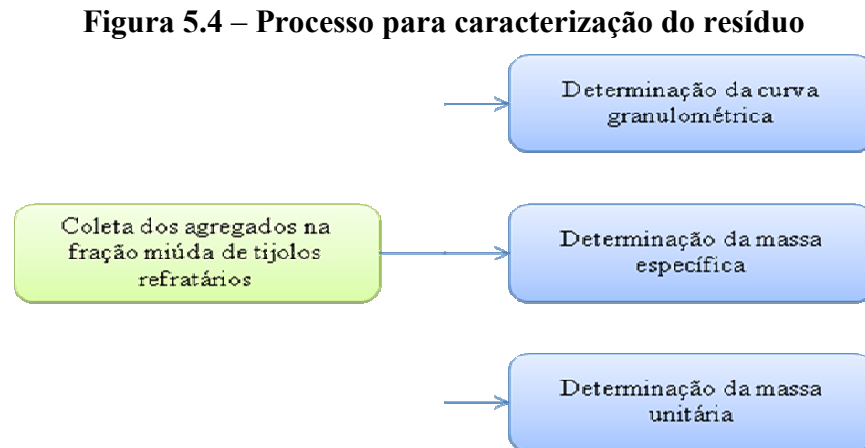
Os produtos gerados após o processo de reciclagem dos materiais (agregados reciclados) na fração miúda foram submetidos a ensaios de forma permitir a caracterização ideal dos mesmos.

5.2.4 Caracterização dos resíduos de tijolos refratários

Os resíduos foram coletados em abril de 2017 e estocados em barricas plásticas de forma garantir proteção contra umidade e impurezas. Vale lembrar que a estocagem foi feita em um ambiente limpo, seco e livre de qualquer impureza ou contato.

Desta forma, o material refratário utilizado na pesquisa foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas. A caracterização física dos materiais contou com a realização da

análise granulométrica seguindo preceitos da ABNT NBR NM 248:2003, determinação da massa específica conforme ABNT NBR NM 52:2009 e determinação da massa unitária conforme ABNT NBR NM 45:2006. O processo desta etapa é simplificado na Figura 5.4.



Fonte: Autor

5.2.5 Difração de raio-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX)

A análise das fases mineralógicas da mistura dos dois resíduos foi realizada utilizando um difratômetro Shimadzu, modelo D6000, com fonte de cobre, voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA, conforme Figura 5.5. De forma realizar o ensaio utilizou-se um programa com intervalo de varredura 5 a 80° (ângulo de 2 θ), com passos de 0,02° para ângulo de detecção. Antes de serem colocadas no difratômetro as amostras foram passadas numa peneira #200 (0,075mm), para na sequência as amostras serem preparadas na lâmina e permitir a análise.

Figura 5.5 – Difratômetro



Fonte: Autor

A análise química do material foi realizada por meio do equipamento ZSX-Primus da Rigaku, com tubo de ródio. Para a leitura no equipamento a amostra foi moldada em formato de pastilha por meio do auxílio de um pastilhador e uma prensa hidráulica. A análise é realizada a partir de uma configuração *default* do equipamento, para identificar a presença de óxidos. O equipamento utilizado pode ser verificado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Espectrômetro



Fonte: Autor

5.2.6 Preparo do concreto

De forma garantir a perfeita homogeneização dos componentes do concreto, para o preparo da mistura com consistência plástica foi utilizado uma betoneira com capacidade de 400 litros. A mistura dos materiais procedeu-se obedecendo a seguinte ordem:

- 1º - Com a betoneira previamente umidificada, lançou-se inicialmente os agregados (areia e brita), juntamente com metade da massa total de água;
- 2º - Foi aplicado o tempo de mistura dos materiais de 1 minuto;
- 3º - Na sequência foram lançados o cimento e o restante da massa de água;
- 4º - Os materiais foram misturados por mais 3 minutos.

A quantidade de água foi controlada tendo como base a consistência desejada (70 ± 10 mm), determinada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*). Tal consistência é indicada para um concreto plástico. Vale lembrar que, na dosagem dos concretos, o valor do abatimento foi fixado em 70 ± 10 mm. Assim, foi realizado a incorporação de aditivo

plastificante no concreto quando necessário, conforme recomendações do fabricante. Após a colocação do aditivo plastificante os materiais foram misturados por mais 5 minutos.

Conforme adotado por Leite (2001), nesta pesquisa a compensação do volume de material foi realizada para os traços que continham resíduos de tijolos refratários, uma vez que a massa específica do resíduo de refratários é maior que a massa específica da areia. Desta forma é possível assegurar a quantidade correta de cimento e água para produzir misturas equivalentes ao concreto referência. A compensação foi calculada conforme a equação 5.1

$$M_{RTR} = M_{areia} \cdot \frac{\gamma_{RTR}}{\gamma_{areia}} \quad (5.1)$$

onde,

M_{RTR} = massa dos resíduos de tijolos refratários (kg);

M_{areia} = massa da areia (kg);

γ_{RTR} = massa específica dos resíduos de tijolos refratários (kg/dm³);

γ_{areia} = massa específica da areia (kg/dm³).

5.2.6.1 Determinação do traço referência

Para o presente trabalho foram estabelecidos, inicialmente, os seguintes parâmetros de dosagem, Tabela 5.4:

Tabela 5.4 – Parâmetros iniciais de dosagem

Resistência característica (f_{ck})	$f_{ck} > 25$ MPa
Desvio padrão (S_d)	4 MPa (condição A)
Relação água/cimento (em massa)	≤ 60 mm (Concreto armado com classe de agressividade II – ABNT NBR 6.118:2014);
<i>Slump</i>	70 ± 10 mm
Traço (REF)	1,00 : 2,06 : 2,94 : 0,55 (cimento : areia : brita : água)
Umidade dos agregados	0%

Fonte: Autor

O traço a ser utilizado para a composição do concreto referência (REF) foi baseado a partir do estudo realizado por Nunes (2009), que analisou a influência da substituição parcial do cimento Portland por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto. Segundo o autor, o traço apresentado para concreto com fator a/c de 0,55 apresenta resistência característica estimada à compressão de 32,80 MPa aos 28 dias, ficando acima de 25 MPa, indicado segundo a norma para concreto exposto à classe de agressividade II (ABNT NBR 6.118:2014).

Após a etapa anterior (caracterização dos materiais) foram realizadas dosagens de concretos conforme Tabela 5.5 e na sequência feito moldagem e cura dos corpos de prova, conforme ABNT NBR 5.738:2015.

Tabela 5.5 – Parâmetro de dosagens dos concretos

Nomenclatura	Teor de resíduos de tijolos refratários
REF	0%
25RTR	25%
50RTR	50%
75RTR	75%
100RTR	100%

Fonte: Autor

5.2.6.2 Substituição da areia por resíduos de tijolos refratários

De posse das características do traço de referência, nesta etapa foi dado início à substituição dos agregados naturais na fração miúda por agregados reciclados com emprego de teores de substituição crescentes, em massa. Os incrementos para substituição dos agregados naturais foram de 25% até se atingir o limite de 100%. Desta forma, levou-se em conta as taxas de 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100%.

Vale lembrar que para tais traços foram mantidos fixos os parâmetros de dosagem do traço de referência, variando-se apenas o consumo de plastificante, se necessário. Esta variação se justifica à medida que tais traços apresentem uma consistência ideal obtida pelo ensaio no tronco de cone (*Slump Test*).

5.2.7 Ensaios no concreto à temperatura ambiente

Visando verificar como objetivo primordial a aplicabilidade do resíduo de tijolos refratários na produção de concreto estrutural, os concretos, tanto no traço referência quanto nos traços com as substituições foram submetidos aos ensaios conforme listados abaixo:

- Abatimento no tronco de cone;
 - Massa específica;
- } estado fresco
- Resistência à compressão;
 - Módulo de elasticidade; e
 - Absorção de água.
- } estado endurecido

5.2.7.1 Tronco de cone (*Slump Test*)

A determinação da consistência do concreto realizada pelo abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) foi realizada conforme a ABNT NBR NM 67/1998. De forma a garantir a característica plástica dos concretos, o abatimento foi fixado em 70 ± 10 mm. A Figura 5.7 registra a realização do ensaio em um dos traços.

Figura 5.7 – Realização do ensaio de abatimento de tronco



Fonte: Autor

5.2.7.2 Massa específica

Com a utilização de uma balança e um recipiente metálico apropriado foi realizado o ensaio massa específica, seguindo de acordo com a ABNT NBR 9.833:2008. A Figura 5.8 mostra a realização do ensaio.

Figura 5.8 – Determinação da massa específica do concreto no estado fresco



Fonte: Autor

5.2.7.3 Resistência à compressão

Realizada a etapa anterior de determinação dos traços e teste de consistência, com teores crescentes de substituição do agregado miúdo natural por agregados miúdos reciclados de tijolos refratários, foram moldados para cada traço, 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm, para cada idade de rompimento (3, 7, 14 e 28 dias). Decorrido 24 horas da moldagem dos corpos de prova, estes foram desmoldados e curados em câmara úmida. Ao final desta etapa, os corpos de prova foram comprimidos axialmente até a ruptura, conforme procedimentos de ensaio da ABNT NBR 5.739:2007. Vale lembrar que os ensaios mecânicos de resistência à compressão foram realizados com auxílio de um prensa hidráulica de capacidade de carga de 100 toneladas do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM), conforme mostra a Figura 5.9.

Figura 5.9 – Prensa hidráulica de 100 toneladas



Fonte: Autor

5.2.7.4 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade foi obtida aos 28 dias de idade para cada traço de substituição atendendo às recomendações da ABNT NBR 8.522:2008. A Figura 5.10 apresenta o equipamento utilizado na execução dos ensaios. Vale lembrar que os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil do Senai de Maringá/PR.

Figura 5.10 – Prensa universal



Fonte: Autor

Trata-se de uma máquina universal com acionamento eletromecânico que permite vários ensaios mecânicos.

5.2.7.5 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Realizou-se também, aos 28 dias, ensaios para determinar a absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos, conforme ABNT NBR 9.778:2005 versão corrigida 2:2009.

5.2.8 Exposição térmica dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm por 20 cm, utilizando os traços definidos anteriormente de concretos confeccionados com resíduos de tijolos silico aluminosos e sem o mesmo. Após 28 dias de idade 45 corpos de prova foram levados a 110°C, 600°C e 900°C. A elevação da temperatura a 110°C se deu em estufa do Laboratório do Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente (GEMA) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) até os 45 dias de idade, o forno utilizado pode ser verificado na Figura 5.11. Vale lembrar que todos os corpos de prova foram submetidos à temperatura de 110°C antes da exposição a 600°C e 900°C.

Figura 5.11 – Forno estufa operado a 110°C



Fonte: Autor

Para as temperaturas 600°C e 900°C foram utilizados fornos elétricos tipo mufla. A mufla utilizada a 600°C foi um Quimis – Q318M24 220V 3720 W do Laboratório do Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente (GEMA) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Figura 5.12.

Figura 5.12 – Forno mufla operado a 600°C



Fonte: Autor

Como a mufla utilizada a 600°C não operava por meio de rampa de aquecimento, o controle de calor até a temperatura desejada se deu conforme orientações do fabricante, ou seja, após 40 minutos.

Já a mufla utilizada a 900°C foi um EDG 7000 do Laboratório pertencente ao Departamento de Química da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Figura 5.13.

Figura 5.13 – Forno mufla operado a 900°C



Fonte: Autor

A taxa utilizada para carga térmica a 900°C foi de 5°C/minuto. Vale lembrar que todos os corpos de prova submetidos a elevadas temperaturas em forno mufla depois de atingir a temperatura alvo foram mantidos na mesma por um período de 1 hora. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

5.2.8.1 Resistência à compressão

Aos 45 dias de idade os corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas foram ensaiados à compressão, para comparação com os resultados dos testes anteriormente realizados com os corpos de prova sem tratamento térmico. Os corpos de prova foram comprimidos axialmente até a ruptura, conforme procedimentos de ensaio da ABNT NBR 5.739:2007.

5.2.8.2 Perda de massa

Após os 28 dias de idade foi realizado o aferimento dos valores de massa de todos os corpos de prova após serem submetidos a elevação de temperatura a 600°C e 900°C. Com o auxílio de uma balança digital, conforme apresentado na Figura 5.14, os valores observados de massa para cada corpo de prova foram registrados no dia seguinte após a elevação da temperatura nas muflas, e o resfriamento. Vale lembrar que este ensaio foi realizado de forma a permitir a análise qualitativa da influencia da temperatura nos concretos.

Figura 5.14 – Balança digital de precisão utilizada



Fonte: Autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos na etapa experimental deste trabalho.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

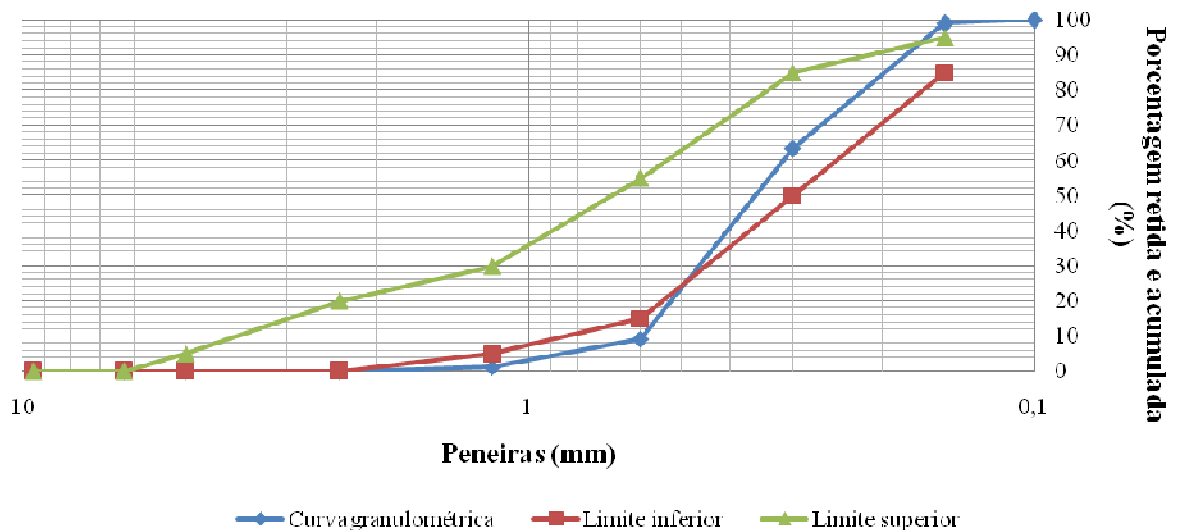
Os resultados da caracterização do agregado natural miúdo estão apresentados na Tabela 6.1. A Tabela 6.1 expõe a distribuição granulométrica do material e as delimitações referentes aos limites superior e inferior da zona utilizável estipulados pela ABNT NBR 7.211:2009.

Tabela 6.1 – Caracterização física da areia

Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Absorção de Água (%)	Dimensão Máxima (mm)	Módulo de Finura
2,65	1,46	0,39	1,20	1,73

Fonte: Autor

Figura 6.1 – Curva de distribuição granulométrica da areia



Fonte: Autor

De acordo com o módulo de finura pode-se enquadrar a areia como pertencente a zona utilizável inferior, conforme ABNT NBR 7211:2009. Ainda, segundo a mesma norma, a partir da curva granulométrica obtida tem-se que a areia é classificada como fina.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DA BRITA

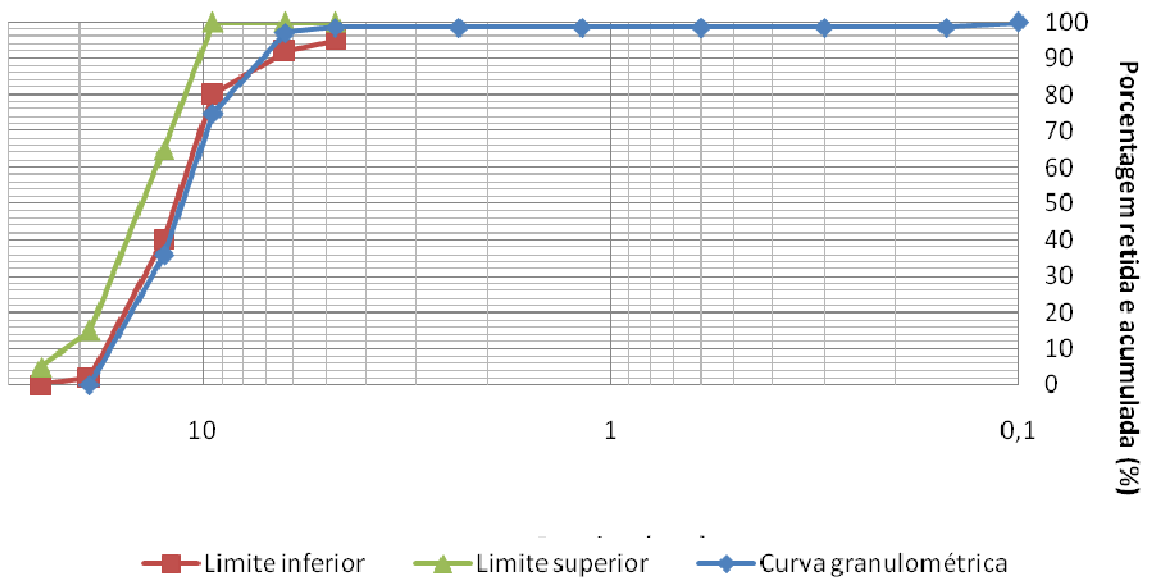
De forma análoga a caracterização da areia, os resultados da caracterização do agregado natural graúdo estão apresentados na Tabela 6.2. A Figura 6.2 expõe a distribuição granulométrica do material.

Tabela 6.2 – Caracterização física da brita

Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Absorção de Água (%)	Dimensão Máxima (mm)	Módulo de Finura
2,77	1,45	3,12	19	6,66

Fonte: Autor

Figura 6.2 – Curva de distribuição granulométrica da brita



Fonte: Autor

Assim, de acordo com a ABNT NBR 7211:2009 pode-se verificar que o melhor limite em que se enquadra o agregado graúdo utilizado se encontra na zona granulométrica 9,5/25.

6.3 PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS REFRAATÁRIOS

A Figura 6.3 apresenta o resultado após conclusão da primeira etapa do processamento dos resíduos de tijolos refratários. Com base na imagem percebe-se que o material produzido

possui características de agregado graúdo. Desta forma o agregado reciclado foi novamente processado.

Figura 6.3 – Resultado dos tijolos refratários após trituração



Fonte: Autor

A Figura 6.4 mostra o resultado final do processamento dos resíduos, ou seja, após conclusão da segunda etapa do processamento. O processamento se deu de forma que agregado reciclado produzido fosse capaz de passar na peneira 4,8 mm.

Figura 6.4 – Resultado final do agregado miúdo reciclado triturado



Fonte: Autor

Por fim os produtos obtidos foram estocados em barricas plásticas devidamente vedadas de forma a protegê-los e assegurar a conservação até o momento até a utilização. O acondicionamento dos materiais pode ser verificado na Figura 6.5.

Figura 6.5 – Acondicionamento dos resíduos



Fonte: Autor

6.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE TIJOLOS REFRAATÁRIOS

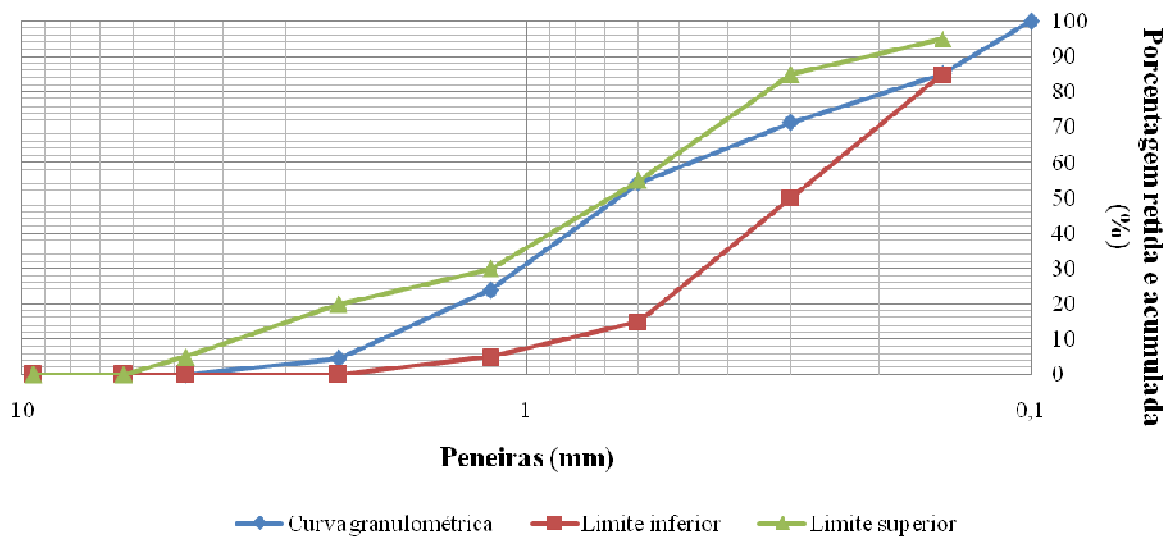
Na Tabela 6.3 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de caracterização do agregado miúdo artificial. Já a Figura 6.6 mostra a distribuição granulométrica do material reciclado.

Tabela 6.3 – Caracterização física dos resíduos de tijolos refratários

Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Dimensão Máxima (mm)	Módulo de Finura
2,94	1,47	2,36	2,39

Fonte: Autor

Figura 6.6 – Curva de distribuição granulométrica do agregado reciclado



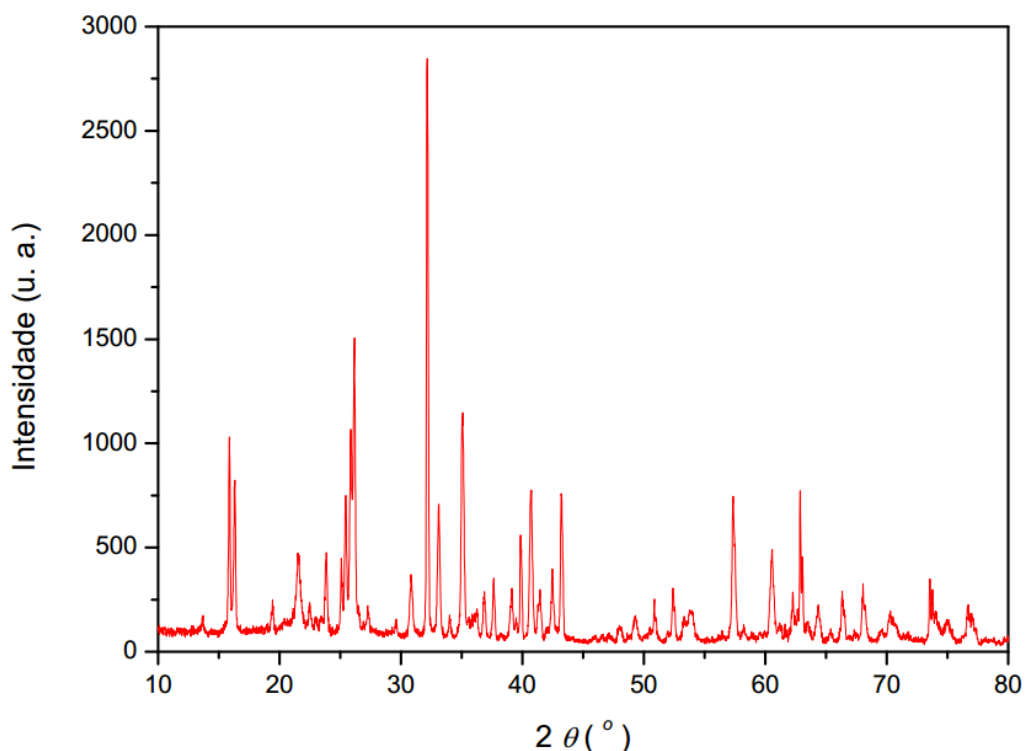
Fonte: Autor

O resíduo reciclado, conforme ABNT NBR 7.211:2009, enquadrou-se na zona ótima.

6.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

O resultado apresentado no ensaio de difração de raios-X (DRX) dos resíduos de tijolos refratários pode ser verificado na Figura 6.7.

Figura 6.7 – Difratoograma de raios-X dos resíduos refratários



Fonte: Autor

De acordo com espectro obtido a partir do ensaio (Figura 6.7), pode-se afirmar que os resíduos analisados apresentam características de um material cristalino. Os planos cristalinos do sistema foram identificados por meio de comparações com padrões de difrações registradas no banco de dados experimentais da plataforma ICSD – Inorganic Crystal Structure Database. Assim, após realizado as comparações verificou-se a presença de uma fase altamente cristalina na forma de silicato de alumínio identificados no difratograma de raios-X como Cianite (Al_2SiO_5) ou Mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), como possibilidades. A presença do silicato de alumínio se deve ao fato de os resíduos terem sido anteriormente calcinados nas caldeiras e fornos antes do descarte como resíduos.

Os compósitos químicos foram quantificadas na análise química por espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX), conforme pode-se verificar na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Análise química FRX dos resíduos refratários

Composto químico	% em massa
Na ₂ O	2,37
MgO	0,293
Al ₂ O ₃	53,4
SiO ₂	31,7
P ₂ O ₅	1,25
SO ₃	1,97
K ₂ O	1,77
CaO	0,959
TiO ₂	2,9
Cr ₂ O ₃	0,467
Fe ₂ O ₃	2,54
ZnO	0,0145
SrO	0,0441
Y ₂ O ₃	0,011
ZrO ₂	0,317
Nb ₂ O ₅	0,035
PbO	0,0324

Fonte: Autor

Por meio dos resultados obtidos na análise química, pode-se verificar que a composição química preponderante no agregado reciclado são óxidos de alumínio e silício. Vale lembrar que tais elementos foram identificados na análise mineralógica dos resíduos por difração de raios-X.

Percebe-se ainda, por meio da Tabela 6.4, baixos teores dos óxidos Mg, P, Na e K. Segundo Lima (2014) a presença destes elementos pode influenciar na aceleração do tempo de pega de argamassas e concretos. Ainda, esse autor atenta sobre cuidados com controle sobre o alto teor de MgO, em matérias-primas utilizadas na fabricação de argamassas que pode acarretar o efeito de expansão da estrutura e trincas no produto.

6.6 PREPARO DO CONCRETO

A Tabela 6.5 apresenta os dados referentes à confecção dos traços com teores crescentes de substituição do agregado miúdo.

$$M_{RTR} = M_{areia} * \frac{Y_{RTR}}{Y_{areia}} \quad (5.1)$$

$$M_{RTR} = M_{areia} * \frac{2,94}{2,65}$$

$$M_{RTR} = M_{areia} * 1,11$$

Tabela 6.5 – Proporção de mistura dos concretos

Traço	Teor de agregado reciclado (%)	fa/c	Proporção de mistura (kg/traço)					Consumo de plastificante (% sobre a massa de cimento)
			Cimento	Água	Brita	Agregado miúdo		
						Natural	Reciclado	
REF	0%	0,53	24,16	12,92	71,04	49,78	0,00	0,00
25RTR	25%	0,55	24,16	13,36	71,04	37,33	13,81	0,00
50RTR	50%	0,55	24,16	13,38	71,04	24,89	27,61	0,12
75RTR	75%	0,56	24,16	13,44	71,04	12,44	41,42	0,16
100RTR	100%	0,60	24,16	14,41	71,04	0,00	55,22	0,30

Fonte: Autor

Com base na massa específica da areia e dos resíduos, apresentadas na Tabela 6.1 e 6.3, respectivamente, a compensação dos RTR foi feita lançando mão da equação (5.1):

Assim, com o objetivo de avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por agregados reciclados de tijolos refratários sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido, e ainda avaliar as possíveis diferenças nas resistências a compressão axial devido a elevação temperatura dos corpos de prova, foram moldados corpos de prova cilíndricos de concreto de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura destinados aos ensaios. A Tabela 6.6 apresenta um resumo dos traços confeccionados e os respectivos ensaios executados.

Tabela 6.6 – Programa experimental

Traço	Ensaio	n° de corpos de prova / traço	Idade do ensaio	Total de corpos de prova
REF; 25RTR; 50RTR; 75RTR; 100RTR	Compressão axial	3 corpos de prova	3 dias	15 corpos de prova
		3 corpos de prova	7 dias	15 corpos de prova
		3 corpos de prova	14 dias	15 corpos de prova
		3 corpos de prova	28 dias	15 corpos de prova
	Tração por compressão diametral	3 corpos de prova	28 dias	15 corpos de prova
	Módulo de elasticidade	3 corpos de prova	28 dias	15 corpos de prova
	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	3 corpos de prova	28 dias	15 corpos de prova
	Compressão axial - 110 °C	3 corpos de prova	45 dias	15 corpos de prova
	Compressão axial - 600 °C	3 corpos de prova	45 dias	15 corpos de prova
	Compressão axial - 900 °C	3 corpos de prova	45 dias	15 corpos de prova
Testemunho	3 corpos de prova	45 dias	15 corpos de prova	

Fonte: Autor

De acordo com a Tabela 6.6, foram moldados no total 165 corpos de prova com diferentes teores de agregados reciclados de tijolos refratários como substituto da areia. Uma parcela das amostras preparadas nesta pesquisa pode ser verificada na Figura 6.8.

Figura 6.8 – Corpos de prova moldados

Fonte: Autor

Após a moldagem dos corpos de prova os mesmos foram etiquetados para possibilitar o rastreamento. Também foi realizada a identificação de cada corpo de prova com giz de cera, após a desmoldagem. Na sequência, os corpos de prova permanecerem em câmara úmida, Figura 6.9.

Figura 6.9 – Corpos de prova após 24 horas da moldagem



(a) corpos de prova desmoldados

(b) Cura em câmara úmida de corpos de prova

Fonte: Autor

6.7 ENSAIOS NO CONCRETO FRESCO

Nesta etapa são apresentados resultados referente a trabalhabilidade dos concretos e a qualidade dos mesmos.

6.7.1 Tronco de cone (*Slump Test*)

A Tabela 6.7 apresenta os resultados do ensaio com os concretos no estado fresco.

Tabela 6.7 – Abatimento do tronco de cone

Traço	Teor de agregado reciclado (%)	<i>Slump</i> (mm)
REF	0	65
25RTR	25	60
50RTR	50	70
75RTR	75	60
100RTR	100	65

Fonte: Autor

Com base nos resultados obtidos verifica-se que os ensaios de abatimento do tronco de cone em todos os traços foram atendidos. De forma a garantir a consistência e aplicabilidade dos concretos, nas amostras 50RTR e 75RTR houve a necessidade do uso de aditivo plastificante. Nas amostras 100RTR, além do uso de aditivo plastificante, foi realizado ajuste no fator água/cimento.

6.7.2 Massa específica

A Tabela 6.8 apresenta os resultados do ensaio de massa específica com os concretos no estado fresco.

Tabela 6.8 – Massa específica no estado fresco

Traço	Teor de agregado reciclado (%)	Massa Específica (g/cm³)
REF	0	2,44
25RTR	25	2,43
50RTR	50	2,49
75RTR	75	2,47
100RTR	100	2,4

Fonte: Autor

A massa específica não apresentou diferenças significativas entre os traços de concretos produzidos. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a variação verificada se deve ao fato desta propriedade, no concreto no estado fresco, depender da massa específica e porosidade dos agregados, como textura, forma e tamanho das partículas.

6.8 ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO – TEMPERATURA AMBIENTE

São apresentados na sequência os valores experimentais obtidos referentes aos ensaios: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos.

6.8.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial são apresentados na Tabela 6.9.

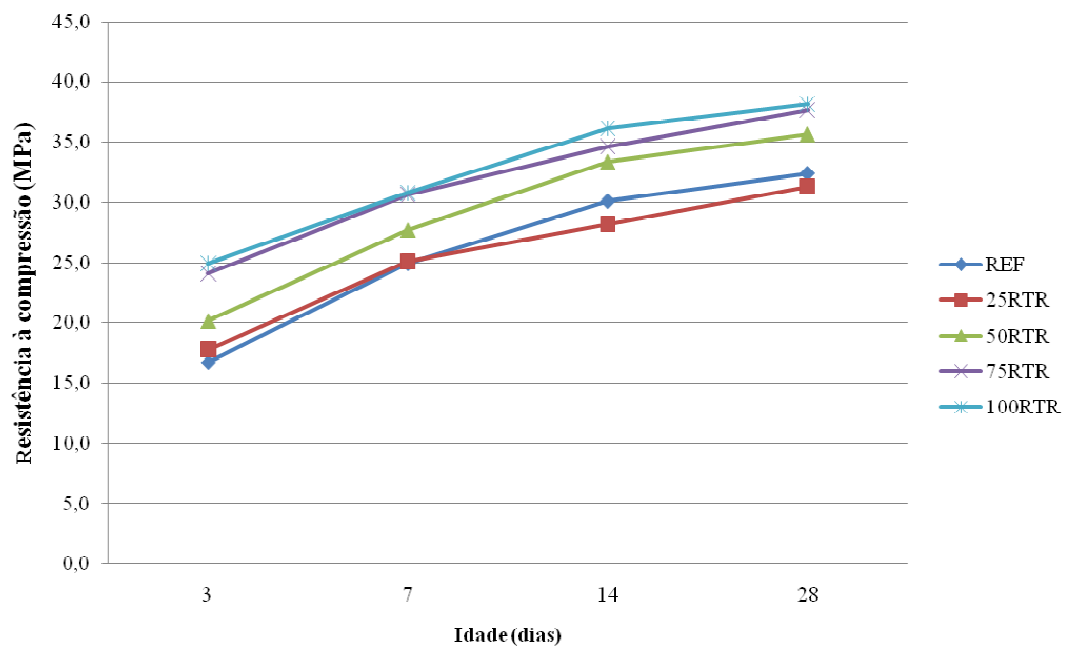
Tabela 6.9 – Resistência à compressão

Traço	Resistência à compressão (MPa)							
	3 dias		7 dias		14 dias		28 dias	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
REF	16,73	1,10	24,93	0,23	30,10	0,96	32,40	0,50
25RTR	17,77	1,53	25,10	1,13	28,20	1,04	31,30	0,35
50RTR	20,17	0,51	27,70	0,28	33,35	1,06	35,65	2,70
75RTR	24,07	1,17	30,60	0,26	34,60	0,87	37,63	0,12
100RTR	24,93	1,01	30,80	1,51	36,13	1,97	38,13	0,95

Fonte: Autor

A Figura 6.10 apresenta a representação gráfica indicando a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo.

Figura 6.10 – Evolução da resistência à compressão das amostras ao longo do tempo



Fonte: Autor

Os resultados mostram que na temperatura ambiente todas as composições apresentam valores crescentes de resistência à compressão em relação a resistência inicial. Aos 28 dias de idade todos os traços, com exceção do traço 25RTR, apresentaram resultados de compressão axial superiores aos obtidos pelo traço referência. Nesta idade, o maior aumento da resistência à compressão ocorreu no traço 100RTR, com o aumento sendo de 16% em relação ao concreto REF. Estes resultados representam a possibilidade de o RTR possuir propriedades cimentícia, conforme observado por Wada (2010) ao trabalhar com resíduos com matriz

semelhante aos utilizados nesta pesquisa. Acredita-se que a resistência à compressão do traço 25RTR aos 28 dias de idade foi inferior ao traço REF devido à adsorção de água dos agregados reciclados de tijolos refratários. Vale lembrar que para confecção das amostras 25RTR não foi necessário a utilização de plastificante. Para Debieb e Kenai (2008) o uso deste aditivo neste tipo de mistura (com alto teor de absorção ou adsorção) traz um efeito positivo, diminuindo o teor de água, e conseqüentemente aumentando a resistência à compressão.

6.8.2 Módulo de elasticidade

Foram feitos ensaios de módulo de elasticidade para todos os traços em estudo, aos 28 dias de idade. As médias dos resultados de cada traço são apresentadas na Tabela 6.10.

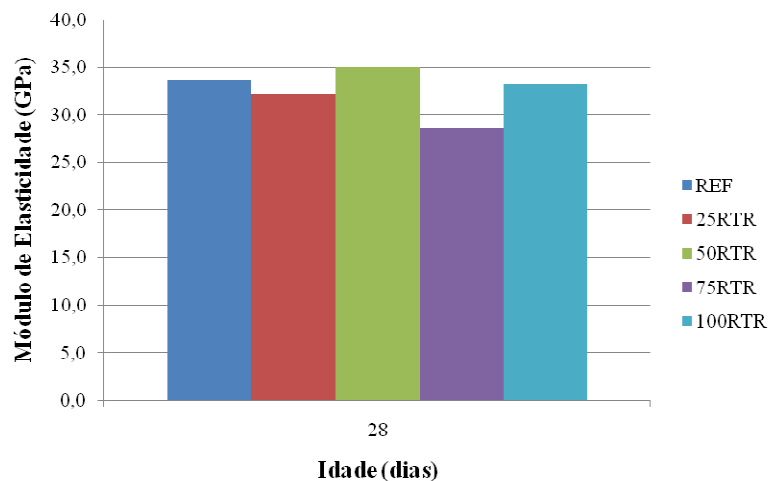
Tabela 6.10 – Módulo de elasticidade aos 28 dias

Traço	Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Média	Desvio Padrão
REF	33,63	3,67
25RTR	32,17	0,90
50RTR	35,10	2,97
75RTR	28,63	1,16
100RTR	33,23	2,40

Fonte: Autor

A representação gráfica dos resultados está ilustrada na Figura 6.11.

Figura 6.11 – Comportamento do módulo de elasticidade das amostras



Fonte: Autor

Aos 28 dias de idade foi avaliado o módulo de elasticidade das composições. O maior módulo de elasticidade pôde ser verificado no nível de substituição de agregados miúdos 50%, apresentando uma melhoria de 4,46% em relação a amostra REF.

Estes resultados traduzem de forma clara as afirmações de Baradaran-Nasiri e Nematzadeh (2017) ao trabalharem com incorporação de resíduos de tijolos refratários em concreto. Segundo os autores, o tipo e a resistência à compressão dos agregados do concreto são apenas alguns dos fatores que interferem no módulo de elasticidade. Portanto, observa-se que as alterações regulares no módulo de elasticidade devido aos níveis de substituição de agregados miúdos de refratários não podem ser esperados. Assim como ocorreu na resistência à compressão (variações irregulares), tendo-se que à medida que o nível de substituição aumentava, o valor do módulo não respondia às mesmas variações.

6.8.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados objeto de tais ensaios realizados estão presentes na Tabela 6.11.

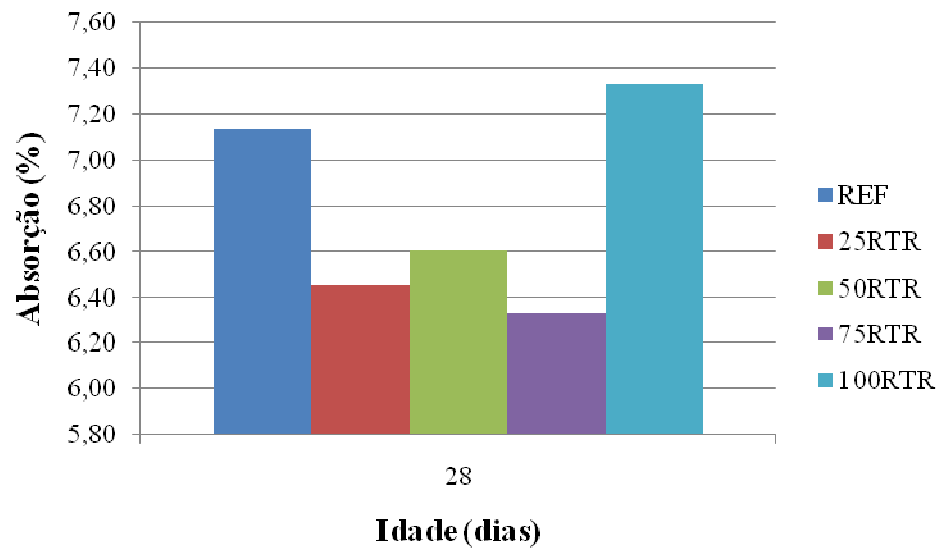
Tabela 6.11 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos

Traço	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (g/cm ³)	Massa Específica real (g/cm ³)
REF	7,13	<i>0,00</i>	16,25	2,28	2,72
25RTR	6,45	<i>-9,53</i>	14,94	2,32	2,72
50RTR	6,61	<i>-7,32</i>	15,41	2,33	2,76
75RTR	6,33	<i>-11,21</i>	14,84	2,34	2,75
100RTR	7,33	<i>2,74</i>	16,96	2,32	2,79

Fonte: Autor

Destaca-se que os valores apresentados em *itálico* na Tabela 6.11 representam as mudanças nas porcentagens de absorção em comparação com o traço referência.

A seguir com base nos valores obtidos de absorção de água apresentados na Tabela 6.11 foi elaborada a representação gráfica conforme Figura 6.12.

Figura 6.12 – Absorção de água aos 28 dias

Fonte: Autor

Como base nos dados obtidos na Tabela 6.11 e Figura 6.12, têm-se que as amostras 25RTR, 50RTR e 75RTR apresentam uma menor porcentagem de absorção de água quando comparados com traço REF. Devido à proximidade dos valores encontrados no ensaio de absorção de água entre o traço REF e o traço 100RTR, pode-se dizer que a ambos possuem o mesmo parâmetro de absorção. Para Baradaran-Nasiri e Nematzadeh (2017) este comportamento é atribuído devido a boa qualidade dos materiais utilizados na produção destes tipos de tijolos refratários.

Assim, o concreto com 75% de incorporação dos resíduos de tijolos refratários em substituição ao agregado miúdo apresentou a menor taxa de absorção entre as amostras, sendo 11,21% inferior em relação ao traço controle. Já na proporção de 100% de substituição observou-se um acréscimo de 2,74% na absorção quando comparado com amostra REF.

Desta forma é possível verificar que a substituição da areia pelo resíduo refratário, em vários teores, contribui para o refinamento dos poros das partículas granulares presentes na mistura antes do início da hidratação do cimento, melhorando assim a zona de interface entre o agregado e a matriz. Assim, o empacotamento das partículas é favorecido enquanto a permeabilidade e porosidade capilar são reduzidas, como sugerem Castro e Pandolfelli (2009)

6.9 ANÁLISES NO CONCRETO APÓS A ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

Tendo-se realizado todos os ensaios à temperatura ambiente com os traços de concretos definidos anteriormente, a partir das mesmas misturas as últimas verificações deste trabalho nas amostras endurecidas e após expostas a temperaturas foram:

- Análise da perda de massa;
- Análise visual das amostras após a elevação de temperatura; e
- Análise da resistência mecânica à compressão.

6.9.1 Resistência à compressão

Para a análise do comportamento da resistência à compressão de concretos com agregados reciclados após a exposição térmica, apresenta-se na Tabela 6.12 os resultados.

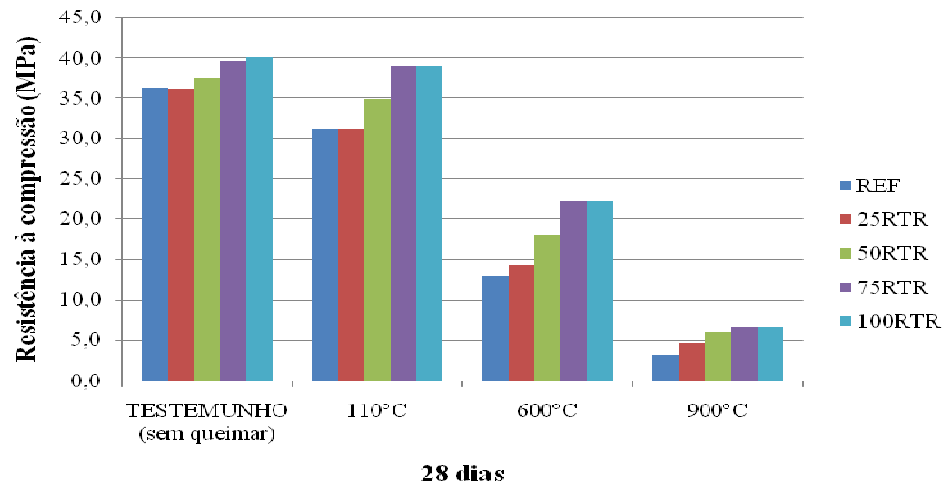
Tabela 6.12 – Resistência à compressão após exposição a temperaturas

Traço	Resistência à compressão (MPa)			
	Temperatura de queima			
	TESTEMUNHO (temp. ambiente)	110°C	600°C	900°C
REF	36,4	31,1	12,9	3,2
25RTR	36,3	31,2	14,2	4,7
50RTR	37,6	34,9	18,1	5,9
75RTR	39,6	38,9	22,3	6,7
100RTR	40,1	39,0	22,2	6,6

Fonte: Autor

A Figura 6.13 exibe a representação gráfica do desempenho da resistência à compressão em função das temperaturas aplicadas para cada teor de resíduos de tijolos refratários substituídos.

Figura 6.13 – Comportamento da resistência à compressão das amostras expostas a temperaturas



Fonte: Autor

Os resultados mostram que à temperatura de 110°C houve menor redução da resistência à compressão em relação às amostras designadas como “testemunho” (sem efeito da temperatura) por parte do grupo 75RTR, e a maior redução da resistência à compressão por parte do grupo REF, com redução de 1,77% e 14,44%, respectivamente. Os danos causados ao concreto foram devido ao surgimento de fissuras na microestrutura pela retração da pasta causada pela perda de água contida nos poros do concreto por evaporação. Situação semelhante foi observada por Costa e Silva (2002).

Devido à possível formação parcial de ligações cerâmicas dos resíduos de tijolos refratários, à temperatura de 600°C, verificou-se um comportamento adequado das amostras contendo os agregados reciclados. Ou seja, percebe-se que à medida que a porcentagem substituída de areia por agregado reciclado aumenta, a taxa de redução na resistência à compressão diminui para todos os grupos. Este resultado está de acordo com os encontrados por Xiao et al. (2013).

Após comparação com as amostras designadas como testemunhas, os gráficos de resistência à compressão, após a queima a 900°C, demonstram que houve considerável perda de resistência mecânica, onde os corpos de prova REF, 25RTR, 50RTR, 75RTR e 100RTR perderam praticamente toda resistência mecânica. Segundo Lima (2014), isto pode ter ocorrido pelo comprometimento das ligações de aderência hidráulica do cimento com os agregados. Apesar desta redução, verificou-se que as resistências à compressão das amostras contendo níveis de substituição de 25%, 50%, 75% e 100% de resíduos de tijolos refratários, após serem submetidas a 900°C apresentaram melhor comportamento em relação às amostras

REF, sendo os resultados na ordem de 45,31%, 85,42%, 109,38% e 107,29%, respectivamente.

6.9.2 Perda de massa

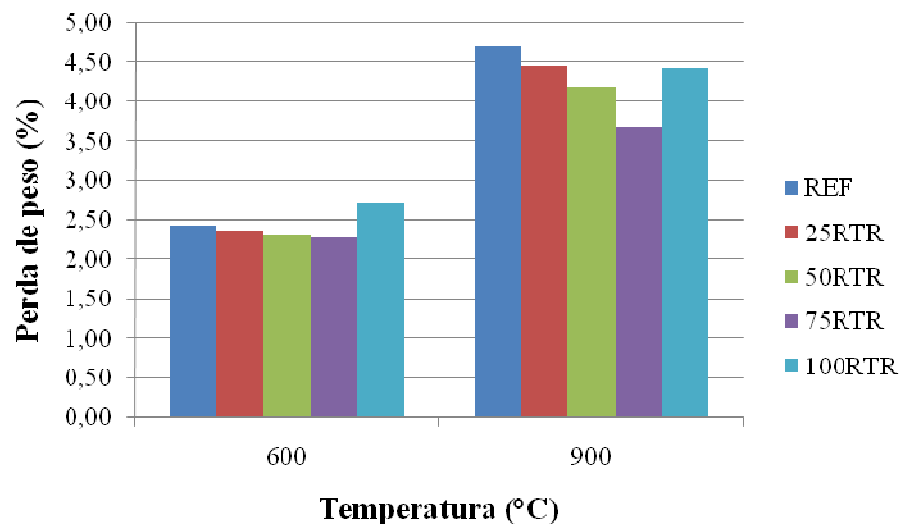
Os valores encontrados de perda de massa das amostras após expostas a 600°C e 900°C são apresentados na Tabela 6.13 e representados graficamente na Figura 6.14.

Tabela 6.13 – Perda de peso das amostras após exposição térmica

Traço	Perda de Peso de peso (%)	
	600°C	900°C
REF	2,44	4,70
25RTR	2,37	4,46
50RTR	2,32	4,18
75RTR	2,27	3,68
100RTR	2,73	4,42

Fonte: Autor

Figura 6.14 – Comportamento da perda de massa das amostras após exposição térmica



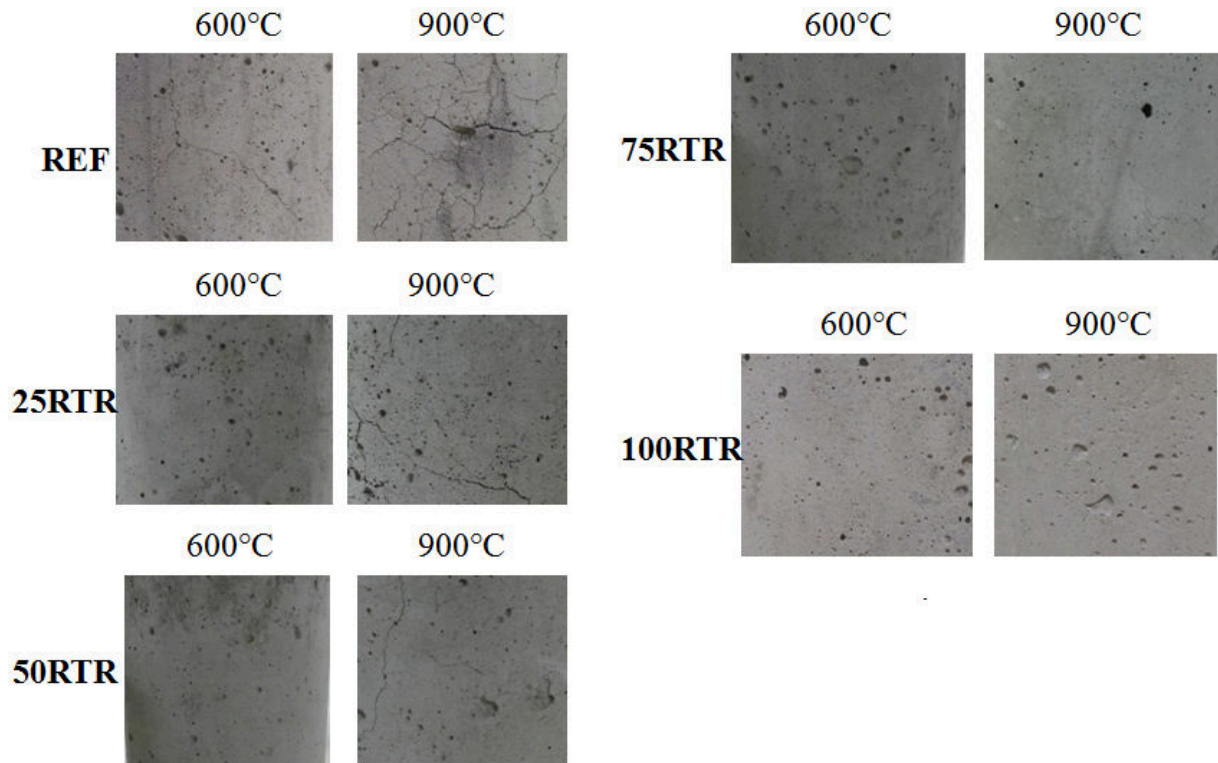
Fonte: Autor

Os valores obtidos indicam que as perdas de massa das amostras após a elevação da temperatura são quase na mesma ordem. Segundo Baradaran-Nasiri e Nematzadeh (2017), isto se dá devido a proximidade do nível de absorção de água entre o agregado miúdo natural e o agregado reciclado.

Percebe-se que a 900°C houve um aumento significativo da perda de massa das amostras em relação aos valores obtidos a 600°C. Este comportamento pode refletir o desaparecimento de todas as ligações químicas do concreto, assim como uma alteração na natureza e estruturas dos agregados. Em estudo realizado por Arioz (2007), o autor verificou comportamento semelhante, onde acima de 800°C as perdas de massa em concretos são mais intensas.

6.9.3 Análise visual das amostras após a queima

Após a queima de todos os corpos de prova o dano no concreto pode ser detectado por meio de observações visuais em sua superfície. Segundo Georgali e Tsakiridis (2005), nestas inspeções geralmente é possível visualmente verificar mudança de cor, surgimento de fissuras e lascamento da superfície do concreto. Para realização deste estudo as amostras de todos os traços foram inspecionadas imediatamente após serem retiradas dos fornos elétricos. Na Figura 6.15 são apresentados os resultados verificados em todos os traços após o tratamento térmico. As imagens até a temperatura 110°C não foram anexadas, pois nenhum efeito perceptível pôde ser identificado, ou seja, não foram constatadas alterações na cor das amostras e nem o surgimento de fissuras na superfície das mesmas. A 600°C além de uma leve alteração de cor foi possível verificar o surgimento de fissuras na superfície dos corpos de prova do traço referência. Para os demais traços à mesma temperatura verificou-se apenas a mudança de cor. A 900°C as fissuras ficaram claramente evidentes nos traços REF, 25RTR e 50RTR. Nos traços 75RTR e 100RTR constataram-se apenas algumas fissuras, sendo mais perceptíveis nas amostras 75RTR. Segundo Hertz (2003), as fissuras superficiais do concreto exposto a altas temperaturas podem ser devidas à pressão entre os poros do concreto que pode ter ocasionado o fenômeno da fragmentação. Este fenômeno por sua vez ainda é capaz de causar um efeito negativo ao concreto exposto a altas temperaturas ocasionando assim à redução da capacidade de carga de uma construção.

Figura 6.15 – Aparência da superfície dos concretos após queima

Fonte: Autor

Vale lembrar que após os ensaios de resistência à compressão das amostras REF após a elevação da temperatura a 900°C foi possível verificar que os corpos de prova podiam se desintegrar com facilidade ao simples fato de serem retirados da prensa utilizada para realizar o ensaio, conforme pode ser visto na Figura 6.16. Este comportamento não foi verificado nas amostras que continham resíduos de tijolos refratários após serem submetidos a 900°C.

Figura 6.16 – Desintegração de concreto referência após ensaio



Fonte: Autor

Para Lima et al. (2004), a desintegração do corpo de prova verificado na Figura 6.16 foi ocasionada devido o efeito da elevação de temperatura em concretos que é capaz de prejudicar diretamente a aderência entre a pasta de cimento e o agregado graúdo.

7 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas por meio dos resultados desta pesquisa.

Foi apresentado no presente trabalho um programa experimental para o reuso de tijolos refratários como uma alternativa na substituição da parcela fina de agregados (areia) que compõem os concretos. No total, 5 misturas de concretos foram estudadas considerando a variação do percentual, em massa, de resíduos de tijolos refratários. As análises das amostras confeccionadas se deram no estado fresco, endurecido e após a elevação de temperatura. Os parâmetros resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos foram analisados à temperatura ambiente. Na sequência os mesmos traços foram expostos às temperaturas de 110°C, 600°C e 900°C para análise do comportamento destes materiais quanto a resistência à compressão. Com base nos resultados desta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser aferidas.

Por meio da análise mineralógica e química, realizada por difração de raio-X (DRX) e de fluorescência de raios-X (FRX), respectivamente, foi possível comprovar a predominância de elementos como sílica e alumina na amostra de resíduos mesmo após a calcinação que se deu no local de origem destes materiais. Ainda foi possível confirmar a presença de um baixo teor de MgO tendo como alerta no uso de refratários descartados.

Os traços analisados à temperatura ambiente com substituição em massa do agregado miúdo por RTR alcançaram níveis crescentes de resistência à compressão, com exceção do traço 25RTR que aos 14 e 28 dias de idade apresentou resultados quase similares, porém inferiores ao traço REF. Com relação aos resultados experimentais, o melhor e pior desempenho a resistência à compressão foi observado nas amostras 100RTR e 25RTR, respectivamente.

Os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade apresentaram-se irregulares em função da substituição da areia por resíduos de tijolos refratários. Para Baradaran-Nasiri e Nematzadeh (2017) é possível observar que o tipo e a resistência à compressão dos agregados do concreto são apenas alguns dos parâmetros que mais influem no desempenho do módulo de elasticidade do concreto.

As porcentagens de absorção de água de todas as amostras contendo resíduos de tijolos refratários foram inferiores às obtidas no traço referência, com exceção da amostra 100RTR que pode-se dizer que foram iguais. Isto indica que vários níveis de substituição de

resíduos de tijolos refratários não repercutem no aumento de absorção de água e porosidade, gerando assim concretos mais resistentes e duráveis.

Conforme esperado, foi possível verificar que as resistências à compressão de todas as amostras diminuíram após serem expostas às temperaturas 110°C, 600°C e 900°C. Apesar de nas temperaturas 600°C e 900°C as amostras terem perdido consideravelmente as propriedades mecânicas, têm-se que quando comparados com traço referência uma melhora significativa foi verificada. Neste caso à 600°C a amostra 75RTR teve melhor desempenho. Já a amostra 25RTR o pior, com valores na ordem de 72,04% e 9,79%, respectivamente. O mesmo comportamento foi verificado à 900°C, onde a amostra 75RTR teve melhor desempenho e a amostra 25RTR o pior, com valores na ordem de 109,38% e 45,31%, respectivamente.

As perdas de massa foram quase semelhantes entre si. A 900°C os valores percentuais de perda de massa para todas as amostras produzidas com níveis de substituição de areia por resíduos de tijolos refratários foram inferiores às perdas registradas no traço referência. Isto se deve à maior resistência e refratariedade dos agregados de tijolos.

Por meio das análises visuais das superfícies dos corpos de prova foi possível comprovar melhora no comportamento referente ao surgimento de fissuras nas amostras que continham em sua composição os resíduos de tijolos refratários como agregado.

Por fim, além do uso de RTR promoverem consideráveis níveis de aumento na resistência em concretos, vale ressaltar que seu emprego é capaz de possibilitar a redução ou até a eliminação destes resíduos a aterros e ainda a capacitar uma contribuição com fatores econômicos.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

No sentido de contribuir para o aumento do conhecimento sobre o tema tratado, sugere-se para pesquisas futuras:

- Por meio do mesmo concreto com resíduos de tijolos refratários, avaliar o comportamento dos resíduos em concreto armado;
- Realizar estudos das propriedades do material em testes capazes de simular condições de incêndio;

- Realizar um estudo das propriedades do concreto com resíduos de tijolos refratários e cimento de aluminato de cálcio e comparar com os resultados obtidos nos concretos produzidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AHN, Y. B.; JANG, Jeong Gook; LEE, Haeng-Ki. Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 72, p. 27-38, 2016.

ANNEREL, E.; TAERWE, L. Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis. *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 12, 2009, p. 1239–1249.

ANGULO, S. C. et al. Aperfeiçoamento da reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição: Uso em concretos. **SEMINÁRIO: Uso da Fração Fina da Britagem. Anais: II SUFFIB, Cuchierato et al.(eds)**, 2005.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ARIOZ, O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. **Fire safety journal**, v. 42, n. 8, p. 516-522, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5.739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6.118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7.211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7.217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 8.522**: Concreto –Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9.778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9.833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 11.578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 10.007**: Procedimento Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.116:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

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

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

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

ALCANTARA, P. S. X, NÓBREGA, A. C. V.; SILVA, G. A. Desenvolvimento de argamassas de revestimento utilizando resíduos de cerâmica vermelha e sua aplicabilidade no cotidiano de obras na construção civil. In: **Congresso Brasileiro do Concreto, 54^o**. Maceió. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2012.

ALMEIDA, M. S. **Desenvolvimento de blocos de concreto para alvenaria estrutural produzido com resíduo de polimento de porcelanato**. 2012. 63p. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Engenharia Civil, UFPE, Caruaru.

AY, Nuran; ÜNAL, Mevlüt. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 3, p. 497-499, 2000.

BAHIENSE, A. V. et al. Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p. 395-403, 2008.

BARADARAN-NASIRI, Ardalan; NEMATZADEH, Mahdi. The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete with fine recycled refractory brick aggregate and aluminat cement. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 865-875, 2017.

BOLINA, F. L. Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado, São Leopoldo, 2016. Thesis (Master). Curso de Arquitetura, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 180p.

BRASIL, Anna M.; SANTOS, Fátima. **Equilíbrio ambiental e resíduos na sociedade moderna**. São Paulo: Faarte Editora Ambiental, 2004, 223p.

BRASIL, Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº9.650, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível

em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 26 de set. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n° 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n° 136, 17 de julho de 2002. Seção 1, p. 95-96. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 26 set. 2016.

BUTTNER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16102007-111106/en.php>>. Acesso em: 21 de ago. 2016.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CACHIM, Paulo B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1292-1297, 2009.

CASTRO, AL de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

COELHO, A.; DE BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal—part I: location, materials, technology and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 338-352, 2013.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Prevenção à Poluição. **Conceitos e definições**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/prevencao_poluicao/conceitos.asp>. Acessado em 17.10.2005^a.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. **XXX Jornadas sul-americanas de engenharia estrutural**, 2002.

DEBIEB, F.; KENAI, S.. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and building materials**, v. 22, n. 5, p. 886-893, 2008.

DURAN, X.; LENIHAN, H.; O'REGAN, B. A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling—the case of Ireland. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 46, n. 3, p. 302-320, 2006.

FAGURY, S. C.; GRANDE, F. M. Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)-aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP. **Exacta**, v. 5, n. 1, p. 35-45, 2007.

FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 2002, São Paulo. **Anais...**São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.

FONSECA, A.D.P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. 2006. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

GARCIA, E. et al. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**. v. 61, 2015.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. **Cement and Concrete composites**, v. 27, n. 2, p. 255-259, 2005.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, v. 61, n. 1, 2013, p. 1–10.

HANSEN, T. C. RILEM: Recycling of demolished concrete and masonry (Vol. 6). Ed. 2004.

HERTZ, K. D. Limits of spalling of fire-exposed concrete. **Fire safety journal**, v. 38, n. 2, p. 103-116, 2003.

JOHN, V. M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 97-121.

KAVAS, T.; KARASU, B.; ARSLAN, O. Utilization of refractory brick wastes in concrete production as aggregates. In: **Sohn Int Symp Adv Process Met Mater**. 2006. p. 479-83.

KHALAF, F. M.; DEVENNY, A. S. Performance of brick aggregate concrete at high temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 556-565, 2004.

KHALIQ, W.; KHAN, H. A. High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 475-487, 2015.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290f. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 169-176, 2013.

- LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** 1999. 204f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)–Universidade de São Paulo, São Paulo.
- LIMA, P. H. P. **Agregados reciclados de tijolos refratários para utilização em argamassa de proteção passiva de estruturas metálicas em caso de incêndio.** 93 f. 2014. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2014.
- LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. Efeito de altas temperaturas no concreto. In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES, 2, 2004, Porto Alegre. **Anais...**Porto Alegre: UFRGS, 2004.
- LOUIS, Garrick E. A historical context of municipal solid waste management in the United States. **Waste management & research**, v. 22, n. 4, p. 306-322, 2004.
- MARZOUK, M.; AZAB, S. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 82, p. 41-49, 2014.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete, structures, properties and materials. 1st. **Pini, São Paulo**, p. 574, 1994.
- MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. Recycling of construction and demolition waste in Brazil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.
- MOON, Han-Young; KIM, K. H.; SHIN, H. C. A research on the recycling of ceramic wastes as an aggregate for concrete. **Journal of the Korean Institute of Resources Recycling**, v. 10, n. 2, p. 41-49, 2001.
- MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. P. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 32, n. 1, p. 47-55, 2011.
- MUELLER, A. Closed loop of concrete rubble. **Bauhaus Universität Weimar. Available at: <http://www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/Lehre/Gastvorlesung/Barcelona/Lecture07.pdf>.** Acesso em: 07 de jun. 2018.
- NACERI, A., HAMINA, M. C. **Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. Waste Management.** v. 29, 2009.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo: Pini, 1923.
- NUNES, IHS. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção.** 2009. 67 f. 2009. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Maringá, 2019.
- PEREIRA, L. H. Construction and demolition waste recycling: the case of the Portuguese northern region. **Diss. Mestrado, Minho Univ., Portugal**, 2002.

PINTO, T. de P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas.** 1986. 140p. 1986. Dissertação (Mestrado)—Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos—Universidade de São Paulo, São Carlos.

PINTO, T. P. **Panorama dos Resíduos da Construção Civil: Estado de São Paulo.** Trabalho apresentado no Seminário Regional de Resíduos Sólidos, São Paulo, 2008.

ROSSO, T. **Incêndios e arquitetura.** São Paulo: FAUUSP, 1975. Apostila.

SANTOS, D. F. et al. A logística reversa como estratégia de sustentabilidade e redução de custos. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, p. 226-242, 2013.

SANTOS, E. C. G. dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SHIMA, Hirokazu et al. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. **Journal of advanced concrete technology**, v. 3, n. 1, p. 53-67, 2005.

SOUTSOS, M. N.; TANG, K.; MILLARD, S. G. Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 7, p. 3131-3143, 2011.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato.** 2007. 230f. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, Natal.

SOUZA, P.C.M.; CARNEIRO, F.P.; MONTEIRO, E.C.B.; BARKOKEBAS JR., B; GUSMÃO, A.D.G. **Análise sobre a gestão dos resíduos sólidos de construção e demolição na região metropolitana do Recife.** In: Geo-jovem – Congresso de Jovens Geotécnicos. São Carlos, 2004. EESC-USP.

WADA, P.H. **Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas in loco.** 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP.

WILBURN, D. R.; GOONAN, T. G. Aggregates from natural and recycled sources. **US Geological Survey Circular**, v. 1176, p. 36, 1998.

XIAO, Zhao et al. Properties of partition wall blocks prepared with high percentages of recycled clay brick after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 56-61, 2013.

ZAKARIA, M.; CABRERA, J. G. Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates. **Waste Management**, v. 16, n. 1-3, p. 151-158, 1996.