



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



Ruvier Rodrigues Pereira

**PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS
NA DEFINIÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO COM RESÍDUOS PARA
PRODUÇÃO DE TIJOLOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

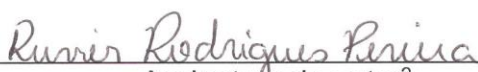
Nome completo do autor: Ruvier Rodrigues Pereira

Título do trabalho: Planejamento Experimental e Otimização de Processos na Definição de Traço de Concreto com Resíduos para Produção de Tijolos

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento **SIM** **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do autor²

Ciente e de acordo:


Assinatura do orientador²

Data: 01 / 02 / 2018

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

RUVIER RODRIGUES PEREIRA

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS
NA DEFINIÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO COM RESÍDUOS PARA
PRODUÇÃO DE TIJOLOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:
Prof. DSc. Heber Martins de Paula

CATALÃO – GO

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Pereira, Ruvier Rodrigues

Planejamento Experimental e Otimização de Processos na Definição de Traço de Concreto com Resíduos para Produção de Tijolos [manuscrito] / Ruvier Rodrigues Pereira. - 2018.

XCIV, 94 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Heber Martins de Paula.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2018.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. Tijolo de concreto. 2. Resíduos de borracha de pneu. 3. Lama Residual de Concreto. 4. Planejamento experimental. I. de Paula, Heber Martins, orient. II. Título.

CDU 519.252



Defesa Nº 25

Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

Aos 30 dias do mês de janeiro do ano de 2018, às 14 h: 00 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores Dr. Heber Martins de Paula (presidente e orientador), Dr. Enio Pazini Figueiredo e Dr. Antover Panazzolo Sarmiento para, em sessão pública realizada na sala 15, do Bloco J, da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: "Planejamento Experimental e Otimização de Processos na Definição de Traço de Concreto com Resíduos para Produção de Tijolos", em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de Ruvier Rodrigues Pereira, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (X) **Aprovado** (unanimidade) ou () **Reprovado** (por maioria simples). Cumpridas as formalidades de pauta, às 15 h: 52 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Heber Martins de Paula, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 30 de Janeiro de 20 18.

Prof. Dr.: Heber Martins de Paula
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.
(Presidente da Banca)

Prof. Dr.: Enio Pazini Figueiredo
Escola de Engenharia Civil / UFG

Prof. Dr.: Antover Panazzolo Sarmiento
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.

Discente: Ruvier Rodrigues Pereira
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.

Aos meus pais, Joel e Lucimar, e a minha irmã Raissa, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, me dando força, suporte e sabedoria a todo momento.

Agradeço aos meus pais Joel e Lucimar que são a minha inspiração. Devo tudo a vocês, principalmente a conclusão desta etapa da minha vida.

Também agradeço a minha irmã Raissa, que sempre esteve ao meu lado, com palavras de incentivo e apoio.

À minha família, em especial meus primos, que sempre unidos, fizeram parte de todos os momentos.

Ao meu orientador Heber Martins de Paula, que me deu todo o suporte necessário para a execução deste trabalho.

A todos meus amigos, em especial a Marislene, o Pedro Henrique e a Morgana, com quem passei por sofrimentos e alegrias, mas na memória vão ficar as grandes risadas que tivemos juntos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, na pessoa do professor Celso Vieira e da secretária Elizângela Maria, pelo esforço em formar profissionais competentes e qualificados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás – FAPEG, pelo apoio financeiro concedido.

Ao Cleumar Tristão, Iago Ferreira e Isabele Rodrigues, técnicos da Universidade Federal de Goiás/Regional Catalão, que dispuseram tempo e dedicação para auxiliar no desenvolvimento dos ensaios e na elaboração de documentos.

Ao Walter Batista, Victon Baldin, Thayane Dias, Iandra Almeida, Daniela MUNDIN, Amanda de Castro, Luiz Henrique, Lariane Faria e Igor Mazon, pelas contribuições e apoio para realização deste trabalho.

Aos professores da Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão, Antover Panaz-

zolo, Wellington Andrade, Henrique Senna, Ed Carlo Rosa e Ricardo Cruvinel por fazerem parte deste trabalho com valiosas contribuições metodológicas e experimentais.

Ao professor Enio Pazini e Antover Panazzolo pela leitura atenta e valiosas contribuições durante a qualificação.

Ao departamento de Engenharia Civil, Engenharia de Minas e Química da UFG, Regional Catalão, pela liberação e uso dos laboratórios.

Às empresas Brasmix, GS Artes Pré-Moldados, ConstruCastro Materiais e Pré-Moldados, de Catalão, por abrirem as portas, pelas parcerias, doações e cumplicidades no desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado!

"Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes." (Isaac Newton)

RESUMO

PEREIRA, R. R. *Planejamento Experimental e Otimização de Processos na Definição de Traço de Concreto com Resíduos para Produção de Tijolos*. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

O volume de resíduos sólidos produzido vem aumentando de modo desordenado e prejudicial à natureza, uma vez que não são dados a ele fins adequados. Como resíduos passíveis de se utilizar na fabricação de tijolos de concreto se tem a borracha de pneus, que é um grande causador de problemas ambientais, e o resíduo cimentício gerado em usinas de concreto, denominado de Lama Residual do Concreto (LRC). O objetivo geral deste estudo será, então, determinar um traço de concreto para produção de tijolos, que contenha maiores porcentagens de resíduos de usinas de concreto e de borracha de pneu, conjuntamente. Para tanto, foram analisadas a aplicabilidade dos resíduos separadamente, nos Estudos 1 e 2, e posteriormente de forma conjunta no Estudo 3, que foi utilizado o Delineamento Composto Central Rotacional como planejamento experimental e os dados avaliados via Metodologia de Superfície de Resposta, e Estudo 4, sendo o granulado de borracha em substituição ao agregado e a Lama Residual do Concreto em seu estado seco (LRC-S) ao cimento. Foram realizadas a caracterização físico-química dos agregados e ensaio de resistência à compressão e absorção de água dos tijolos. Os resultados mostraram que é viável se utilizar a LRC-S e o granulado de borracha de pneu, porém quanto maior a porcentagem de borracha, menor será a resistência à compressão e maior será a absorção de água, sendo que o limite de substituição da borracha é dependente do agregado empregado e das condições de moldagem, bem como do traço utilizado. Já a LRC-S não apresentou efeitos significativos se comparados com aqueles da borracha, podendo ser feitas, assim, substituições de maiores porcentagens. Tem-se, então, um traço ótimo com cerca de 4% de substituição do agregado por borracha e com aproximadamente 15% de LRC-S, em substituição ao cimento. Contudo, pode se afirmar que a utilização de tijolos de concreto com resíduo para vedação é viável tecnicamente, de forma a diminuir o volume de resíduos descartados, obter um produto mais barato e ainda atender aos critérios exigidos pelas normas.

Palavras-chaves: Tijolo de concreto, Resíduos de borracha de pneu, Lama Residual de Concreto, Planejamento experimental.

ABSTRACT

PEREIRA, R. R. *Experimental Design and Process Optimization in the Definition of Concrete Trace with Residues for Brick Production*. 2018. 94 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

The volume of solid waste produced is increasing disorderly and harmful to nature, since they are not given their proper purposes. As waste that can be used in the manufacture of concrete bricks is the waste tire rubber, which is a major cause of environmental problems, and the cementitious waste generated in concrete plants, called Concrete Sludge Waste (CSW). The overall objective of this study will then be to determine a concrete trace for brick production, containing the highest percentages of concrete sludge waste and tire rubber granulate together. To do so, the applicability of the residues was analyzed separately in Studies 1 and 2, and later jointly in Study 3, that the Central Composite Delineation of Rotational was used as experimental planning and the data evaluated through Response Surface Methodology, and Study 4, being the waste tire rubber granulate replacing the aggregate and the Concrete Sludge Waste in its dry state (CSW-S) to the cement. The physical-chemical characterization of the aggregates and the test of resistance to compression and water absorption of the bricks were performed. The results showed that it is feasible to use CSW-S and waste tire rubber granulate, but the higher the rubber percentage, the lower the compressive strength and the higher the water absorption, the rubber substitution limit is dependent on the aggregate used and the molding conditions, as well as the trace used. However, the CSW-S did not present significant effects when compared to those of the rubber, thus, replacements of higher percentages could be made. There is then an optimal trace with about 4% rubber aggregate substitution and approximately 15% LRC-S, replacing the cement. However, it can be affirmed that the use of concrete bricks with residue for sealing is technically feasible, in order to reduce the volume of discarded waste, obtain a cheaper product and still meet the criteria required by the standards.

Keywords: Concrete brick, Waste tire rubber, Concrete Sludge Waste, Experimental design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução do número de artigos publicados em função das expressões-chave utilizadas no mapeamento.	26
Figura 2.2 – Principais estudos da borracha de pneu identificados nos artigos de periódicos dentro do mapeamento realizado.	30
Figura 2.3 – Sistema de tratamento da água residuária de usinas de concreto utilizando tanques de sedimentação.	33
Figura 2.4 – Difração de Raios-X das amostras C1, C2, C3 e C4. (C: Calcita, CC: Carbonato de Cálcio Hidratado; CS: Silicatos de Cálcio; CSH: Silicatos de Cálcio Hidratados; G: Gesso; P: Portlandita; Q: Quartzo).	36
Figura 2.5 – Principais funções da Lama Residual de Concreto identificadas nos artigos de periódicos dentro do mapeamento realizado.	36
Figura 2.6 – Esquema do equipamento de carbonatação acelerada com CO_2	38
Figura 2.7 – Representação esquemática do DCCR para 2 fatores.	40
Figura 3.1 – Delineamento geral da pesquisa.	43
Figura 3.2 – Zonas do tanque de sedimentação.	46
Figura 3.3 – Processo de obtenção da LRC (a, b) e preparação da LRC-S para utilização (c-f).	46
Figura 3.4 – Tijolos de concreto após a desmoldagem.	48
Figura 4.1 – Curvas granulométricas da borracha e da areia natural para o Estudo 1.	53
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica da LRC-S e da areia artificial para o Estudo 2.	54
Figura 4.3 – Distribuição granulométrica da LRC-S, da borracha e da areia artificial para o Estudo 3.	54
Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da LRC-S, da borracha e da areia artificial para o Estudo 4.	55
Figura 4.5 – Difração de Raios-X da LRC-S.	57
Figura 4.6 – Resistência à compressão dos tijolos de concreto do Estudo 1.	58
Figura 4.7 – Resistência à compressão simples dos tijolos de concreto aos 28 dias e dos tijolos cerâmicos com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de resistência entre os traços).	59

Figura 4.8 – Resistência à compressão dos tijolos de concreto do Estudo 2.	61
Figura 4.9 – Resistência à compressão simples dos tijolos de concreto aos 28 dias e dos tijolos cerâmicos com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de resistência entre os traços).	62
Figura 4.10 – Absorção de água dos tijolos de concreto com substituição do agregado por granulado de borracha aos 28 dias com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de absorção de água).	64
Figura 4.11 – Aderência entre borracha e matriz de cimento. (A) Borracha; (B) Quartz; (C) Vazios.	64
Figura 4.12 – Densidade dos tijolos de concreto aos 28 dias com análise de Scott-Knott (as letras minúsculas indicam faixas da densidade).	65
Figura 4.13 – Absorção de água (I) e densidade (II) dos tijolos de concreto aos 28 dias com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de absorção de água e as minúsculas de densidade).	66
Figura 4.14 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.	69
Figura 4.15 – Gráfico de Pareto para análise da absorção de água por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.	69
Figura 4.16 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 28 dias em função das variáveis independentes.	71
Figura 4.17 – Resistência à compressão dos tijolos aos 28 dias do Estudo 3.	72
Figura 4.18 – Resistência à compressão dos tijolos aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias, do Estudo 3.	73
Figura 4.19 – Superfície de contorno para a variação da absorção de água aos 28 dias em função das variáveis independentes.	74
Figura 4.20 – Absorção de água dos tijolos de concreto do Estudo 3.	74
Figura 4.21 – Resistência à compressão dos tijolos aos 3, 7, 14 e 28 dias, do Estudo 4.	76
Figura 4.22 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 28 dias.	76
Figura 4.23 – Absorção de água dos tijolos do Estudo 4.	77
Figura 4.24 – Comparação entre a curva de absorção de água obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4.	77
Figura A.1 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 3 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.	88
Figura A.2 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 7 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.	89
Figura A.3 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 14 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.	89
Figura A.4 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 56 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.	89

Figura A.5 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 3 dias em função das variáveis independentes.	91
Figura A.6 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 7 dias em função das variáveis independentes.	91
Figura A.7 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 14 dias em função das variáveis independentes.	92
Figura A.8 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 56 dias em função das variáveis independentes.	92
Figura B.1 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 3 dias.	93
Figura B.2 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 7 dias.	94
Figura B.3 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 14 dias.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo dos resultados obtidos no mapeamento.	26
Tabela 2.2 – Principais periódicos com artigos nos temas estudados.	27
Tabela 2.3 – Composição química elementar da borracha de pneu segundo alguns autores.	29
Tabela 2.4 – Características físicas do cimento Portland Tipo II-E e da Lama Residual de Concreto segundo alguns autores.	34
Tabela 2.5 – Características químicas do cimento Portland Tipo I e da Lama Residual de Concreto segundo alguns autores.	35
Tabela 3.1 – Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.	47
Tabela 3.2 – Traço dos materiais utilizados na produção dos tijolos do Estudo 1.	49
Tabela 3.3 – Traço dos materiais utilizados na produção dos tijolos do Estudo 2.	49
Tabela 4.1 – Caracterização química das parcelas elementares dos materiais utilizados.	56
Tabela 4.2 – Resistência à compressão para os tijolos de concreto com substituição do agregado por granulado de borracha nas idades 7, 14 e 28 dias.	59
Tabela 4.3 – Resistência à compressão para os tijolos de concreto com substituição do cimento por LRC-S nas idades 7, 14, 21 e 28 dias.	61
Tabela 4.4 – Variáveis independentes e respectivos níveis.	67
Tabela 4.5 – Matriz de ensaios.	67
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água do Estudo 3.	68
Tabela 4.7 – Regressões polinomiais de segunda ordem das variáveis dependentes utilizadas na geração das Superfícies de Resposta, gráficos de Pareto e de contorno, com seus respectivos coeficientes de determinação.	68
Tabela 4.8 – Análise de variância (ANOVA).	70
Tabela 4.9 – Traço dos materiais para o Estudo 4.	75
Tabela A.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples aos 3, 7, 14 e 56 dias.	87

Tabela A.2 – Regressões polinomiais de segunda ordem das variáveis dependentes utilizadas na geração das Superfícies de Resposta, gráficos de Pareto e de contorno, com seus respectivos coeficientes de determinação.	88
Tabela A.3 – Análise de variância (ANOVA).	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1	Borracha de Pneu	27
2.1.1	Caracterização da borracha de pneu na literatura	28
2.1.2	Possibilidades de usos da borracha de pneu	29
2.2	Lama Residual de Concreto	32
2.2.1	Caracterização da Lama Residual de Concreto na literatura	34
2.2.2	Possibilidades de usos da Lama Residual de Concreto	36
2.3	Planejamento e Otimização de Experimentos	39
3	MÉTODO DA PESQUISA	43
3.1	Delineamento do Processo da Pesquisa	43
3.1.1	Compreensão do problema	44
3.1.2	Desenvolvimento da pesquisa	44
3.1.3	Análise dos resultados	45
3.2	Materiais e Métodos	45
3.2.1	Materiais	45
3.2.2	Ensaio de caracterização química	47
3.2.3	Ensaio de caracterização física	47
3.2.4	Definição dos traços e das porcentagens de substituição	48
3.2.5	Proporcionamento e produção dos tijolos de concreto	50
3.2.6	Ensaio de compressão simples e absorção de água	51
4	RESULTADOS	53
4.1	Caracterização dos Materiais	53
4.1.1	Distribuição granulométrica e densidade de partículas	53
4.1.2	Ensaio de EDX e Difratograma de Raios-X	56
4.2	Propriedade dos Tijolos	58
4.2.1	Ensaio de resistência à compressão	58
4.2.1.1	Tijolos com substituição do agregado por granulado de borracha (Estudo 1)	58
4.2.1.2	Tijolos com substituição do cimento por LRC-S (Estudo 2)	61

4.2.2	Absorção de água e vazios	63
4.2.2.1	Tijolos com substituição do agregado por granulado de borracha (Estudo 1) . . .	63
4.2.2.2	Tijolos com substituição do cimento por LRC-S (Estudo 2)	65
4.2.3	Otimização das porcentagens de substituição para produção de tijolos de concreto com resíduos (Estudo 3)	66
4.2.4	Validação das porcentagens de substituição (Estudo 4)	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A ESTUDO 3	87
A.1	Resistencia à compressão simples dos tijolos do Estudo 3 aos 3, 7, 14 e 56 dias	87
	APÊNDICE B ESTUDO 4	93
B.1	Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 3, 7 e 14 dias.	93

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Um dos setores responsáveis por provocar grande impacto ambiental é o da construção civil, pois ele é responsável pelo elevado consumo de matéria-prima e produção de grande volume de resíduos. De acordo com [Careli \(2008\)](#), a indústria da construção civil consome, em média 50% dos recursos naturais, e nas cidades brasileiras, 60% dos resíduos gerados são provindos do setor da construção civil.

Segundo [Freire e Beraldo \(2003\)](#), diante da grande geração de resíduos sólidos, o reuso destes materiais se tornou uma alternativa para seu controle e descarte. Ao longo dos anos, alguns estudos já vêm sendo realizados para uso dessas matérias-primas alternativas ou não convencionais na construção civil. Assim, com a substituição da matéria-prima por resíduos, é possível reduzir a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente, bem como a quantidade de resíduos descartados.

Um dos sistemas amplamente adotados na construção civil é o uso de blocos de concreto para execução de alvenaria, seja ela com função estrutural ou não. Tais blocos são compostos basicamente de cimento, agregados e água, e adotar em sua composição parcelas de resíduos traria grandes benefícios ao meio ambiente. Como variação dos blocos tem-se os tijolos de concreto, que ainda não são normatizados e que foram foco deste estudo.

Um resíduo passível de se utilizar na fabricação de tijolos é a borracha de pneus, que é um grande causador de problemas ambientais. Os pneus são de difícil descarte, além do que, segundo [Monteiro et al. \(2001\)](#), muitos são os problemas gerados pela sua disposição inadequada, podendo causar proliferação de doenças, instabilidade de solos e a sua queima gera grande quantidade de materiais particulados e gases tóxicos.

O uso do agregado de borracha de pneu entra em substituição de parcelas dos agregados, como a areia e brita, trazendo benefícios para o meio ambiente, como redução de extração de matéria-prima e redução de depósitos de pneus ([ROMUALDO et al., 2011](#)). Além disso, o uso da borracha pode melhorar algumas características dos tijolos, como reduzir a densidade, melhorar o isolamento térmico e acústico, além de apresentar melhor proprie-

dade de drenagem (BENSON, 1995).

Outro resíduo com grande potencial de se utilizar na fabricação de tijolos de concreto é aquele gerado em usinas de concreto. Segundo Sealey, Phillips e Hill (2001) há três principais fontes geradoras de resíduos em uma usina de concreto: a lavagem dos balões dos caminhões betoneira ao final de cada dia; a lavagem dos pátios de produção e o retorno de sobras de concreto ou concreto devolvido. Como resíduos tem-se, basicamente, água e uma proporção variável de agregados finos e grossos, pó de cimento e aditivos químicos.

Acredita-se, então, que os resíduos sólidos gerados nas usinas de concreto são ricos em materiais cimentícios o que pode viabilizar sua aplicação em substituição à parte do cimento utilizado na produção dos tijolos.

Dessa forma, ao se utilizar conjuntamente a borracha de pneu e o resíduo cimentício como substitutos parciais do agregado e do cimento, respectivamente, é possível obter tijolos de concreto que atendem as recomendações normativas existentes para blocos de concreto ou tijolos de solo-cimento. Com isso, pode-se também reduzir os impactos negativos causados pelos resíduos, quando utilizados individualmente, para a produção dos blocos ou tijolos.

1.1 Objetivos

Objetivo geral deste estudo foi determinar um traço de concreto para produção de tijolos, que contenha maiores porcentagens de resíduos de usinas de concreto e de borracha de forma conjunta.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Caracterizar os materiais e os resíduos utilizados;
- Verificar a viabilidade de utilização dos dois resíduos separadamente: resíduo da usina de concreto e borracha;
- Realizar o Delineamento Composto Central Rotacional como planejamento experimental e avaliar os dados via Metodologia de Superfície de Resposta para a utilização dos dois resíduos conjuntamente;
- Verificar a aplicabilidade do traço otimizado para produção de tijolos de concreto com resíduos, e avaliar suas características mecânicas, conforme os resultados preditos.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura foi desenvolvida através do mapeamento sistemático, conforme proposto por [Bailey et al. \(2007\)](#) e [Petersen et al. \(2008\)](#). Esta metodologia, também chamada de *mapping study*, consiste em utilizar de operadores lógicos (*strings*) e palavras ou expressões chaves para selecionar artigos cadastrados em bases de dados.

Foi considerada somente a base de dados presente no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, acessados pelo sistema da Universidade Federal de Goiás, em dezembro de 2017, com os seguintes operadores lógicos e expressões chaves: (a) “*Waste tire rubber**”; (b) “*Fresh concrete waste**” e (c) “*Concrete sludge**”. As expressões utilizadas foram escolhidas de forma a abranger tanto estudos relacionados com a utilização da borracha de pneu (a), quanto com enfoque na Lama Residual de Concreto (LRC) (b e c), sendo escolhidas com base em palavras-chaves de artigos sobre o tema. Salienta-se ainda que foram testadas outras combinações de expressões, porém não retornaram nenhum resultado que se adequasse ao tema de estudo. O sinal de asterisco foi inserido no final das expressões para recuperar as variações dos sufixos.

Após a busca inicial, os artigos repetidos dentro da mesma busca foram retirados e aplicado o filtro quanto ao tipo de publicação (artigos revisados por pares). Feito isso, foi iniciada a leitura e análise de títulos e resumos aderentes, para selecionar apenas aqueles estudos que se relacionam diretamente com o objeto de estudo ([PAULA; ILHA, 2016](#)).

Realizada as etapas propostas para o mapeamento sistemático, foram obtidos os resultados parciais e totais apresentados na Tabela 2.1. Buscando identificar a importância destes dois temas ao longo dos anos, foi elaborada a Figura 2.1, identificando a evolução de publicações em função das expressões-chave pertencentes a cada tópico. Percebe-se, então, um aumento no número de publicações a partir do período de 2006-2011, em ambos os tópicos em análise. No entanto, mesmo com um grande número de estudos acerca da borracha de pneu, é notório a falta de estudo em relação a aplicação da mesma em blocos ou tijolos, conforme [seção 2.1](#). Tem-se também, a respeito da LRC, que o tema ainda está

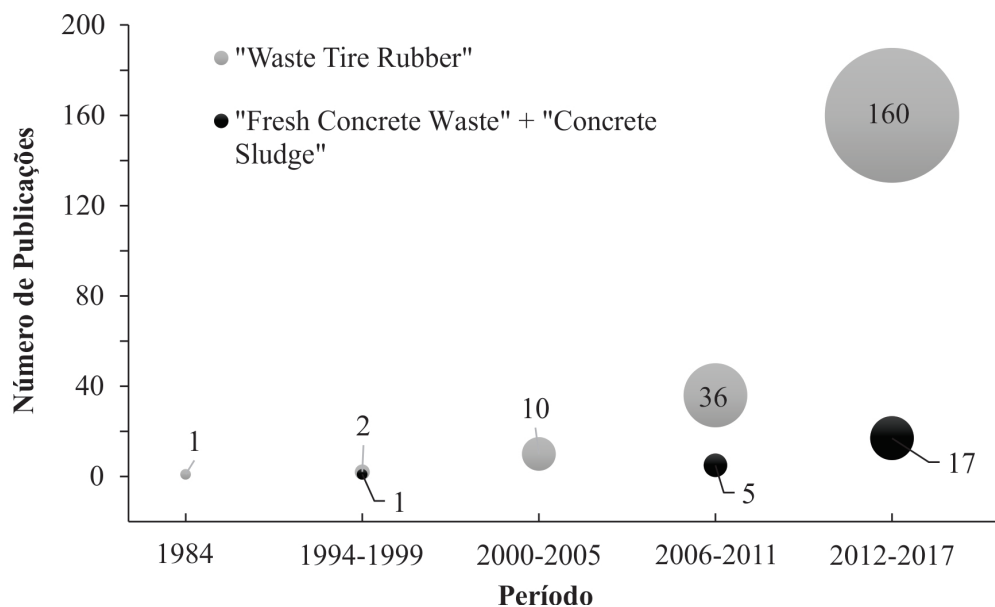
em fase inicial de estudos, podendo ter diversas aplicações em várias áreas, conforme será abordado seção 2.2.

Tabela 2.1 – Resumo dos resultados obtidos no mapeamento.

Critérios utilizados	Expressões-chave		
	"Waste tire rubber*"	"Fresh concrete waste*"	"Concrete sludge*"
	Número de artigos		
Número inicial de artigos sem repetições dentro da mesma busca	467	31	68
Artigos selecionados após análise de aderência de títulos	233	19	21
Artigos selecionados após leitura dos resumos	209	12	14
Artigos repetidos entre as buscas	3		
Total	232		

Fonte: o autor.

Figura 2.1 – Evolução do número de artigos publicados em função das expressões-chave utilizadas no mapeamento.



Fonte: o autor.

Através da avaliação dos periódicos nos quais os artigos selecionados foram publicados (Tabela 2.2), foi possível verificar que o periódico *"Construction and Building Materials"* obteve um número expressivo de artigos publicados em ambos os temas estudados. Este periódico alcançou 32,5% dos artigos com enfoque na borracha de pneu e 15,4% dos artigos

com estudos relacionados com a Lama Residual de Concreto, demonstrando, assim, grande potencial para pesquisas relacionadas com os dois resíduos.

Tabela 2.2 – Principais periódicos com artigos nos temas estudados.

Periódicos	Número de artigos publicados		
	"Waste tire rubber"	"Fresh concrete waste" + "Concrete sludge"	Total
Cement and Concrete Composites	1	1	2
Construction and Building Materials	68	4	72
Industrial and Engineering Chemistry Research	-	3	3
Journal of Cleaner Production	10	-	10
Journal of Hazardous Materials	2	1	3
Waste Management	6	3	9

Fonte: o autor.

2.1 Borracha de Pneu

Um dos maiores desafios enfrentados pelo meio técnico é garantir uma destinação adequada ao imenso volume de resíduos sólidos gerados. Diariamente, toneladas de resíduos sólidos são depositadas nos lixões ou são descartados em locais inapropriados e de forma inadequada (ANDRADE, 2007).

Segundo Motta (2008), a falta de destino apropriado aos detritos gera a poluição das águas, solo e ar, degradação da natureza, perda de biodiversidade, danos à saúde e qualidade de vida e geração de impactos sociais e culturais, podendo tornar-se uma situação irreversível e inclusive comprometer a médio e longo prazo o próprio desenvolvimento econômico. De acordo com Andrade (2007), um dos resíduos sólidos que mais vem preocupando ambientalistas, governo e sociedade são os pneus inservíveis.

Os aterros sanitários, principalmente dos grandes centros urbanos, estão ficando saturados devido ao crescimento do descarte de pneus. Freitas *et al.* (2009) afirmam que o número de pneus inservíveis em depósitos oficiais e clandestinos no Brasil ultrapassa os 100 milhões de unidades. Só em São Paulo a quantidade de pneus descartados se aproximou de 3% do lixo urbano em 2005.

Um dos fatores que dificulta e encarece o transporte e a estocagem de pneus descartados é a impossibilidade de serem compactados, devido ao seu volume e a sua forma. Além disso, possuem materiais em sua composição que podem levar cerca de 600 anos para se decompor completamente (NOHARA *et al.*, 2006). Sendo assim, a Resolução nº. 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1999) obriga os fabricantes e importadores de pneumáticos a coletar e dar destinação correta aos mesmos.

De acordo com [Romualdo *et al.* \(2011\)](#), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA) é o responsável por regular as formas de destinação para os pneus inúteis ou inservíveis, determinando quais processos são ambientalmente corretos. Como alternativas, esses pneus podem ser utilizados para outros fins, como citado por [Lagarinhos \(2011\)](#), eles podem ser utilizados em obras geotécnicas, para proteção de postes, docas e embarcações, dentre outras.

Além dos pneus inservíveis, tem-se os pneus ditos servíveis, que de acordo com [Lagarinhos e Tenório \(2008\)](#) são aqueles pneus que podem ser vendidos no comércio como pneus de meia vida ou ainda serem submetidos a reforma de sua estrutura. Como método de recuperação pode-se destacar o processo de recauchutagem, que segundo [Fioriti \(2002\)](#), é o processo onde é realizado uma raspagem das bandas de rodagem do pneu, para posterior restabelecimento das mesmas.

O processo de recauchutagem é utilizado em cerca de 70% dos veículos de carga no Brasil, pois é um processo que pode aumentar a vida útil do pneu em até 40%, além de gerar uma economia energética e de matéria-prima de 80%, se comparados com a produção de novos pneus ([FIORITI; INO; AKASAKI, 2010](#)). No entanto, tal processo gera resíduos na forma de granulados, sendo constituído basicamente por borracha.

Os resíduos da recauchutagem podem, então, ser utilizados para produção de novos materiais. Com isso há uma redução do volume de resíduos descartados, evitando, assim, a degradação e poluição do meio ambiente.

2.1.1 Caracterização da borracha de pneu na literatura

A composição química elementar da borracha de pneu segundo alguns autores está apresentada na Tabela 2.3. Verifica-se, então, que a borracha de pneu analisada pelos autores apresenta baixas concentrações de metais pesados como o chumbo (Pb), cromo (Cr) e cádmio (Cd), sendo recomendado realizar ensaios, como o de lixiviação, para o seu uso em concretos ou argamassas. Foi detectado também, por [Faria \(2015\)](#), grande quantidade de enxofre (S) e zinco (Zn). O enxofre é utilizado para ligar as cadeias de polímeros dentro da borracha, ajudar a prevenir a deformação excessiva a elevadas temperaturas da borracha e agir como um catalisador para o processo de vulcanização. Já o zinco, além de ser utilizado no processo de vulcanização da mesma forma que o enxofre, é utilizado para ressaltar as características físicas da borracha ([GOULART, 1999](#)).

Tabela 2.3 – Composição química elementar da borracha de pneu segundo alguns autores.

	Faria (2015)		Canova et al. (2007)		Aoudia et al. (2017)
	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)
Al	8	396,15	0,06	-	7,89
Ba	2,5	493,4	-	-	-
Ca	3	317,93	3,34	-	-
Cd	0,09	214,43	-	-	-
Cr	0,8	267,71	-	-	-
Cu	2,4	327,39	-	52,6	0,49
Fe	28	259,94	-	710	-
K	3,4	769,89	0,26	-	-
Mg	8	279,55	1,96	-	-
Mn	2,6	257,61	-	-	-
Na	6,2	589,59	-	-	-
Ni	0,7	231,6	-	4	-
P	8,8	214,91	0,003	-	-
Pb	2,4	220,35	-	108	-
S	41	181,97	-	-	1,46
Ti	1,6	336,12	-	-	-
V	0,4	311,07	-	-	-
Zn	18,2	213,85	-	646	1,24

Fonte: o autor.

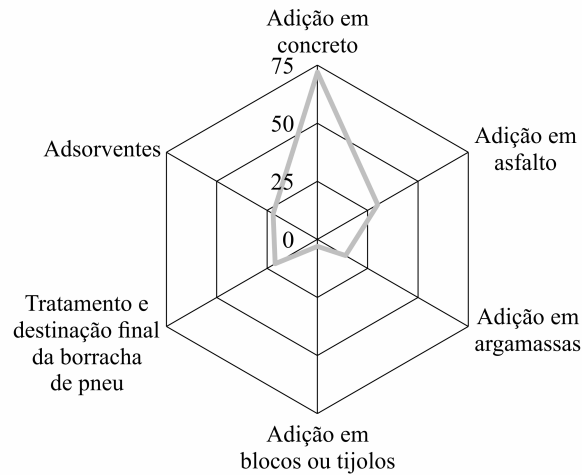
Percebe-se assim, que a composição da borracha de pneu apresentou grandes variações entre as análises, além de apresentar diferenças significativas na quantidade de elementos encontrados. É necessário, então, a cada estudo, verificar a composição química do material utilizado para resultados mais precisos.

2.1.2 Possibilidades de usos da borracha de pneu

De acordo com [Rodrigues e Santos \(2013\)](#), os agregados reciclados de borracha de pneu são materiais bastante promissores no ramo da construção civil devido às suas características como: leveza, elasticidade, absorção de energia e propriedades térmicas e acústicas. Segundo [Romualdo et al. \(2011\)](#), a reutilização da borracha de pneu em concretos como substituto dos agregados pode assumir um papel importante na preservação do meio ambiente, pois, além de diminuir a exploração de recursos naturais (como areia e brita), também ocasiona a redução dos resíduos sólidos acumulados na natureza.

Nesse contexto, percebe-se através da [Figura 2.2](#) que o maior número de publicações se encontram na área da construção civil, com destaque maior para os concretos com adição da borracha.

Figura 2.2 – Principais estudos da borracha de pneu identificados nos artigos de periódicos dentro do mapeamento realizado.



Fonte: o autor.

Thomas e Gupta (2016) apresentaram uma visão geral de algumas pesquisas publicadas sobre as propriedades do concreto com adição de borracha de pneu. Os estudos mostraram que há um futuro promissor para o uso da borracha como um substituto parcial do agregado em concreto. Tal substituição, porém, afeta diretamente a resistência à compressão, não sendo recomendado, então, substituições maiores que 20%.

Freitas *et al.* (2009) estudaram o desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus e constatou, por exemplo, que a adição do resíduo de borracha em substituição à massa de areia no concreto fresco diminuiu a trabalhabilidade do concreto resultante. Notou-se também a redução na massa unitária e aumento no teor de ar aprisionado.

Girskas e Nagrockienė (2017) também analisaram a influência dos resíduos de borracha triturada nas propriedades básicas de concreto. Para a análise foram fabricados traços com 5, 10 e 20% de substituição dos agregados por granulado de borracha, em massa. A resistência à compressão obtida decresce conforme se aumenta a porcentagem de substituição, chegando a redução de 68% para o traço com 20% de resíduo.

Ling (2012) analisou o comportamento de granulado de borracha de pneu em blocos de pavimentação sob os métodos de análise de resistência à compressão, à flexão e à derrapagem. Em seu estudo, ele substituiu a areia pelo resíduo de borracha, em volume, nas porcentagens de 0, 10, 20 e 30%, e pôde observar que quanto maior a proporção de borracha no bloco, menor era sua resistência à derrapagem, pois os corpos de prova sem partículas de borracha criavam mais fricção na camada superficial. Notou-se também que os blocos contendo granulado de borracha foram capazes de absorver maior quantidade de energia e a presença da borracha no concreto permitiu uma maior ductilidade do mesmo.

Sadek e El-Attar (2015) também avaliaram o efeito da borracha de pneu sobre as propriedades, dessa vez, de blocos de concreto e, conseqüentemente, sobre o comportamento estrutural de paredes de alvenaria sob compressão. A borracha utilizada pelos autores estava livre de aço e fibras têxteis e foi empregada em dois tamanhos para substituir os agregados graúdos e miúdos. Como resultado houve uma sistemática redução na resistência à compressão de acordo com o aumento do teor de granulado de borracha, independente do teor de cimento ou do tamanho do resíduo. Como foram produzidos blocos com granulados de borracha de tamanhos diferentes (fino e grosso), os autores perceberam que os tijolos contendo borracha fina obtiveram maior resistência à compressão do que os que continham borracha grossa. Percebeu-se ainda que a quantidade de água absorvida pelo concreto cresceu com o aumento da quantidade de granulado de borracha.

Ainda a respeito do uso da borracha em blocos, tem-se o estudo de Sodupe-Ortega *et al.* (2016). Os autores produziram blocos e tijolos com adição de 10 a 40% de borracha em volume, além de variar a relação água/cimento. Os testes mostraram deformações importantes e redução de mais de 60% da resistência à compressão, especialmente para porcentagens superiores a 20%. Devido a isso, os autores alertam que devem ser analisados os custos relacionados a obtenção do resíduo, para garantir que produtos com adição de borracha sejam lucrativos.

Já Fraile-Garcia *et al.* (2016), em seu estudo avaliaram o comportamento acústico de blocos, vigas e blocos para laje. Foram fabricados blocos com 0, 10 e 20% de borracha em sua composição. Os resultados demonstraram que os elementos com mais porcentagem de borracha são eficientes para isolar sons de baixa frequência, enquanto os demais são indicados para bloquear sons de média e alta frequência.

Silveira *et al.* (2016) mostraram a utilização do material em estudo (granulado de borracha) na fabricação de corpos de prova cilíndricos, aos quais foram aplicados testes de compressão axial, módulo de elasticidade, flexão simples sob carga centrada e fadiga. Os autores produziram diferentes misturas: concreto sem borracha, concreto com 10% de borracha e consumo de cimento igual ao de referência e concreto com 10% de borracha e acréscimo de 5 a 30% de cimento (até a obtenção da resistência do concreto de referência). Observou-se que a adição de borracha no concreto, sem o acréscimo de cimento, provocou uma redução de 44% na sua resistência à compressão.

Angelin *et al.* (2017) estudaram os efeitos da porosidade sobre o comportamento mecânico e a absorção de água de uma argamassa de cimento com substituição de 30% da areia natural fina por granulado de borracha reciclada de pneu. Comparando a argamassa com resíduo com a de referência, tem-se que houve uma redução de aproximadamente 27% da densidade na argamassa com borracha, porém a absorção de água da argamassa com resíduo foi 4 vezes superior ao de referência. Em relação a resistência à compressão tem-se uma redução de até 12 vezes quando adicionado o resíduo de borracha. Porém, há aplicações

distintas para a argamassa de borracha, considerando aspectos ambientais, econômicos e que demandem materiais mais leves.

Os estudos de Freitas *et al.* (2009), Ling (2012), Sadek e El-Attar (2015), Silveira *et al.* (2016), Thomas e Gupta (2016), Angelin *et al.* (2017) e Girskas e Nagrockienė (2017) se assemelham pelo fato de ocorrer alteração nas propriedades mecânicas do material em estudo à medida em que houve o acréscimo de borracha em sua composição, proporcionando uma notável redução na resistência à compressão. No entanto, de acordo com Boudaoud e Beddar (2012), a substituição de partes dos agregados tradicionais por resíduos de borracha apresenta tanto vantagens econômicas quanto ecológicas.

Dentre outros temas de estudo com a borracha de pneu, pode-se, então, destacar a adição da borracha na produção de asfalto e sua aplicação como adsorvedor, por exemplo, de íons de metais pesados e de poluentes tóxicos em soluções aquosas. Salienta-se que a borracha de pneu é comumente transformada em carvão ou submetida a outros processos físicos e químicos antes de ser utilizada como adsorvedor. Como tratamento e destinação final da borracha tem-se o processo de pirólise catalítica, que tem como objetivo produzir combustível através da borracha.

Percebe-se, então, que a borracha vem sendo estudada para aplicação em diversas áreas, no entanto há um reduzido número de pesquisas sobre sua aplicação na produção de tijolos de concreto. Assim, sua utilização na produção de tijolos, seja por adição ou substituição, poderia trazer grandes benefícios, como por exemplo: a redução de impactos ambientais devido ao descarte da borracha de pneu; redução dos custos de produção dos blocos, através da economia do uso de agregado e melhora de algumas propriedades físicas dos mesmos.

2.2 Lama Residual de Concreto

A indústria da construção foi reconhecida não só como uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento socioeconômico, mas também como uma das principais causadoras de impactos ambientais (CORREIA *et al.*, 2009). Nesse contexto, é de suma importância a adoção de técnicas inovadoras de reciclagem e reutilização de resíduos de cimento e concreto para a promoção da proteção ambiental e com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável na indústria do concreto (XUAN *et al.*, 2016a).

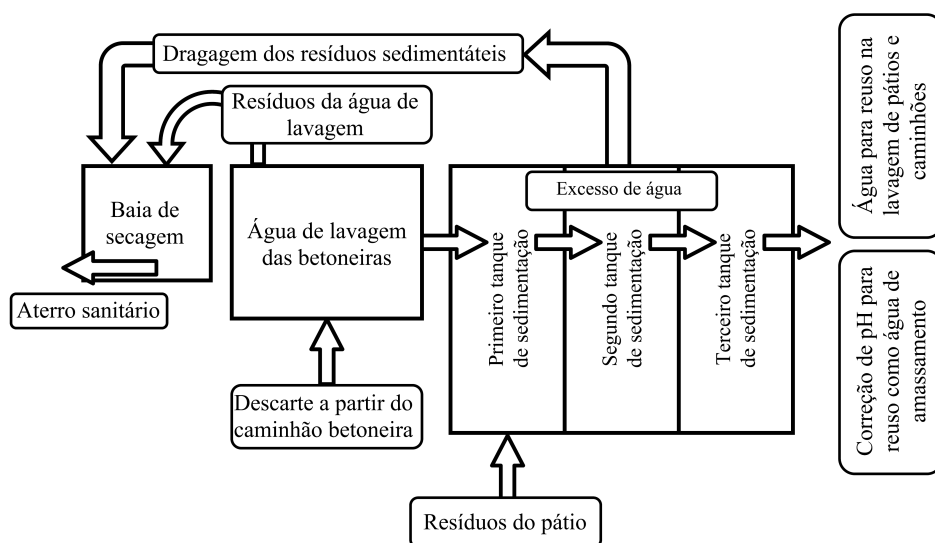
Através de um amplo estudo envolvendo 109 concreteiras de diversos estados brasileiros, Vieira e Figueiredo (2013) identificaram que as perdas de concreto durante a sua produção em usinas são dadas fundamentalmente dentro do seu processo produtivo (materiais que caem no pátio, concretos com abatimento inadequado e matéria-prima utilizada no controle tecnológico) ou durante sua fase de entrega, através do concreto devolvido às centrais dosadoras e do material aderido aos balões dos caminhões betoneira (lastro). Os

dados encontrados pelos autores vão ao encontro do estudo desenvolvido por [Sealey, Phillips e Hill \(2001\)](#) no Reino Unido, onde foram identificadas que a devolução de concreto às usinas e a lavagem de pátios e caminhões são as principais fontes de resíduos dentro de centrais dosadoras de concreto.

Uma iniciativa relativamente comum nas concreteiras é a utilização das sobras de concreto para realização de melhorias na própria empresa (concretagem do pavimento, confecção de blocos para separação de baias etc.); no entanto, este tipo de ação é limitada, visto que as melhorias na central são finitas ([VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013](#)). A lavagem de pátios e caminhões gera a chamada água residuária de concreto que, em função de suas características (alta alcalinidade, pH elevado e alto teor de sólidos), deve passar por um tratamento antes de sua descarga para um sistema público ou, até mesmo, para algum possível reuso ([PAULA; ILHA, 2014](#)).

Para a melhora da qualidade da água residuária do concreto, [Sealey, Phillips e Hill \(2001\)](#) e [Tsimas e Zervaki \(2011\)](#) apresentam métodos semelhantes (Figura 2.3). Basicamente, o sistema consiste em direcionar a água residuária à um primeiro tanque, para que ocorra a deposição dos sólidos em seu fundo, e o excesso de água transborda para outros dois tanques. A diferença se encontra a partir do terceiro tanque. Enquanto [Sealey, Phillips e Hill \(2001\)](#) sugerem que a água decantada seja reutilizada para lavagem do pátio e dos caminhões betoneira, [Tsimas e Zervaki \(2011\)](#) propõem a correção de seu pH para aproximadamente 7 (sete) e sua dissolução em água potável ou subterrânea em proporções pequenas (0 a 20%), para sua reutilização na produção de concreto.

Figura 2.3 – Sistema de tratamento da água residuária de usinas de concreto utilizando tanques de sedimentação.



Fonte: adaptado de [Sealey, Phillips e Hill \(2001\)](#).

Ao resíduo sólido sedimentado no fundo do primeiro tanque, composto basicamente

por agregado residual do concreto original e pasta de cimento, dá-se o nome de lama residual de concreto (SILVA, 2016). Periodicamente, é necessário que seja realizada a limpeza dos tanques, esvaziando-os e colocando todo o montante sólido a parte, numa baía de secagem. Após tal procedimento, pode-se dispor o resíduo em aterros sanitários (ERMCO, 2006). No entanto, a eliminação e disposição de resíduos sólidos tem se tornado um problema para a sociedade. Nesse contexto, iniciativas como a utilização de resíduos em elementos de concreto podem se apresentar como alternativas viáveis.

2.2.1 Caracterização da Lama Residual de Concreto na literatura

Algumas características físicas dos materiais constituintes de elementos de concreto são um fator de grande importância para seu desempenho. Nesse sentido, tanto a Lama Residual de Concreto, quanto os demais materiais constituintes, foram analisados por diferentes autores (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Características físicas do cimento Portland Tipo II-E e da Lama Residual de Concreto segundo alguns autores.

Material	Pesquisadores	Módulo de finura	Densidade (g/cm ³)	Densidade SSS* (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Lama Residual de Concreto	Correia <i>et al.</i> (2009)	1,58	-	-	-
	Kou, Zhan e Poon (2012a)	-	1,33	1,83	29,5 e 37,2
	Kou, Zhan e Poon (2012b)	3,73	-	1,83	38
	Rughooputh, Rana e Joorawon (2017)	5,3	1,94	2,24	15,8
	Sérifou <i>et al.</i> (2013)	3,2	2,4 e 2,6	-	13 e 4,3
	Audo, Mahieux e Turcry (2016)	-	2,2	-	-
CP II E-32	Correia <i>et al.</i> (2009)	2,9	3,02	-	-
Areia natural	Kou, Zhan e Poon (2012a)	2,11	2,59	2,63	0,89

*Condição Saturado Superfície Seca

Fonte: o autor.

Avaliando os intervalos dos resultados de caracterização encontrados para a Lama Residual de Concreto, pode-se verificar certa variação entre os parâmetros. Isso indica que o resíduo pode variar em função dos materiais incorporados ou das amostras avaliadas, ressaltando a importância da caracterização física para cada estudo. É possível perceber também que, quando comparado com os demais materiais, a lama possui características marcantes,

como: baixa densidade e alta absorção de água e, portanto, a sua utilização resultará em concretos menos densos e com uma maior demanda de água na mistura.

As características químicas do cimento Portland Tipo I e da Lama Residual de Concreto, segundo alguns autores, estão apresentadas na Tabela 2.5. Avaliando especificamente a composição elementar da lama residual, atribui-se a concentração de CaO e SiO_2 à presença do cimento e de areia fina restantes do concreto original (XUAN *et al.*, 2016a).

Tabela 2.5 – Características químicas do cimento Portland Tipo I e da Lama Residual de Concreto segundo alguns autores.

Frações (%)	Lama Residual de Concreto			CPI
	Audo, Mahieux e Turcry (2016)*	Schoon <i>et al.</i> (2015)	Xuan <i>et al.</i> (2016a)*	Xuan <i>et al.</i> (2016a)
SiO_2	53,54	45,53	32,47	19,57
CaO	34,46	25,37	35,54	64,51
Al_2O_3	1,92	5,66	8,34	3,81
Fe_2O_3	1,52	1,65	6,75	3,12
SO_3	0,77	2,03	3,12	5,43
MgO	-	3,93	1,22	1,48
K_2O	-	0,54	1,55	0,69
TiO_2	-	0,41	0,52	0,27
Na_2O	-	0,26	-	-
P_2O_5	-	0,17	-	-
Cl	-	0,06	-	-
LOI**	-	14	10,03	1,08

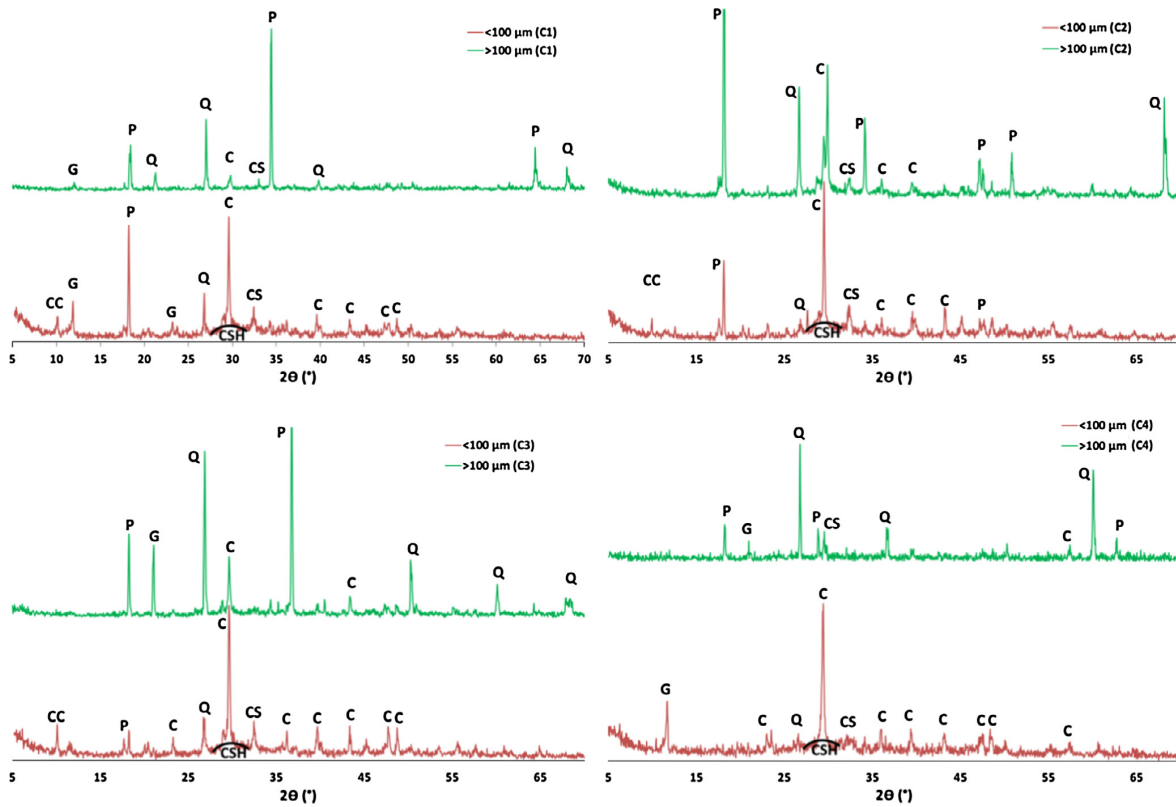
* Resultados médios

** Loss On Ignition - Perda de peso após 1050 °C

Fonte: o autor.

Audo, Mahieux e Turcry (2016), em seu estudo, apresentaram o Difratoograma de Raios-X (DRX) referente a parcela menor e maior que 100 μm da Lama Residual de Concreto de quatro usinas de concreto distintas (C1, C2, C3 e C4), conforme Figura 2.4. Os autores observaram que as amostras apresentaram basicamente os mesmos picos, mas com proporções diferentes. Ressaltaram que a parcela mais grossa é formada basicamente por agregados, sendo observados a presença de Quartzo (SiO_2) e Calcita ($CaCO_3$), bem como agregados formados por Portlandita ($Ca(OH)_2$) e/ou CSH conglomerado. Na parcela mais fina também identificaram Quartzo, Calcita e Portlandita, além de Gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e silicatos de cálcio hidratados e anidros. Os autores salientaram, então, que a presença de silicatos de cálcio anidro demonstra um potencial residual de atividade hidráulica.

Figura 2.4 – Difração de Raios-X das amostras C1, C2, C3 e C4. (C: Calcita, CC: Carbonato de Cálcio Hidratado; CS: Silicatos de Cálcio; CSH: Silicatos de Cálcio Hidratados; G: Gesso; P: Portlandita; Q: Quartzzo).

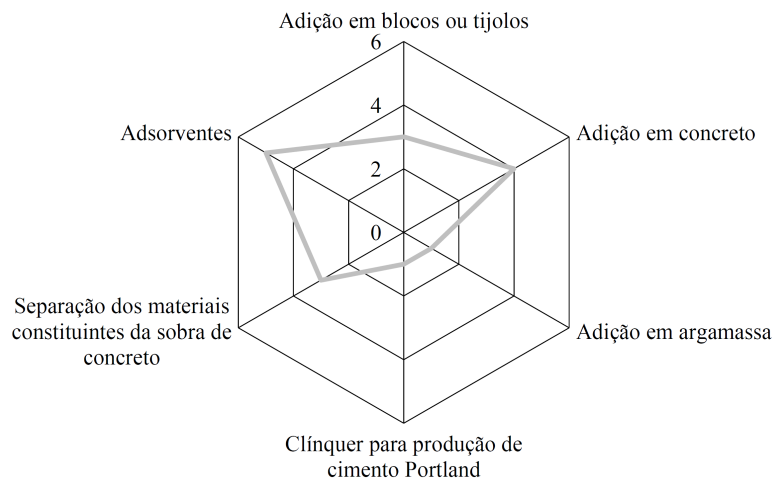


Fonte: Audo, Mahieux e Turcry (2016).

2.2.2 Possibilidades de usos da Lama Residual de Concreto

Através da leitura dos artigos selecionados, percebeu-se que os autores propuseram diferentes vertentes de estudos, conforme Figura 2.5.

Figura 2.5 – Principais funções da Lama Residual de Concreto identificadas nos artigos de periódicos dentro do mapeamento realizado.



Fonte: o autor.

Kou, Zhan e Poon (2012a) tiveram por objetivo verificar a viabilidade do uso da lama cimentícia na produção de um novo concreto. Para tal, a lama foi utilizada seca e triturada como agregado graúdo, e então foi usada para substituir agregado natural em porcentagens de 0, 15, 30 e 50%, na produção de novas misturas de concreto. Em ambos os traços com adição da lama observou-se a redução da densidade, porém um aumento da absorção. Em relação a resistência à compressão tem-se que houve uma redução se comparados ao de 0% de aproximadamente 21, 39 e 59% para os traços com 15, 30 e 50%, respectivamente. No entanto, pode-se salientar a viabilidade de aplicação da lama para a produção de concreto não estrutural.

Já Correia *et al.* (2009), utilizaram a Lama Residual de Concreto como substituição do agregado miúdo do concreto, além de variar a relação água/cimento, e utilizando um planejamento experimental (DoE). Observou-se que o aumento da relação água/cimento (a/c) contribui para o aumento da porosidade total e aumenta assim a absorção de água. Com relação a resistência à compressão tem-se que o uso da lama teve pouco efeito, havendo uma pequena diminuição da resistência conforme se aumentava a porcentagem de substituição. Isso demonstra que a substituição do agregado fino natural usual, pela lama de concreto, pode ser uma alternativa viável e econômica.

Sérifou *et al.* (2013) e Rughooputh, Rana e Joorawon (2017) também analisaram a influência da lama residual nas propriedades do concreto, no entanto foram substituídos parcialmente tanto os agregados miúdos quanto os graúdos. Em ambos os estudos também houve uma redução da resistência à compressão conforme se aumentava a porcentagem de substituição.

Audo, Mahieux e Turcry (2016) compararam o uso do resíduo seco e fresco como substituto de fíler de calcário em argamassa. Ao final, os autores concluíram que, apesar das duas propostas obterem resistências à compressão equivalentes, a argamassa produzida com a lama residuária no estado fresco apresentou maior trabalhabilidade, necessitando assim de menor quantidade de plastificantes e, conseqüentemente, sendo a opção mais viável. No entanto, vale salientar que, para o estudo foram utilizadas amostras de quatro usinas de concreto diferentes, o que ocasionou uma variabilidade na resistência à compressão das argamassas, entre menos 30% e mais 17% quando comparadas a uma argamassa de referência.

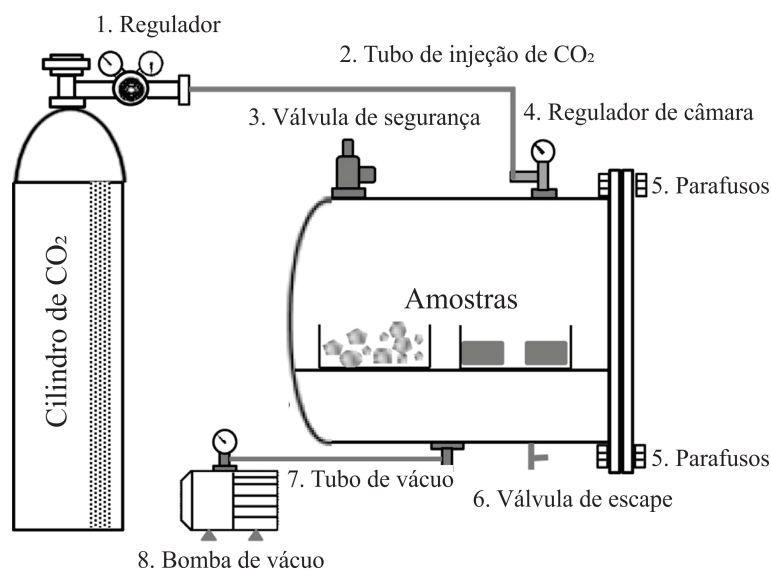
O resíduo de concreto, em especial as sobras dos caminhões betoneiras, pode ser ainda submetido a equipamentos recuperadores, que separam os agregados, a água e a lama cimentícia. Tam e Tam (2007) em seu estudo, mostraram que os custos com as práticas atuais de despejo do resíduo em aterros são o dobro do que se utilizar a reciclagem dos agregados. No entanto, Vieira e Figueiredo (2016), salientaram que os agregados obtidos devem ser usados apenas em concreto com resistência inferior a 25 MPa. Logo, a adoção da recuperação do concreto pode fornecer um método econômico para o setor de construção e reduzir os impactos ao meio ambiente.

Schoon *et al.* (2015) trouxeram uma análise do uso da lama cimentícia como clínquer para o cimento; porém, concluem que o material não está apto para tal função, principalmente por conta da não adequação físico-química. A variação química dentre as amostras estudadas e alto teor de SiO_2 (% em peso), indicam que a lama não tem alto potencial como matéria-prima alternativa para produção de clínquer de cimento Portland.

Outra vertente de estudo é sobre a aplicação da lama como adsorventes. Como exemplo pode-se citar o estudo de Sasaki *et al.* (2014), que ressalta a utilização de procedimentos simples, através de adsorventes preparados e derivados de resíduos de cimento e concreto, e que podem oferecer uma abordagem econômica para remoção de arsênico e limpeza de águas contaminadas, especialmente em países em desenvolvimento.

Avaliando especificamente os estudos que utilizaram a lama residual em blocos de concreto, tem-se os estudos de Xuan *et al.* (2016a) e Xuan *et al.* (2016b), que além da utilização do resíduo de concreto, propuseram também a utilização da carbonatação acelerada com CO_2 como método de cura. Tal processo permite um rápido desenvolvimento da resistência aproveitando as reações químicas entre a hidratação do cimento e o CO_2 . A Figura 2.6 ilustra o esquema do equipamento para cura com carbonatação acelerada com CO_2 . Tem-se então, em ambos os estudos, que esta metodologia pode trazer benefícios já nas primeiras horas para os blocos com adição de resíduos como, por exemplo, um rápido desenvolvimento da resistência inicial e uma menor retração por secagem para a mistura de concreto preparada.

Figura 2.6 – Esquema do equipamento de carbonatação acelerada com CO_2 .



Fonte: adaptado de Xuan *et al.* (2016b).

Já Kou, Zhan e Poon (2012b) apenas analisaram a utilização da lama residual seca como agregado miúdo para a produção de blocos de concreto. Os autores substituíram a

areia natural por 25, 50, 75 e 100% em peso pelo resíduo. Foi verificado que, com o aumento da quantidade de resíduo, houve uma redução da densidade, um aumento da absorção e também acréscimo na resistência à compressão se comparados com os blocos sem resíduo. Vale salientar que os blocos com 50% de substituição apresentaram as maiores resistências. Os referidos autores atribuíram essa elevação de resistência ao efeito fíler e à possibilidade de haver cimento ainda não hidratado no resíduo.

É notório que as pesquisas têm abordado o resíduo cimentício em diferentes tipos de usos e funções; no entanto, a utilização da lama residual seca como substituto do aglomerante na produção de blocos de concreto ainda não foi estudada. Tal proposta corrobora com o exposto por [Mehta, Monteiro e Filho \(1994\)](#), em que o foco da mistura do concreto deve estar em proporções que minimizem a demanda por cimento, uma vez que tal componente é mais oneroso que os demais constituintes, além de resultar em uma grande liberação de CO_2 para sua produção.

Avaliando as alternativas apresentadas, é possível verificar que ainda não há um consenso quanto à melhor alternativa para a reutilização da Lama Residual de Concreto, ressaltando, assim, a necessidade de novas pesquisas na área. No entanto, o cimento Portland é o componente que agrega maior valor na fabricação de unidades de alvenaria e, portanto, a utilização da lama residual de concreto como seu substituto poderá não só trazer benefícios ambientais, mas também reduzir diretamente os custos de produção. Nesse sentido, a oportunidade que se tem é de transformar esse resíduo cimentício em uma matéria-prima para outros materiais ou produtos.

2.3 Planejamento e Otimização de Experimentos

A demanda por um grande número de experimentos pode tornar inviáveis algumas pesquisas. No entanto, utilizando artifícios estatísticos é possível reduzir tal número. Adotar planejamentos experimentais com base em princípios estatísticos, pode-se obter com o estudo, um grande número de informações úteis através de uma reduzida quantidade de experimentos ([BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010](#)).

Realizar um planejamento de experimentos tem por objetivo determinar, ou mesmo quantificar, a influência das variáveis independente (fatores) no resultado final (variáveis dependentes), sendo indispensável para a confiabilidade dos resultados ([RODRIGUES; IEMMA, 2014](#)). Tem-se então, que um bom planejamento é aquele capaz de fornecer informações ao que se procura ([BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010](#)).

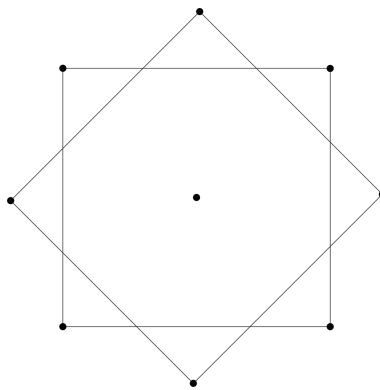
De início, em um experimento, deve-se determinar os fatores e os resultados de interesse para o sistema em estudo e definir os objetivos que se deseja alcançar. A partir de então, pode-se utilizar métodos de planejamentos experimentais para o auxílio da obtenção e análise dos resultados ([BISPO, 1999](#)).

Alguns dos métodos mais conhecidos são: Simplex, Planejamento fatorial e a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Através destes métodos é possível verificar as iterações e os efeitos individuais de todas as variáveis no processo (BISPO, 1999).

Rodrigues e Iemma (2014) colocam como um planejamento experimental para solução de projeto experimental o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), que é um Delineamento Composto Central (DCC) que tem pontos axiais definidos, sendo a denominação “Central Rotacional” devido ao fato de que os pontos escolhidos no espaço amostral estão equidistantes do ponto central (REZENDE *et al.*, 2012). O DCC possui características interessantes para a busca do ponto que dê a resposta ótima, que são: um número menor de tratamentos em relação aos fatoriais completos e pode ser realizado sequencialmente, de forma a caminhar no sentido da otimização do sistema (MATEUS; BARBIN; CONAGIN, 2008).

Tem-se ainda que o DCCR é um delineamento simétrico e de segunda ordem, formado por um ou mais pontos centrais e pontos axiais, conforme Figura 2.7. Os pontos de vértice fornecem os efeitos principais lineares e todos os efeitos de interação dois a dois. Já os pontos axiais permitem a estimativa dos efeitos quadráticos (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

Figura 2.7 – Representação esquemática do DCCR para 2 fatores.



Fonte: Rodrigues e Iemma (2014).

Os dados obtidos através do DCCR podem então ser tratados pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), que consiste na variação simultânea de vários fatores (variáveis independentes), previamente selecionados por sua influência nas propriedades do processo (variáveis dependentes ou resposta). Assim, utilizando técnicas matemáticas e estatísticas, a MSR tem como objetivo determinar qual é a condição de operação do processo que levará à obtenção de um valor ótimo para a variável resposta (GRIZOTTO *et al.*, 2005).

Segundo Gonçalves e Sturaro (2010) a aplicação prática da MSR envolve a construção de um modelo de aproximação para a melhor superfície de resposta, baseado nos dados observados do sistema, constituindo-se no modelo empírico.

Como exemplo de aplicação desta metodologia tem-se o estudo de [Rezende et al. \(2012\)](#), que realizaram um estudo preliminar acerca da substituição do cimento por cinco teores de metacaulim. Devido ao grande número de variáveis, os autores adotaram o planejamento experimental estatístico Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), sendo os resultados analisados pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Como conclusão os autores destacaram que a metodologia de superfície de resposta foi eficiente perante os objetivos propostos, de forma a permitir estimar os níveis ótimos de substituição.

Em relação ao uso da Lama Residual de Concreto, pode-se destacar o trabalho de [Correia et al. \(2009\)](#) que ressaltam a importância de utilizar ferramentas que são capazes de fornecer indicações claras, além de demandar um menor tempo e consumo de trabalho, salientando o caso do uso da modelagem das propriedades do sistema utilizando algum planejamento estatístico de experimentos. No trabalho os autores utilizaram um modelo fatorial 3^2 para modelar o índice de consistência do concreto fresco, a absorção de água e a resistência à compressão do concreto endurecido, ambos estados com adição de resíduo. Os autores concluíram, então, que ao utilizar um planejamento experimental foi possível uma avaliação mais rápida do potencial de reciclagem do resíduo em estudo, salientando a aplicação do método como diretrizes para produção de concreto contendo agregados reciclados da Lama Residual de Concreto.

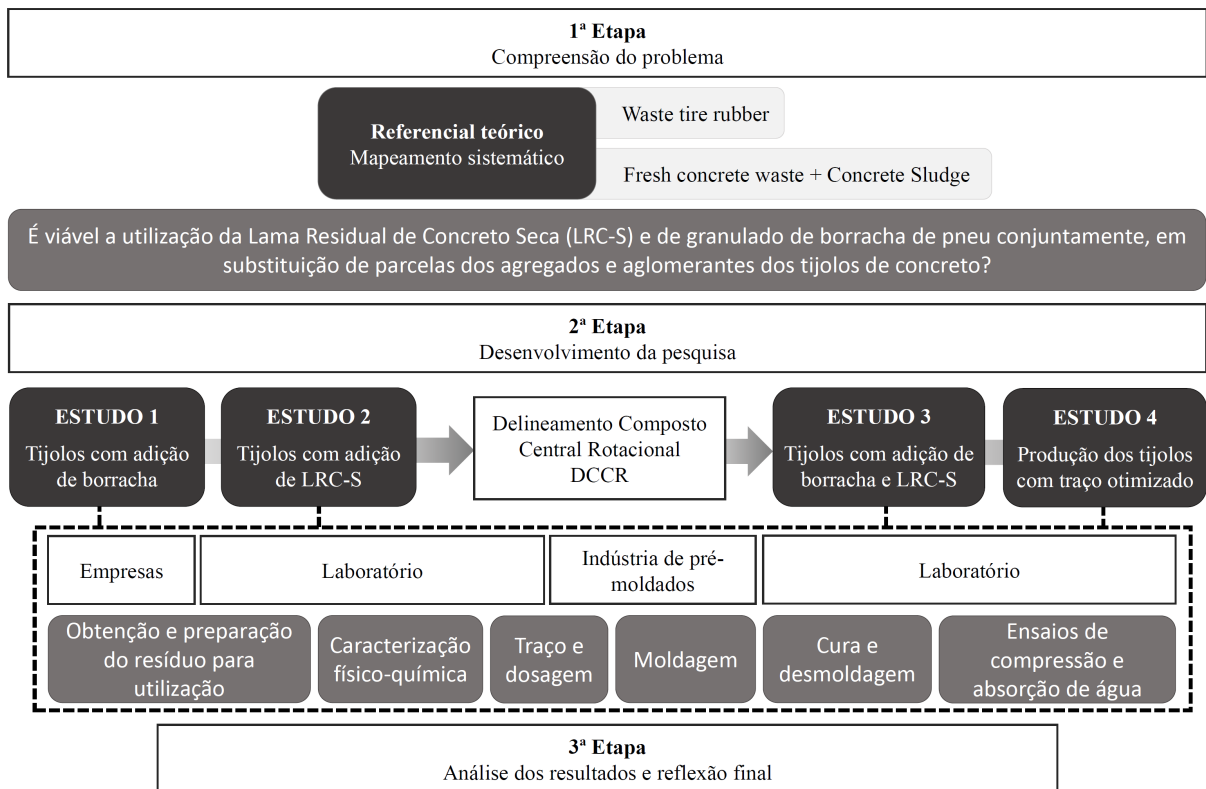
Capítulo 3

MÉTODO DA PESQUISA

3.1 Delineamento do Processo da Pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas distintas: (1) compreensão do problema e definição do escopo, (2) desenvolvimento da pesquisa e (3) análise dos resultados e reflexão final, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Delineamento geral da pesquisa.



Fonte: o autor.

3.1.1 Compreensão do problema

Através do mapeamento sistemático da literatura foi possível definir o escopo da pesquisa, sendo então, a primeira etapa do estudo. Como resultado do mapeamento foram obtidas duas vertentes, mas pouco estudadas: inserção da borracha de pneu como substituto parcial do agregado miúdo e o uso da Lama Residual de Concreto Seca (LRC-S) como substituto parcial do aglomerante, ambos em tijolos de concreto.

Partindo destas premissas pode-se definir a questão da pesquisa: “É viável a utilização de resíduos de usinas de concreto e de borracha conjuntamente, em substituição de parcelas dos agregados e aglomerantes dos tijolos de concreto?”. Busca-se, então, verificar através de um planejamento experimental e otimização dos processos a viabilidade do uso dos dois resíduos conjuntamente para a produção de tijolos.

3.1.2 Desenvolvimento da pesquisa

Realizada a revisão bibliográfica e definido o escopo da pesquisa, partiu-se para a segunda etapa, denominada desenvolvimento da pesquisa, a qual consistiu na realização de quatro estudos.

De início, no Estudo 1, foram produzidos e analisados os tijolos com substituição parcial do agregado miúdo por granulado de borracha de pneu. Por conseguinte, foi realizado o Estudo 2, sendo produzidos e analisados os tijolos com substituição parcial do cimento pela LRC-S. Em ambos os estudos foram realizadas a caracterização química e física dos materiais utilizados, para então realizar a moldagem dos tijolos e, posteriormente, os ensaios de compressão e absorção.

Cabe destacar que, nos Estudos 1 e 2, não houve a preocupação em manter os mesmos traços e/ou materiais. Em ambos os casos os traços foram adotados a partir da experiência da empresa.

Verificada a viabilidade de utilização dos resíduos, foi iniciado o estudo de otimização da quantidade de substituição das duas variáveis independentes: borracha e LRC-S. Para ampliar a avaliação do espaço experimental e reduzir o número de experimentos, foi adotado o Delineamento de Composto Central Rotacional (DCCR).

Após determinar o espaço experimental foi iniciado o Estudo 3, que visou obter um traço de concreto para tijolos com maior porcentagem de substituição do agregado miúdo por borracha e do cimento por LRC-S. As faixas ótimas de substituição foram, então, definidas via Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

Após definir as faixas de substituições ideais, no Estudo 4, foi efetuado a validação dos teores obtidos, através da moldagem de novos tijolos.

3.1.3 Análise dos resultados

Como a ideia deste estudo é propor um novo produto, ainda não há normatização específica e, nesse contexto, a análise de viabilidade dos tijolos produzidos foi realizada de três maneiras: comparação com os requisitos mínimos de desempenho contidos na NBR 7170 (ABNT, 1983), na NBR 8491 (ABNT, 2012a) e na NBR 6136 (ABNT, 2014b); comparação com os tijolos maciços cerâmicos produzidos na região; e análise estatística entre os dados. Foi utilizado o teste de média de Scott-Knott (SCOTT; KNOTT, 1974) para os Estudos 1 e 2, sendo que este método apresenta a vantagem de separar as médias em grupos discretos, sem sobreposição entre eles, e apresenta resultados diretos e de fácil interpretação (CANTERI *et al.*, 2001), e Análise de Variância (ANOVA) para o Estudo 3, ambos com significância $p = 0,05$. Os resultados do Estudo 4 foram, então, comparados com os do Estudo 3, de modo a validar as porcentagens ótimas obtidas.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Materiais

Para os tijolos de concreto com adição de granulado de borracha de pneu (Estudo 1) foram utilizados para produzir os corpos de prova: cimento CP II-E a granel, que é indicado para uso geral, areia natural, resíduo de borracha provindo da recauchutagem de pneu e água. Uma vez que o estudo consiste em empregar o granulado de borracha no lugar da areia, fez-se uso do resíduo com granulometria semelhante de tal.

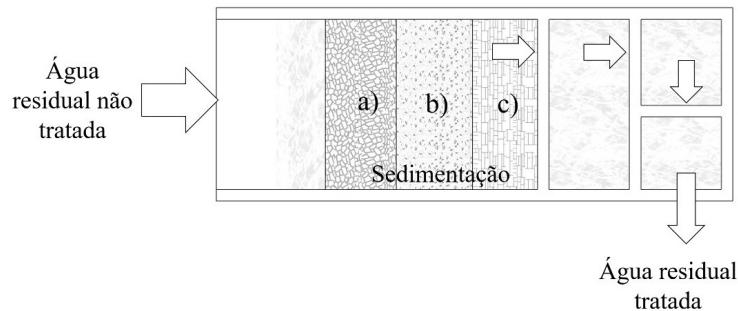
Os tijolos de concreto com adição de LRC-S (Estudo 2) foram produzidos utilizando o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Este tipo de cimento desenvolve sua resistência rapidamente devido ao seu maior grau de moagem e ao teor de silicatos tricálcicos acima de 70% (NEVILLE, 2013). Em função desta característica, o CP V-ARI é muito utilizado em indústrias de pré-moldados, possibilitando uma rápida desforma dos artefatos de concreto e o reinício do processo produtivo. Já para a função de agregado, o material utilizado foi a areia artificial, também conhecida como “pó de pedra”.

Já a Lama Residual do Concreto (LRC) foi obtida no sistema de tratamento de água residuária de concreto de uma central dosadora. A seleção da usina se deu em função da localização da empresa, do tipo de sistema de tratamento da água residuária e da disposição de seus gestores em fornecer o resíduo necessário para desenvolvimento da pesquisa.

Durante a coleta do resíduo, foi observado que o primeiro tanque ou câmara de sedimentação estava dividido em três zonas (Figura 3.2): (a) zona com predominância de concreto descartado (pasta de cimento e agregados miúdos e graúdos); (b) Zona de transição composta por maior parte de pasta de cimento e agregado miúdo e (c) Zona composta em grande parte por finos sedimentados em forma de placas. Buscando coletar um resíduo com

menor granulometria, optou-se pela coleta na zona (c).

Figura 3.2 – Zonas do tanque de sedimentação.



Fonte: o autor.

O processo de obtenção e preparação do resíduo para sua utilização nesta pesquisa, em suma, consistiu nas seguintes etapas: escolha da usina fornecedora, coleta da LRC, secagem prévia, secagem em estufa, moagem e peneiramento da Lama Residual de Concreto seca (LRC-S) e montagem dos kits de moldagem (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Processo de obtenção da LRC (a, b) e preparação da LRC-S para utilização (c-f).



Fonte: o autor.

Para que se pudesse preparar o material, houve a necessidade de uma secagem prévia ao sol, seguida pela secagem em estufa a 100 ± 5 °C. A moagem e o peneiramento se deram de forma manual com o auxílio de um almofariz e de uma peneira de abertura de 0,5 mm. O material passante era coletado para uso e o retido era novamente moído para aumentar a sua finura. Por fim, o resíduo e o cimento foram separados em kits compostos pelo cimento

e resíduo que foram utilizados para cada traço, facilitando a mistura dos materiais no dia de moldagem.

A partir dos resultados dos Estudos 1 e 2 foram definidos os materiais para os Estudos 3 e 4. Assim, foi adotado como aglomerante o cimento CP V-ARI, pois com ele foi possível realizar a desforma após 24 horas de cura, agilizando o processo. A LRC-S foi a mesma adotada nos estudos anteriores (retirada do mesmo local e condições) e, para o granulado de borracha, foi adotado com granulometria mais fina, pois segundo [Sadek e El-Attar \(2015\)](#) os blocos com borracha mais fina apresentaram maior resistência. Em relação aos agregados não se notou nenhuma diferença que inviabilize o uso da areia natural ou artificial, assim, se utilizou a areia artificial que estava disponível nos dias das moldagens.

3.2.2 Ensaios de caracterização química

A caracterização química dos materiais foi dividida em duas etapas: a) análise da composição química elementar do cimento CP V-ARI e CP II-E, da LRC-S, do granulado de borracha, da areia natural e artificial; e b) ensaio de difração de raios X da LRC-S.

A composição química elementar dos materiais foi determinada com o auxílio do espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (Schimadzu EDX 7000/8000). Antes do ensaio, as amostras avaliadas foram colocadas em estufas a 100 ± 5 °C por um período contínuo de 24 h, e homogeneizadas a fim de minimizar possíveis alterações do resultado.

Já a LRC-S foi também caracterizada estruturalmente por difração de raios-X (DRX), e os difratogramas foram obtidos através de difratômetro XRD-6100 Shimadzu, utilizando a radiação $\text{CuK}\alpha$ do cobre ($\lambda = 1,54148$ Å), no intervalo angular na faixa $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$, e com passo para contagem de $0,01^\circ$. O difratograma obtido foi comparado com o banco de dados do ICDD - *International Center for Diffraction Data*, através dos *Powder Diffraction File* (PDF).

3.2.3 Ensaios de caracterização física

As curvas granulométricas da areia natural e artificial, do granulado de borracha e da LRC-S foram designadas conforme o prescrito pela NBR NM 248 ([ABNT, 2003](#)), utilizando as peneiras com as malhas descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.

	Malhas											
Mesh	3/8	1/4	4	8	9	16	20	30	50	100	200	270
mm	9,5	6,3	4,75	2,36	2,00	1,18	0,85	0,6	0,3	0,15	0,075	0,053

Fonte: adaptado de [ABNT \(2003\)](#).

O ensaio de densidade de partículas foi realizado com o cimento CP V-ARI, a areia artificial, a LRC-S e a borracha e os materiais foram avaliados conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1997), no caso dos resíduos foi necessária uma adaptação. Segundo o referido método, o ensaio deveria ser realizado com o auxílio de um balão volumétrico de 50 ml. No entanto, devido à baixa densidade da borracha e alto índice de finura de LRC-S, o volume era preenchido em quase sua totalidade e, assim, o álcool não conseguia umedecer toda sua massa. Portanto, para o caso dos resíduos, foi utilizado um balão volumétrico de 100 ml para a mesma massa de material.

3.2.4 Definição dos traços e das porcentagens de substituição

Foi realizada uma parceria com uma empresa especializada na fabricação de peças pré-moldadas, a qual ficou responsável por fornecer o traço, materiais, mão-de-obra e maquinário para a confecção dos tijolos. O traço adotado como referência é utilizado pela empresa na produção de blocos vazados de concreto sem função estrutural e, neste estudo, foi adaptado para tijolos maciços de concreto (200 x 100 x 60 mm), conforme Figura 3.4.

Figura 3.4 – Tijolos de concreto após a desmoldagem.



Fonte: o autor.

No Estudo 1 foram produzidos quatro traços com a substituição, em volume, da areia, sendo um de referência (sem adição de borracha) e os demais a uma taxa de 5, 10 e 20% de substituição da areia por granulado de borracha, conforme Tabela 3.2. O microconcreto utilizado tinha consistência seca, com relação água/cimento de 1,0 (um), apresentando um *slump* de aproximadamente 0 mm.

Tabela 3.2 – Traço dos materiais utilizados na produção dos tijolos do Estudo 1.

Traço	Massa (kg)			Volume		
	CP II	Areia	Borracha	CP II	Areia	Borracha
B-0%	1	9,46	0,00	1	7,5	0,0
B-5%	1	8,98	0,87	1	7,1	0,4
B-10%	1	8,50	1,74	1	6,8	0,7
B-20%	1	7,56	3,50	1	6,0	1,5

Fonte: o autor.

Já no Estudo 2 foram produzidos cinco traços com a substituição, em massa, do cimento Portland, sendo um de referência (sem adição de resíduo) e os demais a uma taxa de 10, 20, 30 e 40% de substituição do cimento pela LRC-S (Tabela 3.3). O microconcreto utilizado também tinha consistência seca, com relação água/cimento de 1,2; apresentando um *slump* de aproximadamente 0 mm.

Tabela 3.3 – Traço dos materiais utilizados na produção dos tijolos do Estudo 2.

Traço	Massa (kg)			Volume		
	CP V - ARI	LRC-S	Areia artificial	CP V - ARI	LRC-S	Areia artificial
R-0%	1,0	0,0	16	1,0	0,00	12,44
R-10%	0,9	0,1	16	0,9	0,21	12,44
R-20%	0,8	0,2	16	0,8	0,42	12,44
R-30%	0,7	0,3	16	0,7	0,63	12,44
R-40%	0,6	0,4	16	0,6	0,84	12,44

Fonte: o autor.

Para determinação das faixas ótimas da associação dos resíduos de borracha e a LRC-S para produção de tijolos de concreto do Estudo 3 utilizou-se o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

A matriz dos ensaios realizados foi gerada utilizando os seguintes valores codificados dos níveis dos fatores: baixo (-1), alto (+1), ponto central (0) e pontos axiais ($\pm\alpha$). Foi adotado α igual a 1,4142, pois segundo [Diamond \(1989\)](#), para esse valor, o planejamento apresenta propriedades de rotacionalidade e ortogonalidade, sendo que, pela rotacionalidade se obtém variâncias idênticas para pontos situados a mesma distância do centro, em qualquer direção e a ortogonalidade permite estimar independentemente os coeficientes do modelo ([CONAGIN, 1982](#)).

O DCCR foi realizado com dois níveis originais, sendo 2^K ($K = 2$ fatores; 2 níveis) pontos fatoriais, mais $2 \times K$ pontos axiais e mais cinco repetições do ponto central, totalizando 13 ensaios ou corridas.

O nível alto foi estipulado como sendo a maior porcentagem de substituição dos resí-

duos nos tijolos, conforme Estudos 1 e 2, e que garanta o atendimento as normas pertinentes. Para o ponto axial baixo determinou a ausência de resíduos.

Tem-se então como variáveis independentes as porcentagens de substituição do granulado de borracha (X_1) e da LRC-S (X_2). Como variável dependente tem-se a resistência à compressão (Y_1) e a absorção de água (Y_2), ambos aos 28 dias.

Através de cada resposta, Y_i foi representada matematicamente, correlacionando os coeficientes dos modelos de regressão e as variáveis independentes, sobre cada variável resposta, conforme a Equação 3.1:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 \quad (3.1)$$

Sendo: Y : resposta predita; β_0 , β_1 , β_2 , β_{12} , β_{11} e β_{22} são os parâmetros do modelo de regressão.

As superfícies de resposta, gráficos de Pareto e de contorno e os modelos de regressão das variáveis independentes foram gerados com o emprego do módulo DoE do aplicativo Statistica® 10.0 (STATSOFT, 2011). A adequação dos modelos propostos foi avaliada pela proporção da variação explicada pelo modelo, isto é, pela análise do coeficiente de determinação (R^2) e pela análise de variância (ANOVA).

Partindo dos resultados do Estudo 3, para o Estudo 4, foram definidos quatro traços para validação dos teores obtidos, sendo um de referência (sem adição de resíduos), e os demais com porcentagens de substituições que apresentaram resistência à compressão dentro do limite estabelecido pela NBR 6136 (ABNT, 2014b). Salienta-se que foi adotado um traço com o máximo de porcentagem de substituição que atendeu a referida norma, um com o mínimo de resíduo e um intermediário.

3.2.5 Proporcionalamento e produção dos tijolos de concreto

Para compor os traços dos tijolos, no Estudo 1, a massa de cada material foi aferida diretamente na empresa de pré-moldados e posteriormente colocados na betoneira para serem misturados juntamente com água. Após certo tempo de mistura, a massa foi disposta nas formas sob a mesa vibratória para sua melhor acomodação ou adensamento. A cura dos tijolos foi realizada por aspersão de água, duas vezes ao dia, no período de cinco dias. Após esse período os tijolos foram desmoldados.

Nos Estudos 2, 3 e 4 houve um controle maior em relação a moldagem dos tijolos. Assim, o proporcionalamento dos materiais teve início no laboratório com a preparação dos kits de moldagem contendo as frações de cimento e de lama residual que seriam utilizadas na confecção dos tijolos. Já as proporções de areia artificial e da água foram mensuradas

diretamente na empresa de pré-moldados. Como a areia artificial disponível estava úmida, utilizou-se do ensaio expedito da frigideira para mensurar a umidade e reajustar o traço.

Para dar início à mistura dos materiais, a betoneira foi preparada para utilização, sendo lavada e imprimada antes de cada traço produzido. Após este processo, os materiais foram misturados por cerca de 2 min e, em seguida, colocados em fôrmas plásticas dispostas na mesa vibratória. O processo de compactação e adensamento foi composto pela associação da vibração imposta pela mesa e pela posterior compactação manual realizada pelos operários.

Após a moldagem, os tijolos foram envoltos por uma lona e dispostos no pátio da empresa durante um dia, sendo molhados por duas vezes dentro deste período. No dia seguinte, os tijolos foram desmoldados e submetidos à cura úmida por imersão em água por 7 dias. Após esse período os tijolos foram secos ao ar conforme prescreve a NBR 12118 (ABNT, 2014a).

3.2.6 Ensaio de compressão simples e absorção de água

Os ensaios de compressão simples em tijolos de concreto ainda não são normatizados, então, os tijolos foram apenas centralizados na base da prensa, garantindo paralelismo entre as faces, para assim obter a carga de ruptura do mesmo. Ao multiplicar a carga pela área de contato do tijolo com a prensa é possível obter a tensão de ruptura do tijolo. Para a absorção de água o ensaio foi realizado segundo a NBR 8492 (ABNT, 2012b). A determinação da resistência à compressão foi auxiliada pela prensa hidráulica modelo YAW-2000 - Classe 1, calibrada de acordo com a NBR NM ISO 7500-1 (ABNT, 2016). Com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento dos tijolos de concreto ao longo do período de cura, foram realizados os ensaios de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias para os tijolos com granulado de borracha (Estudo 1), aos 7, 14, 21 e 28 dias para os tijolos com LCR-S (Estudo 2), aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias para os tijolos com os dois resíduos (Estudo 3) e aos 3, 7, 14 e 28 dias para o Estudo 4.

O tamanho da amostra para realizar os ensaios de compressão simples foi determinado de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2014b), que recomenda um mínimo de seis (6) tijolos para realização do ensaio, quando não se tem o desvio padrão da fábrica. Já o ensaio de absorção de água foi realizado apenas aos 28 dias, sendo utilizadas três unidades para cada traço. Para tanto, foram produzidos 21, 27, 33 e 27 tijolos para cada traço dos Estudos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Assim, para cada tijolo foi calculado o valor de absorção de água em porcentagem a partir da Equação 3.2 (ABNT, 2014a):

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Em que:

A é a absorção de cada corpo de prova, expressa em porcentagem (%);

m_1 é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);

m_2 é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

Com relação aos tijolos cerâmicos, foram ensaiados nove tijolos cerâmicos maciços (190 x 90 x 57 mm), sendo seis destinados ao ensaio de compressão simples e três ao de absorção de água. Vale ressaltar, ainda, que os corpos de prova de concreto utilizados para o ensaio de absorção de água foram reutilizados para a determinação da densidade através do cálculo padrão de densidade para sólidos regulares, sendo a razão entre a massa seca do tijolo e seu respectivo volume, conforme Equação 3.3.

$$d = \frac{m_1}{V} \quad (3.3)$$

Em que:

d é a densidade em gramas por centímetros cúbicos (g/cm³);

m_1 é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);

V é o volume do corpo de prova seco, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

Capítulo 4

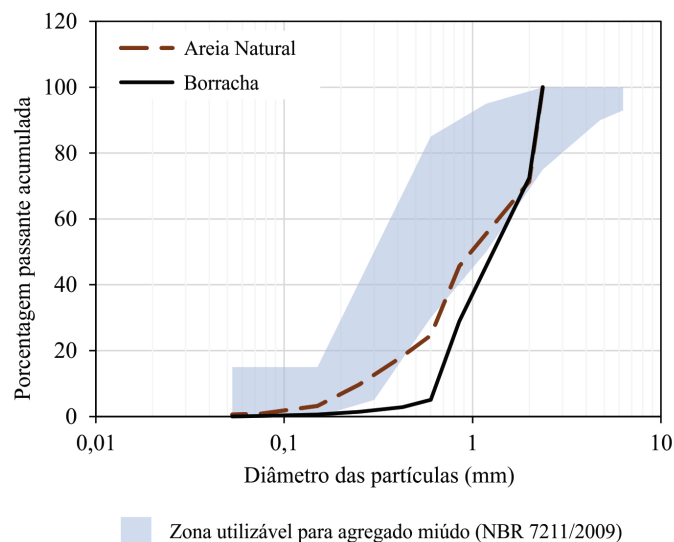
RESULTADOS

4.1 Caracterização dos Materiais

4.1.1 Distribuição granulométrica e densidade de partículas

Os ensaios de granulometria, para o Estudo 1, tanto da areia quanto do resíduo de borracha, apresentaram semelhanças. Em ambos os casos, ficou a maior parcela do material retida nas peneiras com abertura de 2,00 e 0,85 mm. As curvas granulométricas da areia e do granulado de borracha podem ser observadas na Figura Figura 4.1.

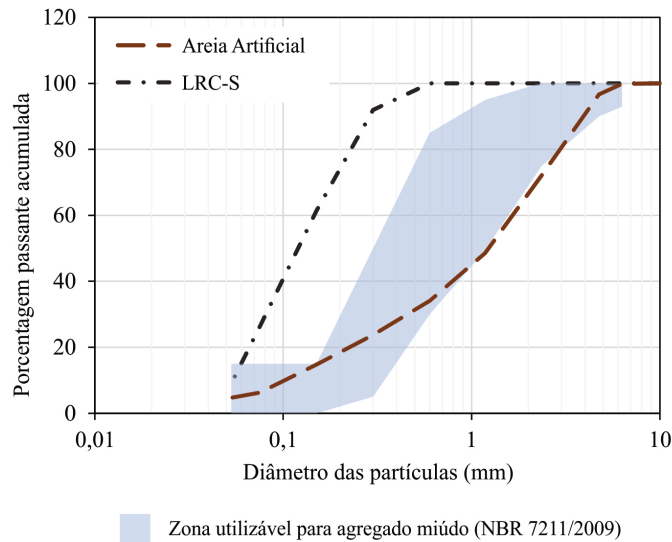
Figura 4.1 – Curvas granulométricas da borracha e da areia natural para o Estudo 1.



Através da Figura 4.1 é possível observar, também, que grande parte do granulado de borracha encontra-se fora da zona utilizável para agregado miúdo da NBR 7211 (ABNT, 2009), sendo necessário, então, uma correção na sua granulometria para os próximos Estudos.

Para o Estudo 2, a areia artificial e a LRC-S também foram caracterizadas quanto à composição granulométrica e apresentaram diferenças marcantes entre suas distribuições (Figura 4.2). Enquanto que para a areia artificial, sua maior parcela ficou retida nas peneiras com abertura entre 2,36 mm e 600 μm , a LRC-S começou a ser retida apenas na peneira de 300 μm . Salienta-se, então, que a LRC-S foi utilizada em substituição ao cimento.

Figura 4.2 – Distribuição granulométrica da LRC-S e da areia artificial para o Estudo 2.



Nos Estudos 3 e 4 foram utilizados os dois resíduos e suas curvas estão apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4, juntamente com os agregados utilizados na moldagem de cada Estudo.

Figura 4.3 – Distribuição granulométrica da LRC-S, da borracha e da areia artificial para o Estudo 3.

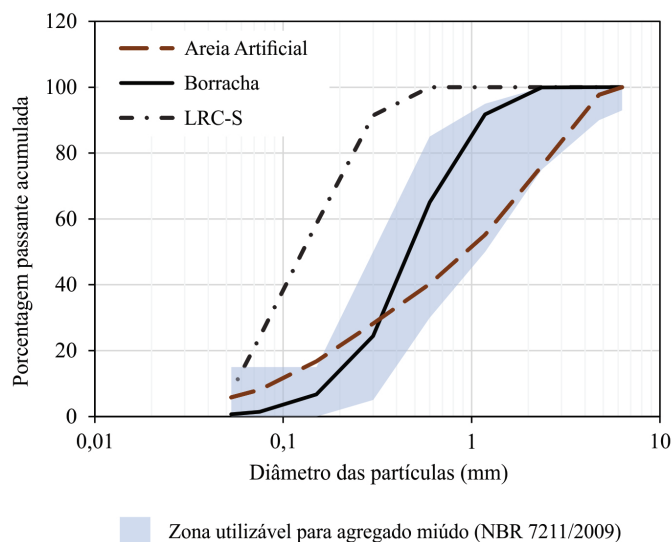
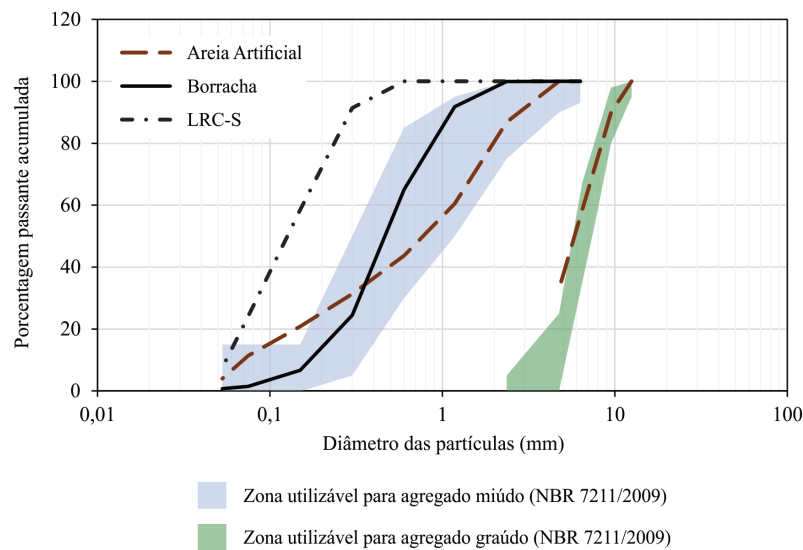


Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da LRC-S, da borracha e da areia artificial para o Estudo 4.



No caso da borracha, a maior parcela da massa total ficou retida nas peneiras com abertura de 300 μm e 600 μm . Já a maior parte da areia ficou armazenada nas duas peneiras anteriores, de 2,36 e 1,18 mm. Percebe-se que a borracha apresenta uma distribuição mais variada e com partículas menores se comparada a areia, porém ainda se encontra na zona utilizável para agregado miúdo da NBR 7211 (ABNT, 2009). Essa granulometria mais fina da borracha pode auxiliar na resistência, pois, segundo Sadek e El-Attar (2015) os tijolos com borracha mais fina apresentaram maior resistência se comparados com os confeccionados com borracha grossa.

Já a LRC-S apresentou diâmetros dos grãos bem menores, sendo que a peneira de abertura de 75 μm foi a responsável por reter a maior parcela da massa. Tem-se assim, que materiais finamente moídos podem se comportar como filer, preenchendo os vazios entre os materiais e trazendo benefícios para o concreto (NEVILLE, 2013).

Com relação a areia artificial pode-se perceber que, no Estudo 3, ela se enquadrava apenas como agregado miúdo (Figura 4.3), e já no Estudo 4 ela pode ser considerada como agregado total, ou seja, possui uma distribuição granulométrica constituída por agregados graúdos e miúdos (Figura 4.4). Em ambos os casos atendem a NBR 6136 (ABNT, 2014b) com relação aos materiais utilizados, bem como as zonas de utilização para agregados da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Já avaliando a densidade de partículas, foi observado que, dentre os materiais constituintes, a borracha possui a menor densidade (1,17 g/cm^3), seguida pela LRC-S (2,19 g/cm^3), areia artificial (2,52 g/cm^3) e pelo cimento (2,84 g/cm^3). Tem-se, então, que a densidade das partículas do cimento foi 30% superior à densidade encontrada para a lama residual, e a densidade da borracha é duas vezes menor em relação ao valor encontrado para areia ar-

tificial. Percebe-se, então, que ambos os resíduos possuem densidades menores do que os materiais a serem substituídos, o que poderá ocasionar a redução da densidade final dos tijolos.

4.1.2 Ensaio de EDX e Difratograma de Raios-X

As caracterizações químicas elementares do cimento Portland CP II-E, da areia natural, da borracha, do cimento CP V-ARI, da areia artificial e da LRC-S foram determinadas através do ensaio de EDX (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Caracterização química das parcelas elementares dos materiais utilizados.

Elemento	ESTUDO 1			ESTUDO 2		
	CP II-E (%)	Areia (%)	Borracha (%)	CP V - ARI (%)	Areia Artificial (%)	LRC-S (%)
Ca	82,24	1,04	1,41	82,32	3,88	63,5
Si	8,81	69,51	12,82	8,41	62,74	20,29
Fe	4,99	6,85	1,35	4,87	4,34	8,31
Al	0	9,84	0	0	11,67	2,85
K	0,57	10,74	1,23	0,6	15,91	2,52
S	1,95	0	16,01	2,27	0,06	0,89
Ti	0,41	1,46	0,19	0,43	0,51	0,8
Sr	0,73	0,04	0	0,77	0,05	0,37
Mn	0,09	0,35	0	0,13	0,12	0,2
Zn	0,11	0,06	66,85	0,08	0,03	0,07
Cu	0,04	0,05	0,16	0,04	0,05	0,04
Rb	0	0,05	0	0	0,26	0,04
Cr	0,03	0	0	0,05	0,02	0,04
V	0,04	0	0	0,02	0	0,03
Zr	0	0	0	0	0,05	0,03
Nb	0	0	0	0	0,01	0,01
P	0	0	0	0	0,24	0
Ir	0	0	0	0	0,04	0
Pb	0	0	0	0	0,02	0
Ni	0	0	0	0,01	0	0

Fonte: o autor.

No Estudo 1, tem-se que para a fabricação dos pneus há a presença de zinco (Zn) e enxofre (S) como ativador e agente de vulcanização em compostos de borracha, o que justifica (Tabela 4.1) a maior concentração desses elementos na investigação do EDX (Aoudia *et al.*, 2017). Percebe-se também que não foi encontrado chumbo (Pb), cromo (Cr) e cádmio (Cd) na borracha, diferentemente de Canova *et al.* (2007), Faria (2015) e Aoudia *et al.* (2017). Ao comparar a composição química do granulado de borracha, com o cimento CP II e o agre-

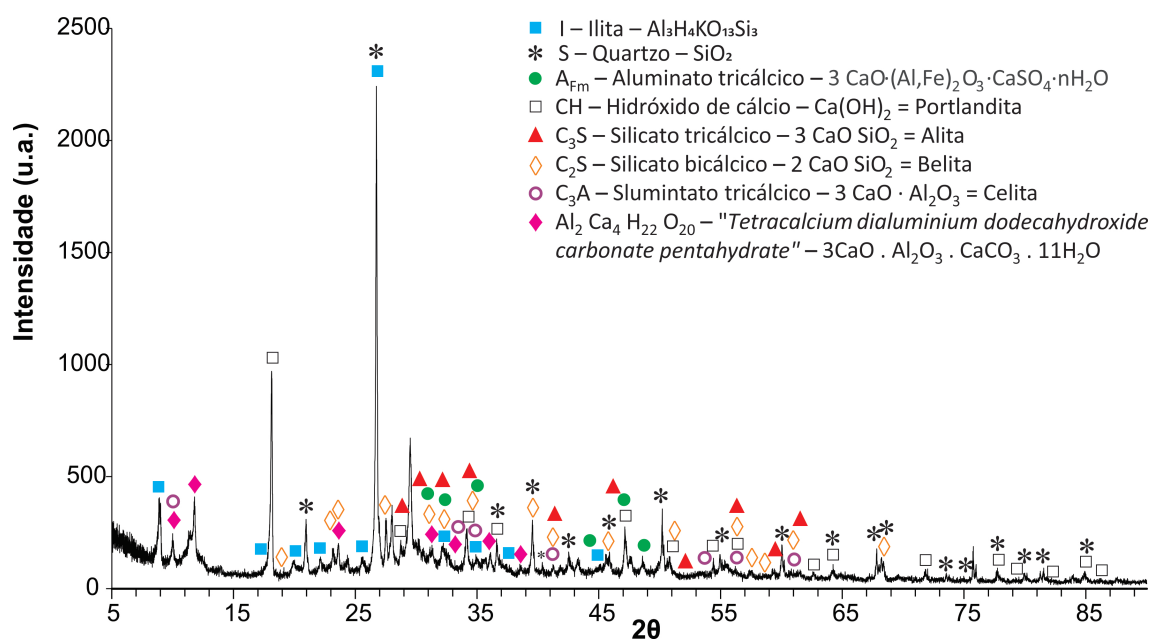
gado miúdo, foi possível perceber que não há semelhanças significativas quimicamente que possam justificar a substituição da areia pela borracha.

Para os cimentos CP II-E e CP V-ARI a maior concentração foi de cálcio (*Ca*), presente nos compostos de óxidos e carbonatos de cálcio, responsáveis pela formação dos cristais de C_3S , por exemplo, durante o processo de hidratação do cimento. Salienta-se ainda que não foi identificado a presença de alumínio (*Al*), sendo que dentre os principais componentes do cimento está o aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$ ou C_3A), logo pode ser devido a falhas do equipamento utilizado para os ensaios.

Em relação ao Estudo 2, foi possível observar que a LRC-S possui altas concentrações de cálcio (*Ca*) e silício (*Si*). Como este resíduo é um subproduto de um concreto original, pode-se atribuir estas concentrações encontradas ao óxido de cálcio (*CaO*) e ao dióxido de silício (SiO_2), que são fortemente presentes na composição do cimento e da areia utilizadas na produção do concreto (XUAN *et al.*, 2016a).

Para conhecer melhor as características químicas da LRC-S, foi realizado o Difrato-grama de Raios-X (DRX) (Figura 4.5). Através do DRX foi confirmada a presença do Quartzo (SiO_2), da Portlandita ($Ca(OH)_2$), da Ilita ($Al_3H_4KO_{13}Si_3$), do Aluminato tricálcico ($3CaO \cdot (Al, Fe)_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot nH_2O$), da Celita ($3CaO \cdot Al_2O_3$), que também é um Aluminato tricálcico, conhecida por C_3A , dos Silicatos bicálcicos ($2CaOSiO_2$ ou C_2S) e tricálcicos ($3CaOSiO_2$ ou C_3S) e a presença do "Tetracalcium dialuminium dodecahydroxide carbonate pentahydrate" ($Al_2Ca_4H_{22}O_{20}$).

Figura 4.5 – Difração de Raios-X da LRC-S.



Fonte: o autor.

Com relação aos Estudos 3 e 4, tem-se que foi utilizado a borracha e a LRC-S em subs-

tuição do agregado e cimento, respectivamente, sendo, então, a junção dos Estudo 1 e 2, e as características químicas de cada material já foram discutidas anteriormente.

4.2 Propriedade dos Tijolos

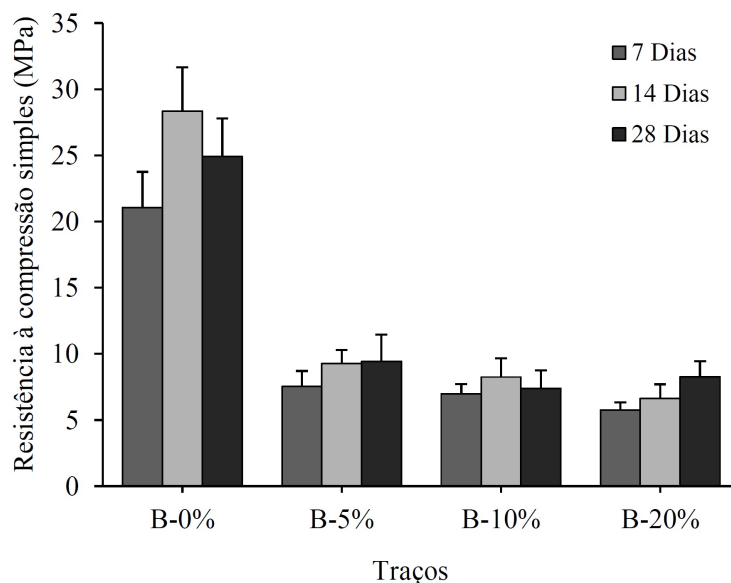
4.2.1 Ensaio de resistência à compressão

4.2.1.1 Tijolos com substituição do agregado por granulado de borracha (Estudo 1)

No decorrer do teste de compressão simples, no Estudo 1, foi notado que os tijolos com traço B-0% (sem adição de borracha) ao se romperem, se esfacelavam especialmente nas bordas, enquanto os tijolos contendo granulado de borracha rompiam-se, mas não se esfacelavam. [Sadek e El-Attar \(2015\)](#) perceberam o mesmo em seu estudo, e atribuiu essa característica à presença da borracha, a qual possui flexibilidade e capacidade de esticar e girar em torno dos seus eixos.

Avaliando apenas a média dos resultados de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias (Figura 4.6), foi possível observar que houve um decréscimo significativo entre o tijolo sem adição de resíduo (B-0%) e os demais tijolos com adição de borracha. Vale ressaltar também o comportamento dos tijolos de referência e aqueles com 10% de adição de borracha, em que apresentaram resistência aos 28 dias inferior aos de 14 dias. Essa perda de resistência ao longo da idade de alguns traços também foi verificada no estudo de [Kou, Zhan e Poon \(2012a\)](#), porém não foi realizado nenhuma verificação ou discussão acerca desse comportamento. Isso aponta uma importante lacuna para novos estudos que abordem a microestrutura dos tijolos.

Figura 4.6 – Resistência à compressão dos tijolos de concreto do Estudo 1.



Fonte: o autor.

Para simplificar a análise dos resultados do teste de compressão simples, utilizou-se o método de comparação de médias de Scott-Knott (SCOTT; KNOTT, 1974) já que o experimento possui grande quantidade de itens analisados e é recomendada a utilização deste método para casos como este, sem que haja sobreposição dos resultados (CANTERI *et al.*, 2001). A Tabela 4.2 apresenta as médias dos resultados obtidos e comparados para os tijolos com 7, 14 e 28 dias de acordo com cada traço.

Tabela 4.2 – Resistência à compressão para os tijolos de concreto com substituição do agregado por granulado de borracha nas idades 7, 14 e 28 dias.

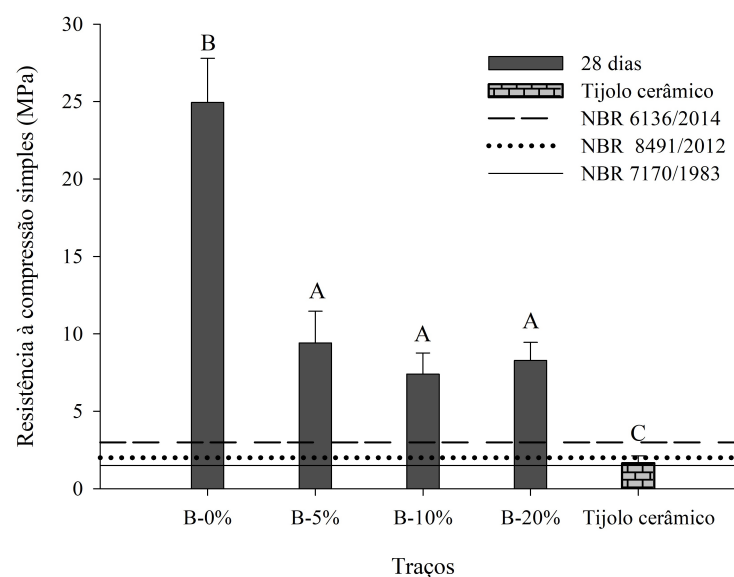
Idade	Resistência à compressão (MPa)			
	B - 0%	B - 5%	B - 10%	B-20%
7 dias	21,07 (\pm 2,69) Ba	7,53 (\pm 1,18) Ab	6,99 (\pm 0,74) Ab	5,77 (\pm 0,57) Ab
14 dias	28,34 (\pm 3,32) Bb	9,26 (\pm 1,04) Ab	8,25 (\pm 1,42) Ab	6,65 (\pm 1,06) Ab
28 dias	24,93 (\pm 2,85) Bab	9,42 (\pm 2,04) Ab	7,40 (\pm 1,36) Ab	8,27 (\pm 1,18) Ac

Método Scott-Knott, $p = 0,05$. As letras maiúsculas mostram a comparação entre as colunas (traços) e as letras minúsculas a comparação entre linhas (idades).

Fonte: o autor.

Através da análise estatística apresentada pode-se perceber que a resistência não teve grandes ganhos de acordo com as idades, sendo que apenas o traço B-20% apresentou ganho considerável aos 28 dias. Dentre os tijolos com cura de 7 e 14 dias, o traço que apresentou maior perda de resistência foi o B-20% com uma queda de 72,6% e 76,5%, respectivamente. Já nos tijolos com cura de 28 dias, conforme Figura 4.7, o traço que teve pior desempenho quanto à compressão foi o B-10%, com uma perda de resistência de 73,5%.

Figura 4.7 – Resistência à compressão simples dos tijolos de concreto aos 28 dias e dos tijolos cerâmicos com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de resistência entre os traços).



Fonte: o autor.

Em relação as porcentagens de substituição, nota-se que nas amostras com 5, 10 e 20% de borracha os resultados foram estatisticamente semelhantes, segundo análise de comparação de médias ($p < 0,05$), o que indica uma possibilidade de substituição de uma parcela ainda maior de borracha no traço dos tijolos.

Percebe-se também pela Figura 4.7, que os resultados das resistências à compressão dos tijolos estudados atingiram valores acima do exigido pela NBR 6136 (ABNT, 2014b) de 3 MPa para tijolos de concreto da classe C, pela NBR 8491 (ABNT, 2012a) de 2 MPa para tijolos de solo-cimento e pela NBR 7170 (ABNT, 1983) de 1,5 MPa para tijolos maciços cerâmicos. A título de comparação foram rompidas seis amostras de tijolos cerâmico maciços, produzidos na região em estudo, que tiveram uma resistência média de 1,65 MPa, significativamente inferior aos resultados obtidos para os tijolos moldados neste estudo.

A redução da resistência em tijolos de concreto com o acréscimo de borracha também foi observada em outros trabalhos. Ling (2012) em seu estudo com tijolos de concreto para pavimentação com adição de resíduo de pneus (granulado de borracha) em substituição à areia obteve para 20% de adição de borracha uma queda na resistência à compressão de aproximadamente 50%. Sadek e El-Attar (2015) e Silveira *et al.* (2016) também constataram uma sistemática redução na resistência à compressão do concreto e dos tijolos de solo-cimento de acordo com o aumento do teor de granulado de borracha.

Segundo Nehdi e Khan (2001) e Skripiūnas, Grinys e Černius (2007), a queda na resistência à compressão de acordo com acréscimo de granulado de borracha ocorre devido:

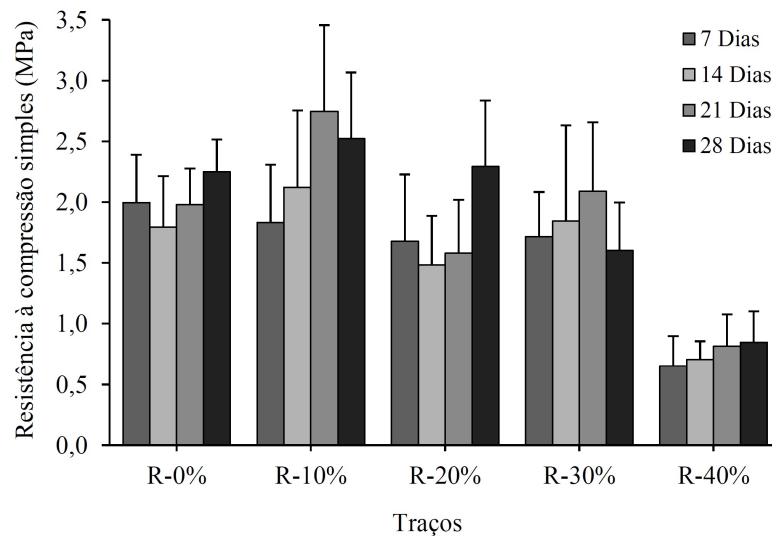
- À menor quantidade de carga sólida no material após substituir o agregado convencional rígido e denso, pelo resíduo de borracha flexível e menos denso;
- Ao ar retido na superfície da borracha, consequência da repulsão da água pelo resíduo durante o processo de mistura, provocando assim uma queda na resistência à compressão;
- À incompatibilidade elástica entre as partículas de borracha e a matriz de cimento, produzindo vazios na interface matriz de cimento/borracha.

Em suma, tem-se que, à medida que se aumenta a quantidade de granulado de borracha, ocorre uma queda significativa na resistência à compressão em relação ao tijolo de referência, porém ainda apresentam melhor desempenho que o tijolo cerâmico maciço. Cabe destacar que estatisticamente os resultados para os tijolos com adição de borracha foram semelhantes, o que significa que se pode adotar até 20% de borracha em substituição ao agregado sem que se tenha um aumento da perda de resistência.

4.2.1.2 Tijolos com substituição do cimento por LRC-S (Estudo 2)

Avaliando apenas a média dos resultados de resistência à compressão aos 7, 14, 21 e 28 dias (Figura 4.8), foi possível observar que houve uma melhora de desempenho do traço R-10% em relação ao de referência, seguido por um decréscimo gradual, na faixa de 20 a 30%, e acentuado, entre 30 e 40%.

Figura 4.8 – Resistência à compressão dos tijolos de concreto do Estudo 2.



Fonte: o autor.

Os resultados obtidos no teste de compressão foram também comparados através da análise múltipla de médias utilizando o método de Scott-Knott (SCOTT; KNOTT, 1974) (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Resistência à compressão para os tijolos de concreto com substituição do cimento por LRC-S nas idades 7, 14, 21 e 28 dias.

Idade	Resistência à compressão (MPa)				
	R-0%	R-10%	R-20%	R-30%	R-40%
7 dias	1,99 (± 0,39) Aa	1,83 (± 0,48) Aa	1,68 (± 0,55) Ab	1,72 (± 0,37) Aa	0,65 (± 0,25) Ba
14 dias	1,80 (± 0,42) Aa	2,12 (± 0,63) Aa	1,48 (± 0,40) Ab	1,84 (± 0,79) Aa	0,70 (± 0,15) Ba
21 dias	1,98 (± 0,30) Aa	2,75 (± 0,71) Aa	1,58 (± 0,44) Cb	2,09 (± 0,56) Ba	0,81 (± 0,26) Da
28 dias	2,25 (± 0,27) Aa	2,52 (± 0,54) Aa	2,29 (± 0,54) Aa	1,60 (± 0,40) Ba	0,85 (± 0,26) Ca

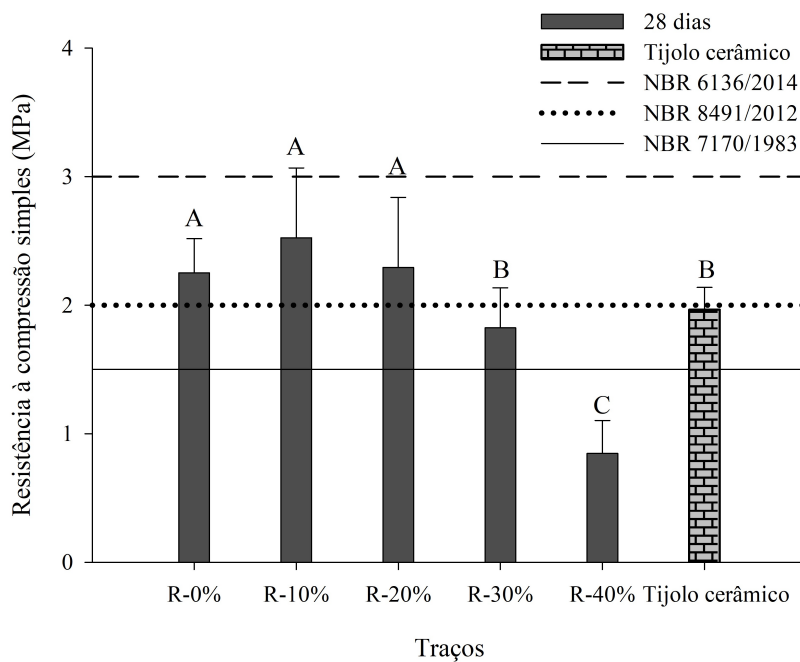
Método Scott-Knott, $p = 0,05$. As letras maiúsculas mostram a comparação entre as colunas (traços) e as letras minúsculas a comparação entre linhas (idades).

Fonte: o autor.

Através da análise estatística apresentada, pode-se perceber que, com exceção do traço R-20%, não houve ganho de resistência entre os períodos observados. Este resultado já era esperado, visto que o cimento utilizado neste estudo foi o cimento CP V-ARI, cuja característica marcante é adquirir grande parte de sua resistência já nas primeiras idades.

Em relação ao desempenho dos traços propostos aos 28 dias, a composição R-10% e R-20% obtiveram comportamento equivalente ao traço referência, conforme Figura 4.9. Por outro lado, o R-40% sempre esteve em faixas inferiores de resistência, demonstrando claro comprometimento de suas funções. Em comparação aos tijolos maciços cerâmicos, percebe-se que as peças com até 20% de substituição obtiveram resultados superiores aos do tijolo cerâmico.

Figura 4.9 – Resistência à compressão simples dos tijolos de concreto aos 28 dias e dos tijolos cerâmicos com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de resistência entre os traços).



Fonte: o autor.

Essa comparação também se deu em função do estabelecido pelas NBR 6136 (ABNT, 2014b), NBR 8491 (ABNT, 2012a) e NBR 7170 (ABNT, 1983). Nesse sentido, foi possível perceber que aos 28 dias, nenhum traço apresentou resistência média requerida pela NBR 6136 (ABNT, 2014b), porém o R-10% levando em consideração o desvio padrão atende a exigência. Já com relação à NBR 8491 (ABNT, 2012a), os traços R-10% e R-20% se mostraram superiores ao requerido, demonstrando seu potencial de utilização como um tijolo ecológico. E por fim, apenas o traço R-40% não apresentou a resistência média requerida pela NBR 7170 (ABNT, 1983).

Kou, Zhan e Poon (2012b) estudaram tijolos de alvenaria com a adição de lama resi-

dual de concreto seca, em substituição à areia natural, variando de 0 a 100%, obtendo ganhos de resistência em todos os traços propostos. Os referidos autores atribuíram os resultados ao efeito filer e à presença de cimento não hidratado contido no resíduo estudado. Já [Audo, Mahieux e Turcry \(2016\)](#) realizaram uma análise quanto a viabilidade da utilização da lama residual como filer de calcário em argamassas. Os resultados alcançados foram semelhantes aos do presente trabalho, apresentando um ganho de resistência com uma pequena adição de resíduo, seguido pelo comprometimento das propriedades mecânicas com a elevação do teor do mesmo.

Portanto, para o trabalho em questão, o ganho de resistência à compressão dos tijolos R-10% e R-20% pode ter sido influenciado pelo efeito filer, atribuído a pequena quantidade de resíduo, ou pela existência de silicatos de cálcio anidro (C_2S e C_3S), conforme Difrato-grama de Raios-X (DRX) da Figura 4.5. A presença de C_2S e C_3S revela um potencial residual hidráulico na LRC-S, responsáveis pelo ganho de resistência. Porém, com a maior taxa de substituição do cimento, foi possível verificar que a LRC-S possui capacidade aglomerante insuficiente, comprometendo o desempenho dos tijolos de concreto.

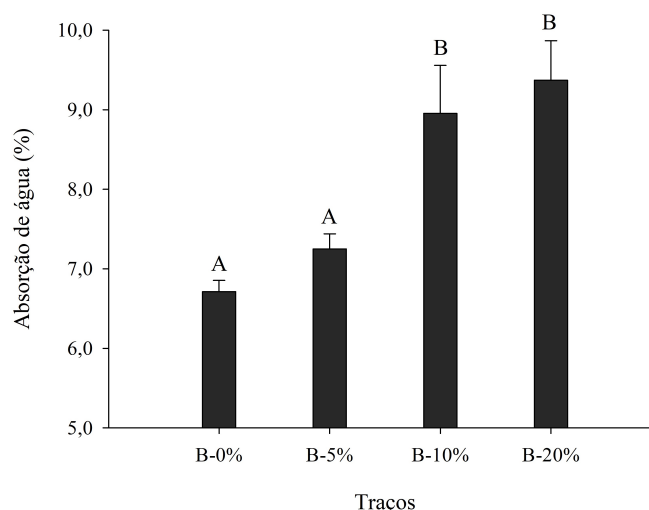
Pode-se, então, concluir que apesar de ter uma média inferior ao R-10%, estatisticamente o traço R-20% possui resistência equivalente ao mesmo e, por representar um maior volume de substituição, pode ser considerado como o traço ótimo.

4.2.2 Absorção de água e vazios

4.2.2.1 Tijolos com substituição do agregado por granulado de borracha (Estudo 1)

O comportamento dos tijolos com relação a absorção de água está representado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Absorção de água dos tijolos de concreto com substituição do agregado por granulado de borracha aos 28 dias com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de absorção).

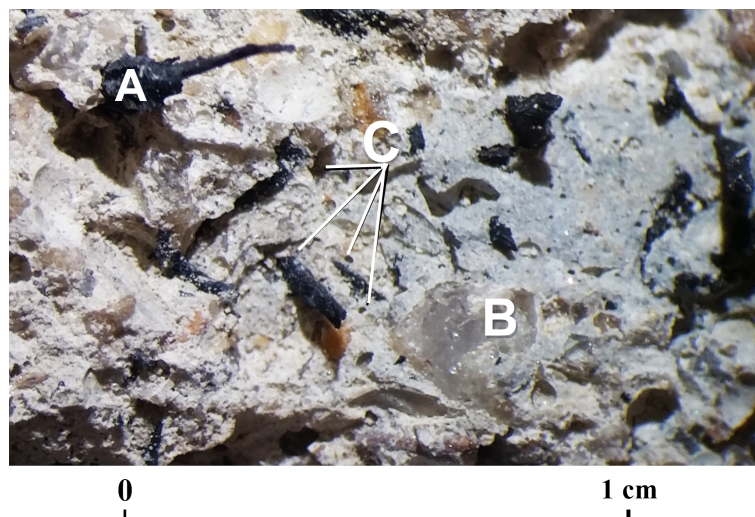


Fonte: o autor.

A partir dos dados referentes à absorção de água média (Figura 4.10), observa-se que os mesmos não ultrapassaram o limite máximo proposto pela norma NBR 6136 (ABNT, 2014b) e pela NBR 8491 (ABNT, 2012a) que se configura em 10% e 20% respectivamente. Verifica-se que o traço de referência B-0%, mesmo aquém do proposto pelas normas, foi aquele que obteve o valor médio (de 6,71%) mais baixo. E o traço B-20% apresentou a maior taxa média de absorção de água, valor este de 9,37%.

Essa maior absorção de água por parte dos tijolos com maior porção de borracha pode ser atribuída à fraca ligação entre o resíduo granulado e a matriz de cimento, permitindo a entrada do líquido através dos vazios na interface entre a borracha e a pasta de cimento (SH-TAYEH, 2007), como pode ser observado na Figura 4.11. O contrário ocorre com o quartzo presente na areia, podendo ser notada a maior aderência entre o mineral e a pasta cimentícia.

Figura 4.11 – Aderência entre borracha e matriz de cimento. (A) Borracha; (B) Quartzo; (C) Vazios.



Fonte: o autor.

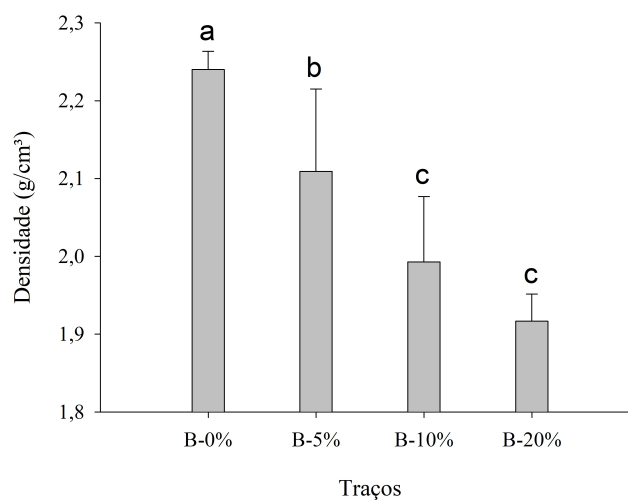
Sadek e El-Attar (2015) investigaram a absorção de água em tijolos de concreto contendo borracha grossa e borracha fina, com o aumento ou não do teor de cimento. Constatou-se que para os tijolos contendo borracha grossa houve um aumento sistemático na absorção de água com o aumento do teor de granulado grosso, independente do teor de cimento. Em contrapartida, foi certificado que tijolos com até 20% de borracha fina tiveram baixa absorção de água, pois a areia neste caso pode preencher os vazios ocasionados pelo granulado fino. Já os tijolos com porção de borracha fina maior que 20% demonstraram um aumento considerável de absorção de água na medida em que se aumentava a quantidade de resíduo fino.

Em comparação ao tijolo maciço os resultados de absorção dos tijolos de concreto apresentaram-se satisfatórios, uma vez que os tijolos absorveram em média 19,4% de água.

Assim, a utilização de tijolos de concreto em substituição ao tijolo maciço comum torna-se uma alternativa viável devido à sua menor absorção de água e, conseqüentemente, um menor peso aplicado sobre a estrutura.

Os vazios, além de ocasionar a absorção de água, também determinam a densidade dos tijolos. Quanto mais vazios existirem no corpo de prova, menor será sua densidade. Neste estudo, o granulado de borracha, por ser leve, também ajudou a diminuir a densidade do tijolo que o continha, além de aumentar os vazios, conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 – Densidade dos tijolos de concreto aos 28 dias com análise de Scott-Knott (as letras minúsculas indicam faixas da densidade).



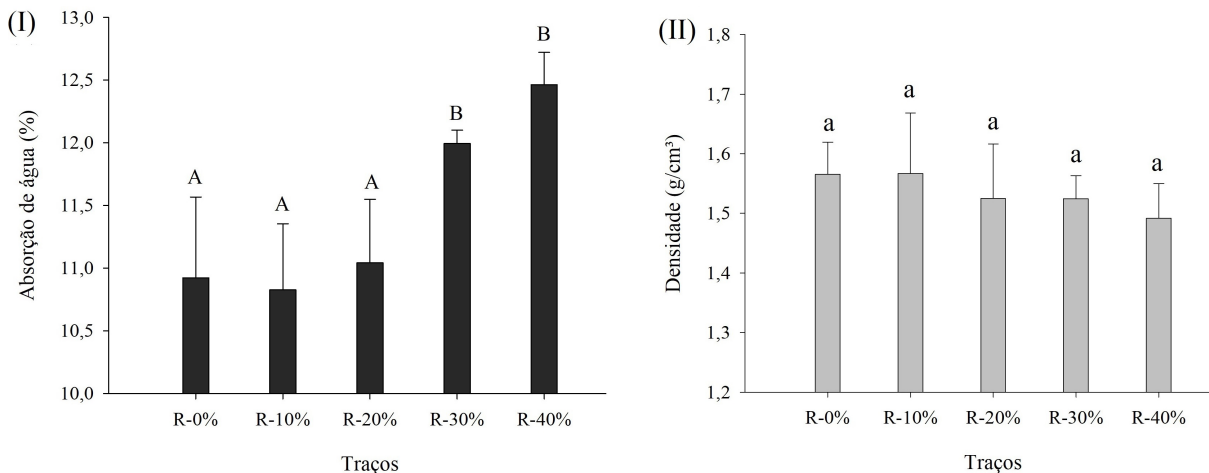
Fonte: o autor.

A partir dos valores da Figura 4.12 nota-se que a densidade diminui de acordo com o aumento do teor de granulado de borracha no tijolo, porém essa redução não se mostra tão significativa.

4.2.2.2 Tijolos com substituição do cimento por LRC-S (Estudo 2)

Através da Figura 4.13 foi possível analisar o comportamento dos tijolos quanto à absorção de água (Figura 4.13-I) e à densidade (Figura 4.13-II). Com a adição de resíduo as peças absorveram mais água a partir da faixa de R-30%, conforme Figura 4.13-I. Acredita-se que esse comportamento se dá por uma baixa formação de cristais na pasta endurecida pela baixa presença de cimento não hidratado (KOU; ZHAN; POON, 2012b). Observando a média das densidades (Figura 4.13-II), nota-se uma ligeira redução com a adição dos resíduos, porém a variação dos resultados com a análise de Scott-Knott (SCOTT; KNOTT, 1974), não é estatisticamente significativa. Tal comportamento pode ser explicado em função do menor peso específico da LRC-S, quando comparada a areia artificial (KOU; ZHAN; POON, 2012b).

Figura 4.13 – Absorção de água (I) e densidade (II) dos tijolos de concreto aos 28 dias com análise de Scott-Knott (as letras maiúsculas indicam faixas de absorção e as minúsculas de densidade).



Fonte: o autor.

A NBR 6136 (ABNT, 2014b) e a NBR 8491 (ABNT, 2012a) fixam valores máximos aceitáveis para a absorção de água média dos corpos de prova em 10 e 20% respectivamente. Comparando os valores obtidos ao limite das normas, conclui-se que todos os tijolos satisfazem o prescrito na NBR 8491 (ABNT, 2012a), porém nenhum valor médio atende a NBR 6136 (ABNT, 2014b). Já ao ensaiar os tijolos maciços cerâmicos notou-se que os mesmos, apesar de estarem disponíveis à comercialização, apresentaram uma taxa média acima do estipulado, obtendo uma média de 23,02%.

4.2.3 Otimização das porcentagens de substituição para produção de tijolos de concreto com resíduos (Estudo 3)

Partindo dos resultados dos Estudos 1 e 2 percebeu-se que ao utilizar a relação cimento/agregado de 1/9,46, em massa, no Estudo 1, obteve-se uma resistência bem superior ao requerido pelas normas, e que no Estudo 2, adotando a relação de 1/16, em massa, apresentou resistência um pouco inferior. Assim, para o Estudo 3 foi adotado a relação 1/12 de cimento/agregado, em massa, conforme utilizado por Kou, Zhan e Poon (2012b).

A partir dos ensaios de resistência à compressão dos Estudo 1 e 2, foram definidos como nível alto do delineamento 20% de substituição tanto para a borracha quanto para a LRC-S. Vale ressaltar que a borracha será utilizada em substituição parcial do agregado miúdo e a LRC-S em substituição parcial ao cimento. Para tanto, foram adotadas como variáveis dependentes a resistência à compressão média (Y_1) e a absorção de água (Y_2), ambos aos 28 dias. Salienta-se que os dados de resistência à compressão para 3, 7, 14 e 56 dias se encontram no Apêndice A, sendo realizados apenas para acompanhar o comportamento ao longo das idades. Os valores das variáveis independentes e seus respectivos níveis estão

apresentados na Tabela 4.4, gerando a matriz de ensaios conforme Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Variáveis independentes e respectivos níveis.

Variáveis independentes		Níveis considerados de substituição (%)				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
X_1	Borracha	0,0	3,4	11,7	20,0	23,5
X_2	LCR-S	0,0	3,4	11,7	20,0	23,5

Fonte: o autor.

Tabela 4.5 – Matriz de ensaios.

Ensaio	X_1	X_2	Borracha (%)	LRC-S (%)	Traço
1	-1	-1	3,4	3,4	T1
2	1	-1	20	3,4	T2
3	-1	1	3,4	20	T3
4	1	1	20	20	T4
5	$-\alpha$	0	0	11,7	T5
6	$+\alpha$	0	23,5	11,7	T6
7	0	$-\alpha$	11,7	0	T7
8	0	$+\alpha$	11,7	23,5	T8
9	0	0	11,7	11,7	T9
10	0	0	11,7	11,7	T10
11	0	0	11,7	11,7	T11
12	0	0	11,7	11,7	T12
13	0	0	11,7	11,7	T13

Fonte: o autor.

Estão apresentados na Tabela 4.6 os valores (respostas) dos parâmetros de resistência à compressão simples, bem como da absorção de água dos tijolos referentes aos traços da Tabela 4.5, juntamente com o traço de referência TR. Para as respostas das variáveis dependentes são expressos os coeficientes de regressão polinomial de segunda ordem, estatisticamente significativas em um nível de 95% de confiança, conforme Tabela 4.7. São apresentados também os coeficientes de determinação R^2 e R_{aj}^2 , que fornecem “uma medida da proporção de variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas” (RODRIGUES; IEMMA, 2014). Vale destacar os valores encontrados para os coeficientes de determinação R^2 e R_{aj}^2 , que, para todos os parâmetros, ficaram acima de 93% e 88%, respectivamente, indicando um excelente ajuste do modelo.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água do Estudo 3.

Traço	Resistência à compressão (Y_1) (MPa)	Absorção (Y_2) (%)
TR	5,53	14,41
T1	4,15	14,60
T2	0,70	21,28
T3	3,02	14,28
T4	1,12	22,91
T5	6,27	12,03
T6	0,44	23,86
T7	1,75	18,18
T8	1,62	19,29
T9	1,97	18,53
T10	1,26	20,82
T11	1,03	19,49
T12	1,44	21,54
T13	0,78	22,12

Fonte: o autor.

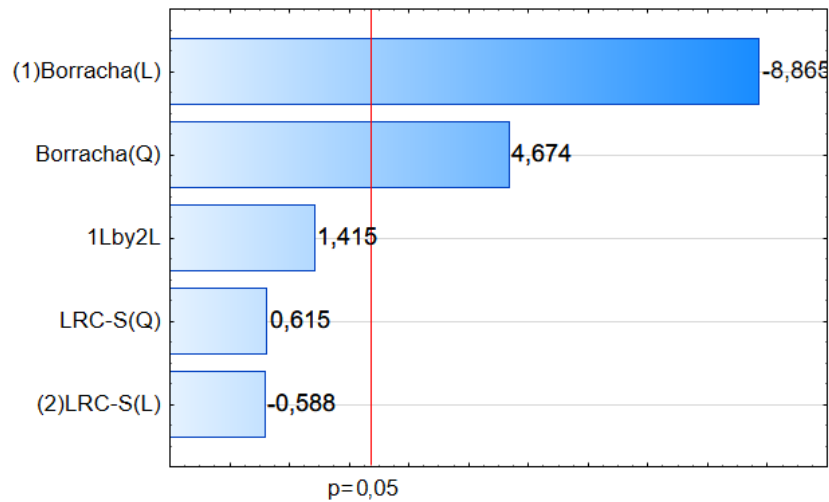
Tabela 4.7 – Regressões polinomiais de segunda ordem das variáveis dependentes utilizadas na geração das Superfícies de Resposta, gráficos de Pareto e de contorno, com seus respectivos coeficientes de determinação.

Modelos	R^2 (%)	R_{aj}^2 (%)
$Y_1 = 6,787767 - 0,597658X_1 + 0,013972X_1^2$	93,58	88,99
$Y_2 = 10,93665 + 0,84167X_1 - 0,01885X_1^2$	94,18	90,03

Fonte: o autor.

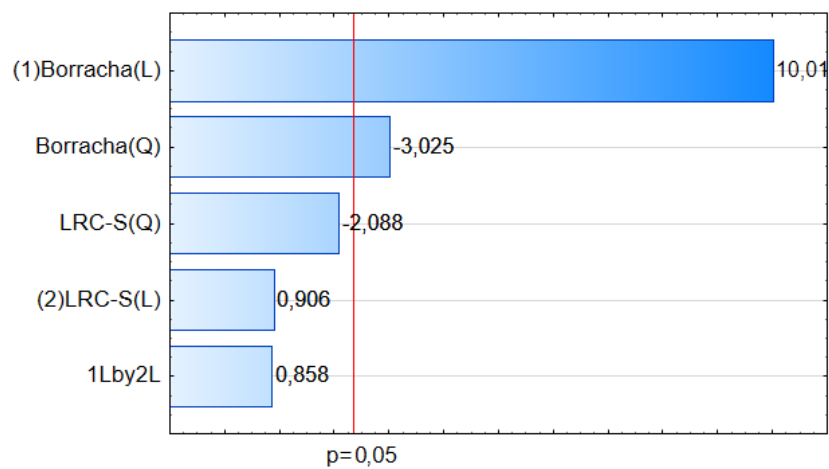
Estão apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15 os gráficos de Pareto do delineamento experimental, com a indicação das variáveis significativas ($p < 0,05$), em que se verificou que apenas os efeitos lineares (L) e quadrático (Q) da borracha foram considerados significativos para alteração da resistência à compressão, bem como da absorção de água. Os valores ao lado das barras são referentes aos valores da estatística do teste t, sendo o tamanho da barra proporcional ao efeito causado pela variável em questão sobre a variável resposta. Assim, percebe-se que os efeitos lineares da borracha provocam a redução da resistência à compressão, observado pelo sinal negativo do teste t (Figura 4.14) e o aumento absorção, pelo sinal positivo (Figura 4.15).

Figura 4.14 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.



Fonte: o autor.

Figura 4.15 – Gráfico de Pareto para análise da absorção de água por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.



Fonte: o autor.

Na Tabela 4.8 estão apresentadas a análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão Y_1 e absorção de água Y_2 , sendo os modelos de regressão, em todas as análises, significativas para $p < 0,05$ e podem ser considerados preditivos. Com relação a falta de ajuste tem-se que, tanto para Y_1 quanto para Y_2 , foi não significativa, revelando que os modelos referentes podem ser considerados válidos para fins preditivos.

Tabela 4.8 – Análise de variância (ANOVA).

Resistência à compressão (Y_1) - 28 Dias					
Fonte de Variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	p
Regressão	5	30,2084	6,0417	20,4168	0,0005*
Resíduo	7	2,0714	0,2959		
Falta de ajuste	3	1,2522	0,4174	2,0381	0,2511 ^{n.s.}
Erro puro	4	0,8192	0,2048		
Total	12	32,2798			

Absorção de água (Y_2) - 28 Dias					
Fonte de Variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	p
Regressão	5	145,6791	29,1358	22,6661	0,0003*
Resíduo	7	8,9981	1,2854		
Falta de ajuste	3	0,2905	0,0968	0,0445	0,9858 ^{n.s.}
Erro puro	4	8,7075	2,1769		
Total	12	154,6771			

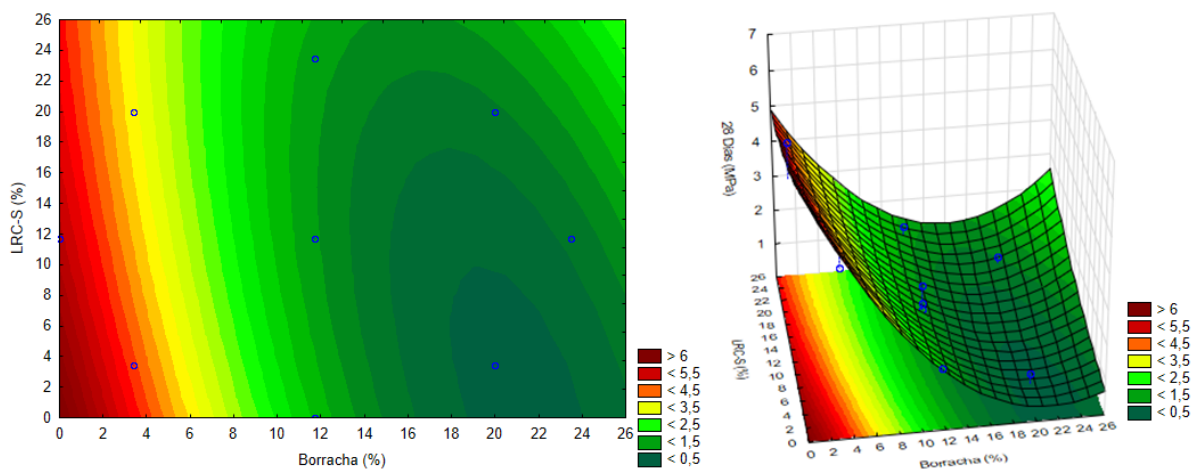
* Valores significativos a 5% de probabilidade

^{n.s.} Não Significativo

Fonte: o autor.

É apresentado na Figura 4.16 o gráfico de contorno e a superfície de resposta para a resistência à compressão quando considerada a interação das variáveis independentes que tiveram efeitos significativos. Verifica-se que conforme se aumenta as porcentagens dos resíduos se reduz a resistência à compressão.

Figura 4.16 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 28 dias em função das variáveis independentes.



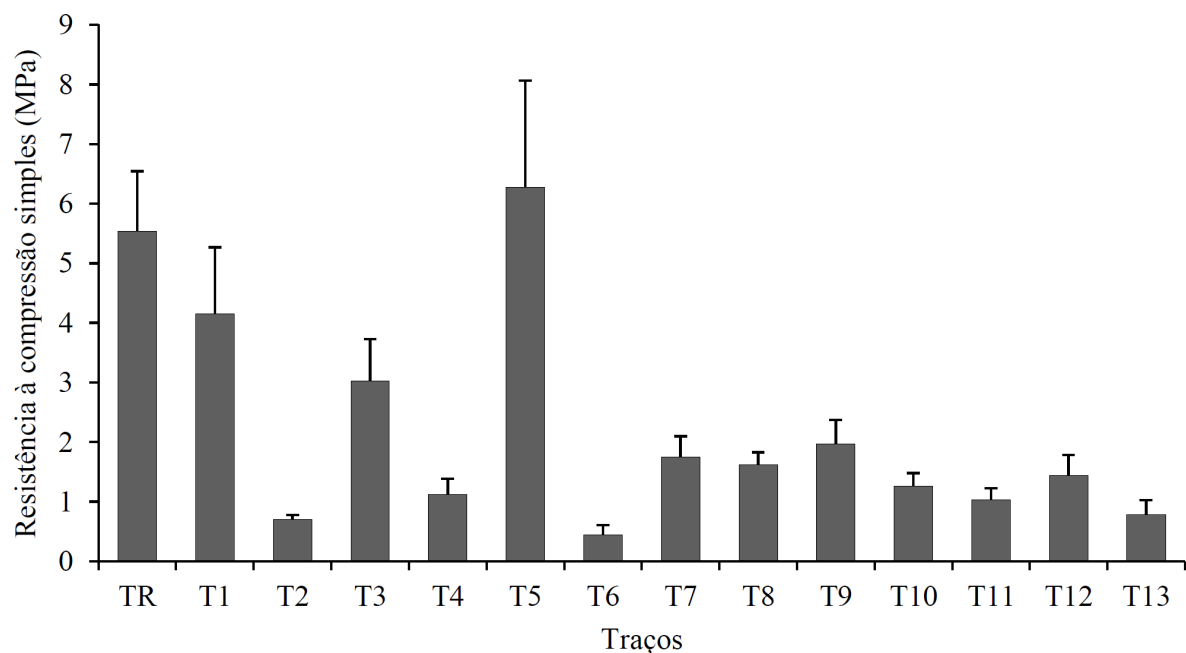
Fonte: o autor.

Percebe-se, também pela Figura 4.16, que a LRC-S tem pouca influência na perda da resistência se comparada com a borracha. Observando as faixas de resistências, nota-se que

as zonas vermelhas são as que apresentam as maiores resistências, no entanto, as zonas entre as cores amarela e vermelha indicam resistências superiores a 3 MPa, atendendo as normas NBR 7170 (ABNT, 1983), NBR 8491 (ABNT, 2012a) e NBR 6136 (ABNT, 2014b). Tem-se, então, que o limite máximo de substituição do agregado por borracha é de cerca de 8% com aproximadamente 15% de LRC-S, em substituição ao cimento.

Analisando apenas as médias da resistência à compressão dos tijolos aos 28 dias, conforme Figura 4.17 foi possível notar a diminuição de resistência dos tijolos com substituição do agregado por borracha. O traço T7, por exemplo, que possuía apenas substituição da areia por borracha, sofreu uma queda na sua resistência de 68% em relação ao traço de referência. Pode-se destacar também o traço T6, que possuía a maior porcentagem de borracha, 23,5%, e que teve uma redução de 92% se comparado ao tijolo sem adição de resíduo.

Figura 4.17 – Resistência à compressão dos tijolos aos 28 dias do Estudo 3.



Fonte: o autor.

Esse fenômeno já foi observado em outros trabalhos. [Silveira et al. \(2016\)](#) verificou uma redução de até 44% na resistência de corpos de prova com substituição de 10% da areia por borracha, sendo que foi constatado que seria necessário um acréscimo expressivo de cimento (cerca de 30%) para atingir os mesmos resultados que o concreto sem essa mudança.

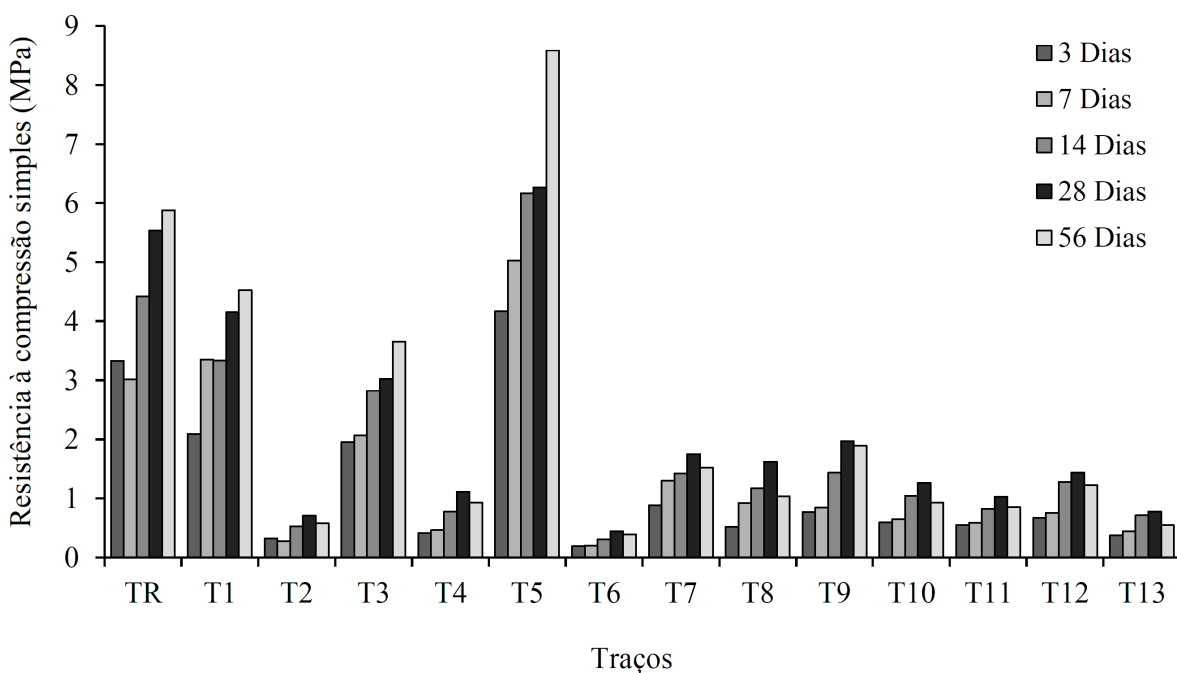
Entretanto, a presença apenas da LRC-S provoca o efeito inverso. No traço T5, com substituição apenas do cimento, observou-se um acréscimo de 13% da resistência à compressão. [Kou, Zhan e Poon \(2012b\)](#) atribuem esse ganho de resistência à presença de cimento não hidratado na LRC-S e no efeito fíler que esse material pode causar na mistura.

Contudo, [Audo, Mahieux e Turcry \(2016\)](#) verificaram que o aumento de resistência

pode ser limitado pelo teor da substituição, sendo que a melhora nos resultados ocorre com uma pequena adição do resíduo. A partir de uma determinada quantidade, as propriedades mecânicas do concreto passam a ser comprometidas. Dessa forma, a mistura de borracha e LRC-S pode balancear os efeitos desses materiais a fim de se obter a resistência mínima desejada, desde que essa combinação seja feita em proporções adequadas.

Avaliando os resultados médios de resistência à compressão simples ao longo das idades, conforme Figura 4.18, pode-se perceber que os traços mantiveram um comportamento semelhante, tendo um acréscimo gradual ao longo dos dias. É notório que aos 3 dias os tijolos já apresentavam grande ganho de resistência, podendo ser explicado pelo uso do cimento CP V-ARI, cuja característica marcante é adquirir grande parte de sua resistência já nas primeiras idades. Um ponto a ser observado é a perda de resistência aos 56 dias dos traços com adição de borracha, sendo necessário, então, para trabalhos futuros, outras análises para verificar o comportamento dos tijolos com borracha em idades avançadas.

Figura 4.18 – Resistência à compressão dos tijolos aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias, do Estudo 3.

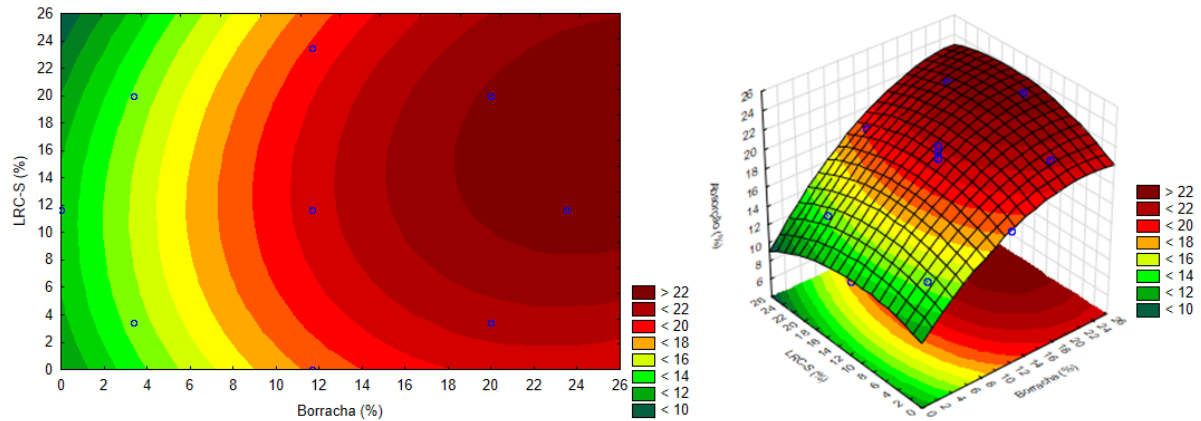


Fonte: o autor.

A superfície de contorno para a absorção de água quando considerada a interação das variáveis independentes que tiveram efeito significativo é apresentada na Figura 4.19. Verifica-se que conforme se aumenta as porcentagens dos resíduos se aumenta a absorção de água. Percebe-se, também que a LRC-S tem pouca influência no aumento da absorção de água se comparada com a borracha. Observando as faixas de absorção, nota-se que as zonas verdes são as que apresentam menores valores, sendo que apenas a zona verde-escura, com

absorção menor que 10%, atende a NBR 6136 (ABNT, 2014b). No entanto as zonas de verde até vermelho claro, com absorção menor que 20%, atendem a NBR 8491 (ABNT, 2012a).

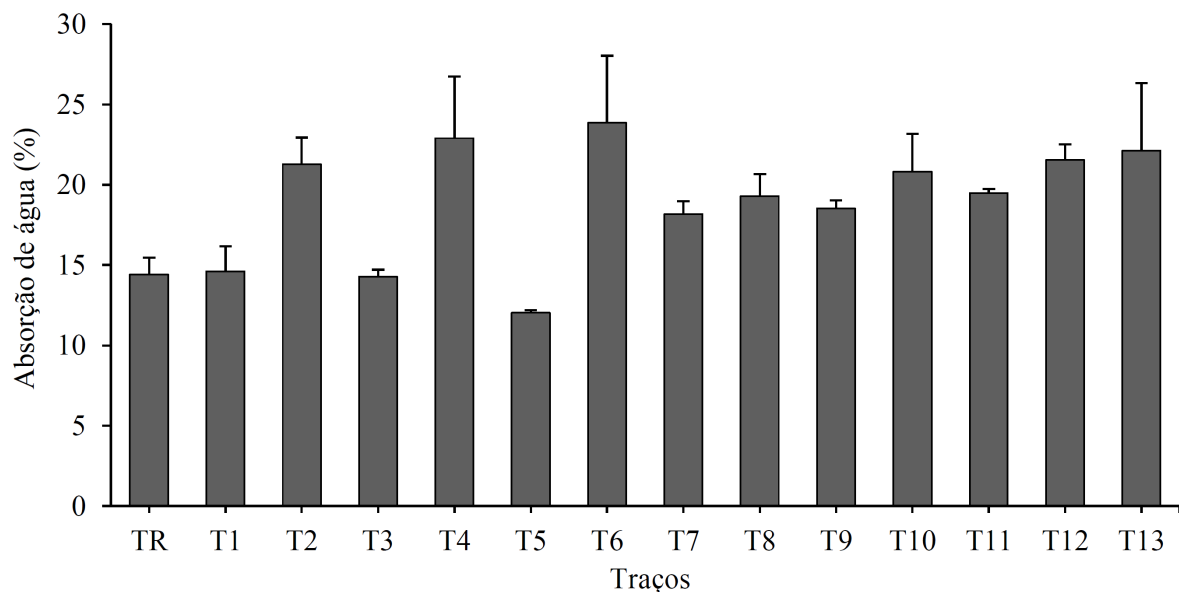
Figura 4.19 – Superfície de contorno para a variação da absorção de água aos 28 dias em função das variáveis independentes.



Fonte: o autor.

Analisando os dados médios de absorção de água aos 28 dias, conforme Figura 4.20, percebe-se que a maioria dos traços obteve uma maior porcentagem de absorção quando comparado ao de referência (TR). O aumento na absorção ocorreu devido a utilização da borracha. Esse material tem uma fraca ligação com o cimento, favorecendo a presença de vazios na mistura e, conseqüentemente, aumentando a absorção de água (SHTAYEH, 2007), conforme Estudo 1.

Figura 4.20 – Absorção de água dos tijolos de concreto do Estudo 3.



Fonte: o autor.

A influência da adição da LRC-S, em determinadas porcentagens pode acarretar no aumento ou a diminuição da absorção, conforme mostrado no Estudo 2. [Kou, Zhan e Poon \(2012b\)](#) concluíram que o uso desse material, em grandes porcentagens, pode aumentar a absorção devido a baixa formação de cristais na pasta endurecida ocasionada pela baixa presença de cimento não hidratado em sua composição. Entretanto, observou-se uma redução desse parâmetro no traço T5 (com substituição de 11,7% de cimento) em relação ao TR. Isso pode ser explicado pelo efeito fíler que a LRC-S causa na mistura, preenchendo os vazios e ocasionando um efeito contrário à adição da borracha.

Contudo, nenhum dos valores obtidos estão de acordo com o limite máximo de absorção, média e individual, proposto pela NBR 6136 ([ABNT, 2014b](#)), de 10% e 12% respectivamente, como pode ser observado na Figura 4.20. Serão necessários, então, reformulações na produção, seja no traço ou na intensidade de vibração e compactação dos tijolos, de forma a reduzir a absorção para que atendam a norma em questão.

4.2.4 Validação das porcentagens de substituição (Estudo 4)

Partindo dos resultados do Estudo 3, foram definidos quatro traços para validação dos resultados. Como a LRC-S não teve efeitos significativos no Estudo 3, ela foi mantida constante a uma taxa de substituição do cimento em 15%. Foi definido 8% como limite superior de substituição do agregado por borracha e 0% para o limite inferior. Foi realizado também um traço intermediário com 4% de substituição, além do traço de referência (sem resíduos), conforme Tabela 4.9.

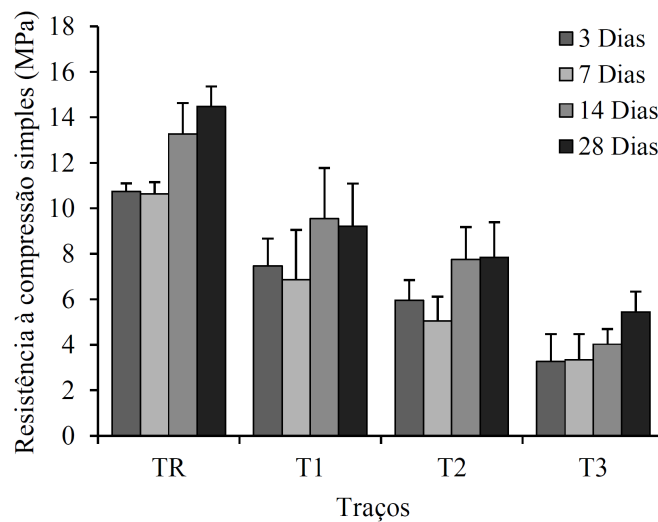
Tabela 4.9 – Traço dos materiais para o Estudo 4.

Traço	LRC-S (%)	Borracha (%)
TR	0	0
T1	15	0
T2	15	4
T3	15	8

Fonte: o autor.

Os resultados médios de resistência à compressão simples ao longo das idades estão apresentados na Figura 4.21. Nota-se que já nos 3 dias de idade os tijolos já apresentaram grande parte de sua resistência, conforme já observado nos Estudos anteriores. Percebe-se também que houve uma perda de resistência do traço TR para o T1 com substituição de 15% do cimento por LRC-S, e conforme se aumentou o teor de substituição do agregado por borracha nos traços T2 e T3, indo ao encontro dos resultados já obtidos. Nos traços TR, T1 e T2 houve uma perda de resistência aos 7 dias, sendo que esse comportamento também foi verificado no estudo de [Kou, Zhan e Poon \(2012a\)](#), que não realizou nenhuma discussão ou verificação sobre o assunto.

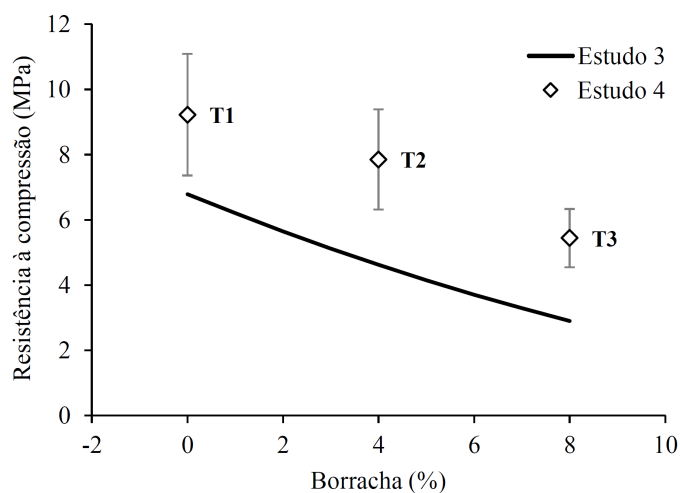
Figura 4.21 – Resistência à compressão dos tijolos aos 3, 7, 14 e 28 dias, do Estudo 4.



Fonte: o autor.

Partindo do equacionamento realizado no Estudo 3, obteve-se o gráfico da Figura 4.22, que representa a curva aos 28 dias para resistência à compressão dos tijolos de concreto com LRC-S e borracha, e os pontos obtidos com o Estudo 4. As curvas para 3, 7 e 14 dias estão apresentadas no Apêndice B. Salienta-se que foi mantido constante em 15% a porcentagem de substituição do cimento por LRC-S, pois de acordo com o Estudo 3, apenas a borracha tem efeito significativo.

Figura 4.22 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 28 dias.



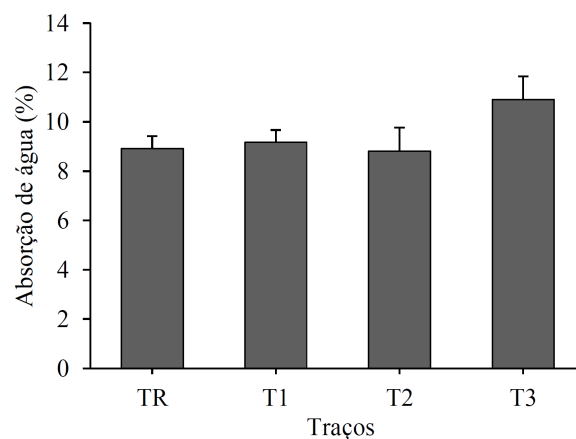
Fonte: o autor.

Analisando a Figura 4.22 pode-se perceber que, no Estudo 4, a resistência dos tijolos manteve a mesma tendência dos tijolos do Estudo 3, porém com valores superiores e atendendo o limite inferior de 3 MPa conforme recomenda a NBR 6136 (ABNT, 2014b). Esse

aumento da resistência pode ser explicado pela diferença granulométrica do agregado utilizado e pelo grau de vibração imposto pela mesa vibratória, que, para o Estudo 4, foram diferentes daqueles empregados no Estudo 3.

Os resultados médios de absorção de água estão apresentados na Figura 4.23. Pode-se perceber que não houve grande variação entre os traços TR, T1 e T2, e ambos atenderam o limite de 10% da NBR 6136 (ABNT, 2014b). Com relação ao T3 tem-se que ele apresentou uma maior absorção, que pode ser explicada pela maior porcentagem de substituição do agregado por borracha, conforme Estudos 1 e 3, não atendendo as recomendações da NBR 6136 (ABNT, 2014b).

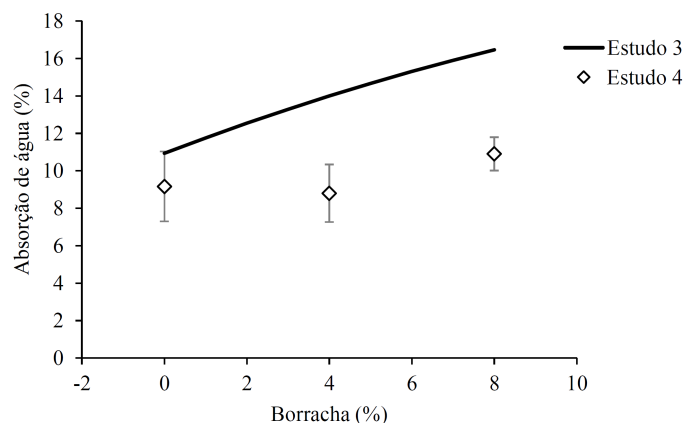
Figura 4.23 – Absorção de água dos tijolos do Estudo 4.



Fonte: o autor.

Com relação ao modelo apresentado no Estudo 3 para a absorção de água aos 28 dias, tem-se que a curva gerada não apresentou a mesma tendência dos pontos do Estudo 4, conforme Figura 4.24. No entanto, a absorção média dos traços TR, T1 e T2 do Estudo 4 ficaram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2014b) e NBR 8491 (ABNT, 2012a).

Figura 4.24 – Comparação entre a curva de absorção de água obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4.



Fonte: o autor.

Após as análises observou-se que todos os traços do Estudo 4 atenderam as recomendações acerca da resistência à compressão e, com exceção do T3, a absorção de água, reafirmando a viabilidade de se utilizar a LRC-S e o granulado de borracha de pneu. Foi possível perceber também que quanto maior a porcentagem de borracha, menor será a resistência à compressão e maior será a absorção de água, sendo que o limite de substituição da borracha é dependente do agregado empregado e das condições de moldagem, bem como do traço utilizado.

Com relação ao uso da LRC-S em substituição parcial ao cimento, juntamente com a borracha, tem-se que a porcentagem de LRC-S não apresenta efeitos significativos dentro dos intervalos testados. Desse modo, é possível reduzir a quantidade de cimento, que é a matéria prima de maior valor agregado da produção dos tijolos, sem haver prejuízos de resistência à compressão e absorção de água.

Tem-se, então, que o traço T2, com 4% de borracha e 15% de LRC-S, pode ser considerado como um valor ótimo, atendendo aos limites estabelecidos pelas normas e com maiores percentuais de resíduos.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do mapeamento sistemático, foi possível perceber que ainda há uma lacuna quanto a utilização da borracha de pneu e da Lama Residual do Concreto para a confecção de tijolos. A utilização desses materiais no processo produtivo de um bem durável poderá não só reduzir o volume de resíduos sólidos gerados, mas também a demanda por agregados naturais e cimento Portland, modificando diretamente a quantidade de recursos naturais e energéticos consumidos.

Através do Estudo 1, pode-se concluir que os tijolos com substituição do agregado por borracha de pneu podem ser uma alternativa viável tecnicamente até uma porcentagem de 20% de substituição, e com um grande potencial sustentável, reduzindo a exploração dos recursos naturais e incorporando um resíduo que seria depositado no meio ambiente.

Em relação ao Estudo 2 tem-se que a aplicação da LRC-S como substituto do cimento, na fabricação de tijolos de concreto, se mostra viável, pois além dos resultados satisfatórios para essa finalidade, representa a inserção de um produto que tem potencial para minimizar impactos ambientais e custos nessa cadeia produtiva.

Ao utilizar os dois resíduos conjuntamente, borracha e LRC-S, no Estudo 3, tem-se que a adição de borracha nos tijolos afetou negativamente a resistência à compressão e a absorção de água, enquanto o uso do resíduo cimentício não teve efeitos significativos. Dessa forma, é possível obter traços com porcentagens dos dois resíduos que satisfazem as normativas.

Ao aplicar a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) no Estudo 3, foi possível obter as faixas de substituição dos dois resíduos, destacando os limites encontrados de 8% de substituição de agregado por borracha e de 15% de substituição do cimento por LRC-S, conjuntamente. Assim, a MSR se mostrou eficiente para os objetivos propostos, permitindo verificar os efeitos dos resíduos na resistência à compressão e absorção de água dos tijolos.

Com o Estudo 4 foi possível reafirmar os efeitos da borracha nos tijolos, mostrando

haver uma tendência na diminuição da resistência conforme se aumenta o teor de substituição do agregado, além de revelar que o traço com 4% de borracha e 15% de LRC-S atende os limites tanto para resistência à compressão quanto para absorção de água. No entanto, o limite de substituição pode variar de acordo com o traço adotado, sendo que um traço rico em cimento possibilitaria substituições de maiores porcentagens.

Através dos Estudos foi possível observar uma variabilidade dos resultados provocado pela mudança da granulometria dos materiais e da mão-de-obra, porém as respostas atenderam as normas para tijolos. Contudo, novos estudos que analisem a interferência de cada etapa de moldagem, bem como a variabilidade da granulometria dos materiais constituintes nos resultados finais, por exemplo, poderiam auxiliar na definição da variação do traço ótimo.

Contudo, pode se afirmar que a utilização de tijolos de concreto com resíduo para vedação é viável tecnicamente, de forma a diminuir o volume de resíduos descartados, obter um produto mais barato e ainda atender aos critérios exigidos pelas normas.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- Verificar a aplicabilidade dos traços estudados para tijolos de concreto na confecção de blocos vazados, também de concreto;
- Analisar a influência do processo de moldagem e dos materiais utilizados nos resultados de resistência à compressão e absorção de água;
- Averiguar a iteração dos dois resíduos dentro da estrutura dos tijolos;
- Determinar a variação da composição química da LRC-S de diferentes usinas de concreto e de diferentes dias de coleta;
- Acompanhar o desenvolvimento das características físicas e mecânicas dos tijolos em idades avançadas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, H. d. S. Pneus inservíveis: alternativas possíveis de reutilização. 100 f. 2007. *Trabalho de Conclusão de Curso.(Graduação em Ciências Econômicas)-Departamento de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.* Citado na página 27.

ANGELIN, A. F. *et al.* The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 151, p. 534–545, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

AOUDIA, K. *et al.* Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*, Elsevier, v. 60, p. 471–481, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 56.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7170*: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983. 4 p. Citado 4 vezes nas páginas 45, 60, 62 e 71.

_____. *NBR NM 248*: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p. Citado na página 47.

_____. *NBR 7211*: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009. 12 p. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 55.

_____. *NBR 8491*: Tijolo de solo-cimento - requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 5 p. Citado 8 vezes nas páginas 45, 60, 62, 63, 66, 71, 73 e 77.

_____. *NBR 8492*: Tijolo de solo-cimento – análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 4 p. Citado na página 51.

_____. *NBR 12118*: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria. Rio de Janeiro, 2014. 14 p. Citado na página 51.

_____. *NBR 6136*: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 13 p. Citado 13 vezes nas páginas 45, 50, 51, 55, 60, 62, 63, 66, 71, 73, 75, 76 e 77.

_____. *NBR ISO 7500-1*: Materiais metálicos – calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial parte 1: Máquinas de ensaio de tração/ compressão – calibração e verificação do sistema de medição da força. Rio de Janeiro, 2016. 19 p. Citado na página 51.

AUDO, M.; MAHIEUX, P.-Y.; TURCRY, P. Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 112, p. 790–799, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 34, 35, 36, 37, 63 e 72.

BAILEY, J. *et al.* Evidence relating to object-oriented software design: A survey. In: IEEE. *Empirical Software Engineering and Measurement, 2007. ESEM 2007. First International Symposium on*. [S.l.], 2007. p. 482–484. Citado na página 25.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como Fazer Experimentos-: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria*. [S.l.]: Bookman Editora, 2010. Citado na página 39.

BENSON, C. Using shredded scrap tires in civil and environmental construction. *Resource Recycling*, Resource Recycling Inc, v. 14, p. 71–71, 1995. Citado na página 24.

BISPO, E. da S. *Processo de alcalinização dos "nibs" de cacau (Theobroma cacao L.) e avaliação da qualidade do pó*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

BOUDAUD, Z.; BEDDAR, M. Effects of recycled tires rubber aggregates on the characteristics of cement concrete. Scientific Research Publishing, 2012. Citado na página 32.

CANOVA, J. A. *et al.* A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. *Acta Scientiarum. Technology*, Universidade Estadual de Maringá, v. 29, n. 2, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 56.

CANTERI, M. G. *et al.* Sasm-agri: Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos scott-knott, tukey e duncan. *Revista Brasileira de Agrocomputação*, Ponta Grossa, v. 1, n. 2, p. 18–24, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 59.

CARELI, E. *A resolução CONAMA n. 307/2002 e as novas condições para a gestão dos resíduos de construção e demolição. 2008. 155 p.* Dissertação (Mestrado) — Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo,, 2008. Citado na página 23.

CONAGIN, A. Delineamentos "compostos centrais ortogonais, rotacionais e divisíveis em blocos". *Bragantia*, Directory of Open Access Journals, v. 41, n. 1, p. 49–56, 1982. Citado na página 49.

CONAMA, R. N. 258, de 26 de agosto de 1999. *Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasil*, 1999. Citado na página 27.

CORREIA, S. *et al.* Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. *Waste management*, Elsevier, v. 29, n. 11, p. 2886–2891, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 32, 34, 37 e 41.

DIAMOND, W. J. *Practical experiment designs*. [S.l.]: New York: Van Nostrand Reinholds, 1989. Citado na página 49.

EMBRAPA, E. C. N. de Pesquisa de S. *Manual de métodos de análise de solo*. [S.l.]: Embrapa, 1997. Citado na página 48.

ERMCO. *Guidance on Concrete Wash Water in the European Ready Mixed Concrete Industry*. 2006. Disponível em: <http://www.ermco.eu/document/ermco_wash_water_guidance_oct_2006-pdf/>. Acesso em: 20/01/2017. Citado na página 34.

FARIA, J. S. d. *Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha*. 2015. 125 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2015., 2015. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 56.

FIORITI, C. F. *Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho.", 2002. Citado na página 28.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus. *Acta Scientiarum. Technology*, Universidade Estadual de Maringá, v. 32, n. 3, 2010. Citado na página 28.

FRAILE-GARCIA, E. *et al.* Acoustic behavior of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste-tire rubber. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 12, p. 962, 2016. Citado na página 31.

FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. *Tecnologias e materiais alternativos de construção*. [S.l.]: Unicamp, 2003. v. 1. Citado na página 23.

FREITAS, C. *et al.* Physicochemical and mechanical performance of portland cement concrete with recycled styrene-butadiene tyre-rubber waste. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 32, n. 4, p. 913–918, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 27, 30 e 32.

GIRSKAS, G.; NAGROCKIENĖ, D. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 140, p. 36–42, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

GONÇALVES, R. H.; STURARO, J. R. Aplicação da metodologia de superfície de resposta na remediação de um solo arenoso contaminado artificialmente com cobre. *Geociências*, p. 59–70, 2010. Citado na página 40.

GOULART, E. A. *Reciclagem energética de pneus automotivos através de reator de leito fluidizado: uma proposta para a questão ambiental*. 1999. 120 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP, 1999. Citado na página 28.

GRIZOTTO, R. K. *et al.* Otimização via metodologia de superfície de respostas dos parâmetros tecnológicos para produção de fruta estruturada e desidratada a partir de polpa concentrada de mamão. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, SciELO Brasil, v. 25, n. 1, p. 158–164, 2005. Citado na página 40.

KOU, S.-c.; ZHAN, B.-J.; POON, C.-s. Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 549–556, 2012a. Citado 4 vezes nas páginas 34, 37, 58 e 75.

_____. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 36, p. 566–571, 2012b. Citado 6 vezes nas páginas 34, 38, 62, 66, 72 e 75.

LAGARINHOS, C. A. F. *Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011. Citado na página 28.

- LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 18, n. 2, p. 106–118, 2008. Citado na página 28.
- LING, T.-C. Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 164–175, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 60.
- MATEUS, N. B.; BARBIN, D.; CONAGIN, A. Viabilidade de uso do delineamento composto central. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 23, p. 1537–1546, 2008. Citado na página 40.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.; FILHO, A. C. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. [S.l.]: Pini, 1994. Citado na página 39.
- MONTEIRO, J. H. P. *et al.* Gestão integrada de resíduos sólidos: manual gerenciamento integrado de resíduos sólidos. In: *Gestão integrada de resíduos sólidos: manual gerenciamento integrado de resíduos sólidos*. [S.l.]: IBAM, 2001. Citado na página 23.
- MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis—o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. *Ambiente & sociedade*, Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, v. 11, n. 1, p. 167–184, 2008. Citado na página 27.
- NEHDI, M.; KHAN, A. Cementitious composites containing recycled tire rubber: an overview of engineering properties and potential applications. *Cement, concrete and aggregates*, ASTM International, v. 23, n. 1, p. 3–10, 2001. Citado na página 60.
- NEVILLE, A. M. *Tecnologia do concreto*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 55.
- NOHARA, J. J. *et al.* GS-40-Resíduos sólidos: passivo ambiental e reciclagem de pneus. Tese (Doutorado) — Thesis, São Paulo, ano I, 2006. Citado na página 27.
- PAULA, H.; ILHA, M. Quality of concrete plant wastewater for reuse. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 7, n. 3, p. 349–366, 2014. Citado na página 33.
- PAULA, H. M. de; ILHA, M. S. O. Uso da moringa oleífera no tratamento de águas residuárias de usinas de concreto: Mapeamento sistemático. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 11, n. 1, 2016. Citado na página 25.
- PETERSEN, K. *et al.* Systematic mapping studies in software engineering. In: *EASE*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 8, p. 68–77. Citado na página 25.
- REZENDE, M. L. de S. *et al.* Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 12, n. 3, p. 135–146, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- RODRIGUES, J. P. C.; SANTOS, C. Resistência à compressão a altas temperaturas do betão com agregados reciclados de borracha de pneu. In: *2º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 29.
- RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos*. [S.l.]: Casa do Pão Editora, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 39, 40, 68 e 88.

ROMUALDO, A. *et al.* Pneus inservíveis como agregados na composição de concreto para calçadas de borracha. *Cleaner Production Initiatives and Challenges for a Sustainable World*. São Paulo, Brasil, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 23, 28 e 29.

RUGHOOPUTH, R.; RANA, J. O.; JOORAWON, K. Possibility of using fresh concrete waste in concrete for non structural civil engineering works as a waste management strategy. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Springer, v. 21, n. 1, p. 94–99, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 37.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M. Structural behavior of rubberized masonry walls. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 89, p. 174–186, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 31, 32, 47, 55, 58, 60 e 64.

SASAKI, T. *et al.* Preparation and performance of arsenate (v) adsorbents derived from concrete wastes. *Waste management*, Elsevier, v. 34, n. 10, p. 1829–1835, 2014. Citado na página 38.

SCHOON, J. *et al.* Feasibility study of the use of concrete sludge as alternative raw material for portland clinker production. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE - American Society Civil Engineers, v. 27, n. 10, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 38.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, JSTOR, p. 507–512, 1974. Citado 4 vezes nas páginas 45, 59, 61 e 66.

SEALEY, B.; PHILLIPS, P. S.; HILL, G. Waste management issues for the uk ready-mixed concrete industry. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, v. 32, n. 3, p. 321–331, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 33.

SÉRIFOU, M. *et al.* A study of concrete made with fine and coarse aggregates recycled from fresh concrete waste. *Journal of Construction Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 37.

SHTAYEH, S. M. S. *Utilization of waste tires in the production of non-structural Portland cement concrete*. Tese (Doutorado) — An-Najah National University, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 74.

SILVA, D. O. F. d. *Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016. Citado na página 34.

SILVEIRA, P. M. *et al.* Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu. *Revista Matéria*, v. 21, n. 2, p. 416–428, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 60 e 72.

SKRIPKIŪNAS, G.; GRINYS, A.; ČERNIUS, B. Deformation properties of concrete with rubber waste additives. *Materials science [Medžiagotyra]*, v. 13, n. 3, p. 219–223, 2007. Citado na página 60.

SODUPE-ORTEGA, E. *et al.* Evaluation of crumb rubber as aggregate for automated manufacturing of rubberized long hollow blocks and bricks. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 106, p. 305–316, 2016. Citado na página 31.

STATSOFT. : Statistica: Statsoft inc.: Data analysis software system p. version 10.0. [S.l.], 2011. Citado na página 50.

TAM, V. W.; TAM, C. M. Economic comparison of recycling over-ordered fresh concrete: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, v. 52, n. 2, p. 208–218, 2007. Citado na página 37.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 54, p. 1323–1333, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

TSIMAS, S.; ZERVAKI, M. Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 22, n. 1, p. 7–17, 2011. Citado na página 33.

VIEIRA, L. d. B. P.; FIGUEIREDO, A. D. de. Resíduos da concreteira: o aproveitamento do problema. *Concreto & Construções*, São Paulo, v. 41, n. 71, p. 41–45, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

_____. Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. *Waste Management*, Elsevier, v. 56, p. 337–351, 2016. Citado na página 37.

XUAN, D. *et al.* Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, v. 312, p. 65–72, 2016a. Citado 4 vezes nas páginas 32, 35, 38 e 57.

_____. Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorisation in construction products. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 113, p. 664–672, 2016b. Citado na página 38.

APÊNDICE A

ESTUDO 3

A.1 Resistência à compressão simples dos tijolos do Estudo 3 aos 3, 7, 14 e 56 dias

Estão apresentados na Tabela A.1 os valores (respostas) dos parâmetros de resistência à compressão simples aos 3, 7, 14 e 56 dias, juntamente com o traço de referência T0.

Tabela A.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples aos 3, 7, 14 e 56 dias.

Traço	Resistência à compressão (Y_1)			
	3 Dias (MPa)	7 Dias (MPa)	14 Dias (MPa)	56 Dias (MPa)
T0	3,33	3,02	4,42	5,88
T1	2,09	3,35	3,34	4,53
T2	0,32	0,27	0,53	0,58
T3	1,96	2,07	2,82	3,65
T4	0,41	0,46	0,77	0,93
T5	4,17	5,02	6,17	8,58
T6	0,19	0,20	0,31	0,39
T7	0,88	1,30	1,42	1,52
T8	0,52	0,92	1,17	1,03
T9	0,77	0,84	1,44	1,89
T10	0,60	0,65	1,04	0,93
T11	0,55	0,59	0,83	0,85
T12	0,67	0,76	1,28	1,23
T13	0,37	0,45	0,71	0,54

Fonte: o autor.

Para as respostas das variáveis dependentes são expressos os coeficientes de regressão polinomial de segunda ordem, estatisticamente significativas em um nível de 95% de confiança, conforme Tabela A.2. São apresentados também os coeficientes de determina-

ção R^2 e R_{aj}^2 , que fornecem “uma medida da proporção de variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas” (RODRIGUES; IEMMA, 2014). Vale destacar os valores encontrados para os coeficientes de determinação R^2 e R_{aj} , que, para todos os parâmetros, ficaram acima de 92% e 87%, respectivamente, indicando um excelente ajuste do modelo.

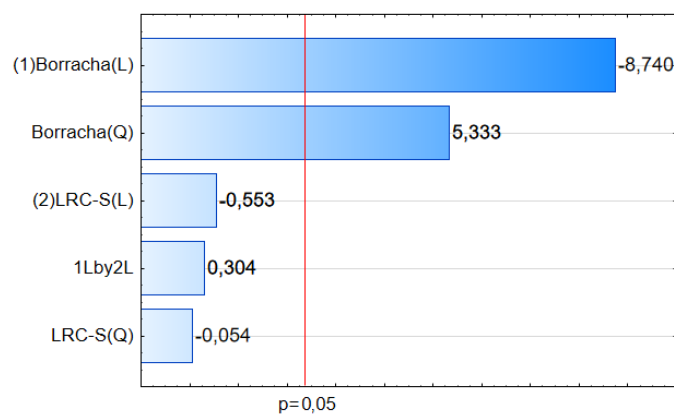
Tabela A.2 – Regressões polinomiais de segunda ordem das variáveis dependentes utilizadas na geração das Superfícies de Resposta, gráficos de Pareto e de contorno, com seus respectivos coeficientes de determinação.

Idade	Modelos	R^2 (%)	R_{aj}^2 (%)
3 Dias	$Y_1 = 3,825706 - 0,393573X_1 + 0,010643X_1^2$	93,75	89,29
7 Dias	$Y_1 = 5,786363 - 0,540957X_1 + 0,013008X_1^2$	96,08	93,28
14 Dias	$Y_1 = 5,871843 - 0,566531X_1 + 0,014352X_1^2$	92,84	87,73
56 Dias	$Y_1 = 8,242324 - 0,865440X_1 + 0,022971X_1^2$	92,90	87,82

Fonte: o autor.

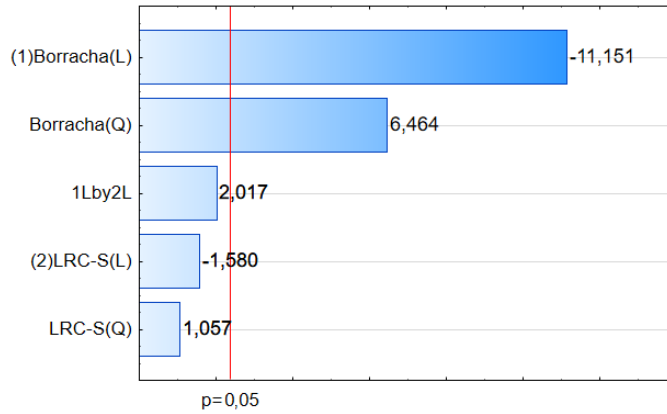
Estão apresentados nas Figuras A.1, A.2, A.3 e A.4 os gráficos de Pareto do delineamento experimental, com a indicação das variáveis significativas ($p < 0,05$), em que se verificou que os efeitos lineares (L) e quadrático (Q) da borracha foram considerados significativos para alteração da resistência à compressão em todas as referidas idades. Os valores ao lado das barras são referentes aos valores da estatística do teste t, sendo o tamanho da barra proporcional ao efeito causado pela variável em questão sobre a variável resposta. Assim, percebe-se que os efeitos lineares da borracha provocam a redução da resistência à compressão, observado pelo sinal negativo do teste t.

Figura A.1 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 3 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.



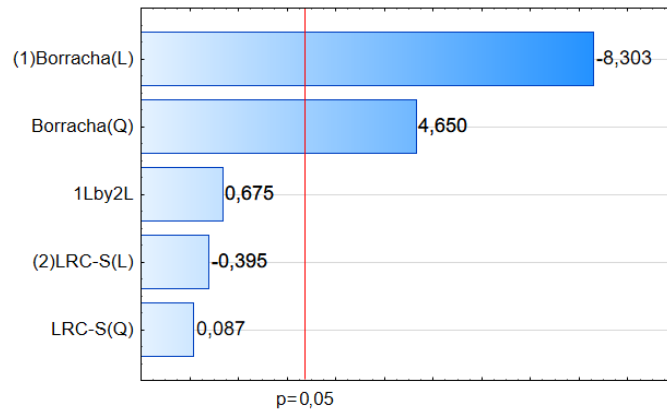
Fonte: o autor.

Figura A.2 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 7 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.



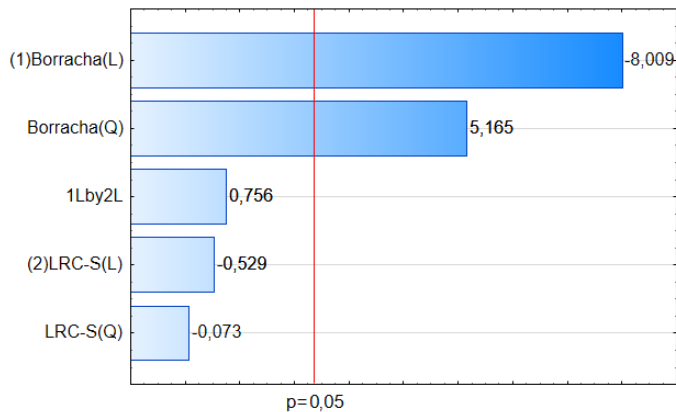
Fonte: o autor.

Figura A.3 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 14 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.



Fonte: o autor.

Figura A.4 – Gráfico de Pareto para análise da resistência à compressão aos 56 dias por meio do DCCR, para os tijolos com adição de resíduos.



Fonte: o autor.

Na Tabela A.3 estão apresentadas a análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão Y_1 aos 3, 7, 14 e 56 dias, sendo os modelos de regressão, em todas as análises, significativas para $p < 0,05$ e podem ser considerados preditivos. Com relação a falta de ajuste tem-se que, Y_1 aos 3, 7 e 14 dias, foram significativas, porém essas análises foram realizadas para acompanhar o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo das idades, podendo, então, considerar os modelos, em questão, válidos para tal fim. Já para Y_1 aos 56 dias a falta de ajuste foi não significativa, revelando que o modelo referente pode ser considerado válido para fins preditivos.

Tabela A.3 – Análise de variância (ANOVA).

Resistência à compressão (Y_1) - 3 Dias					
Fonte de Variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	p
Regressão	5	13,8486	2,7697	21,0040	0,0004*
Resíduo	7	0,9231	0,1319		
Falta de ajuste	3	0,8373	0,2791	13,0182	0,0157*
Erro puro	4	0,0858	0,0214		
Total	12	14,7716			
Resistência à compressão (Y_1) - 7 Dias					
Fonte de Variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	p
Regressão	5	22,9974	4,5995	34,3025	0,0001*
Resíduo	7	0,9386	0,1341		
Falta de ajuste	3	0,8448	0,2816	12,0141	0,0181*
Erro puro	4	0,0938	0,0234		
Total	12	23,936			
Resistência à compressão (Y_1) - 14 Dias					
Fonte de Variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	p
Regressão	5	28,634	5,7268	18,1577	0,0007*
Resíduo	7	2,2077	0,3154		
Falta de ajuste	3	1,8413	0,6138	6,7007	0,0487*
Erro puro	4	0,3664	0,0916		
Total	12	30,8417			
Resistência à compressão (Y_1) - 56 Dias					
Fonte de Variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	p
Regressão	5	59,9531	11,9906	18,3099	0,0007*
Resíduo	7	4,5841	0,6549		
Falta de ajuste	3	3,5424	1,1808	4,5340	0,0891 ^{n.s.}
Erro puro	4	1,0417	0,2604		
Total	12	64,5372			

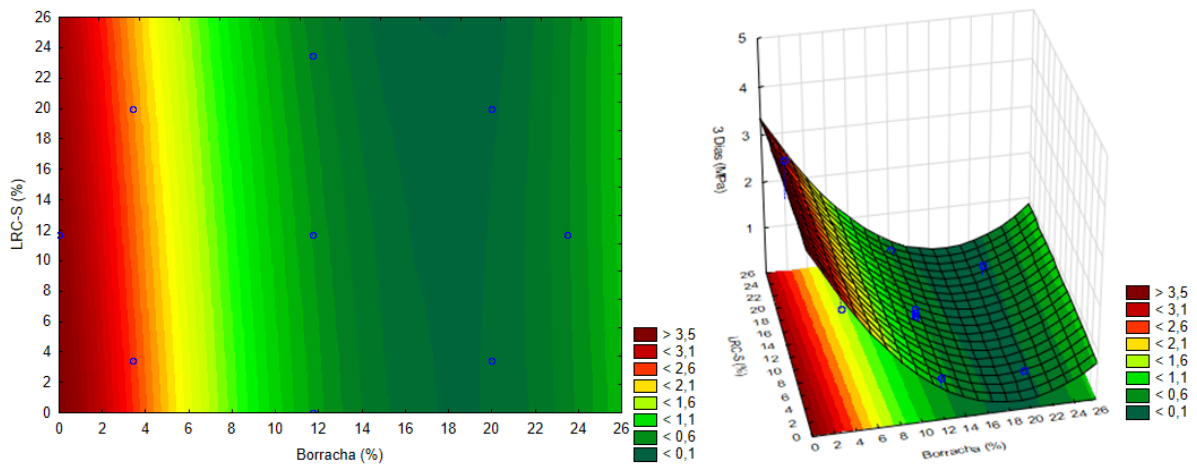
* Valores significativos a 5% de probabilidade

^{n.s.} Não Significativo

Fonte: o autor.

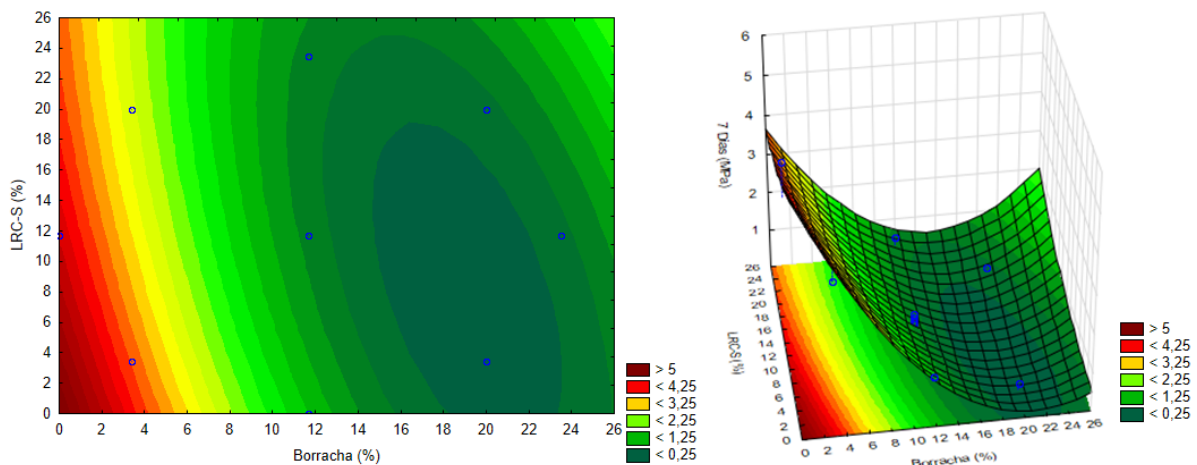
Os gráficos de contorno e as superfícies de respostas são apresentadas nas Figuras A.5, A.6, A.7 e A.8 para os valores de resistência à compressão aos 3, 7, 14 e 56 dias quando considerada a interação das variáveis independentes. Verifica-se que conforme se aumenta as porcentagens dos resíduos se reduz a resistência à compressão em todas as idades. Percebe-se, também que a LRC-S tem pouca influência na perda da resistência se comparada com a borracha. Observando as faixas de resistências, nota-se que as zonas vermelhas são as que apresentam as maiores resistências.

Figura A.5 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 3 dias em função das variáveis independentes.



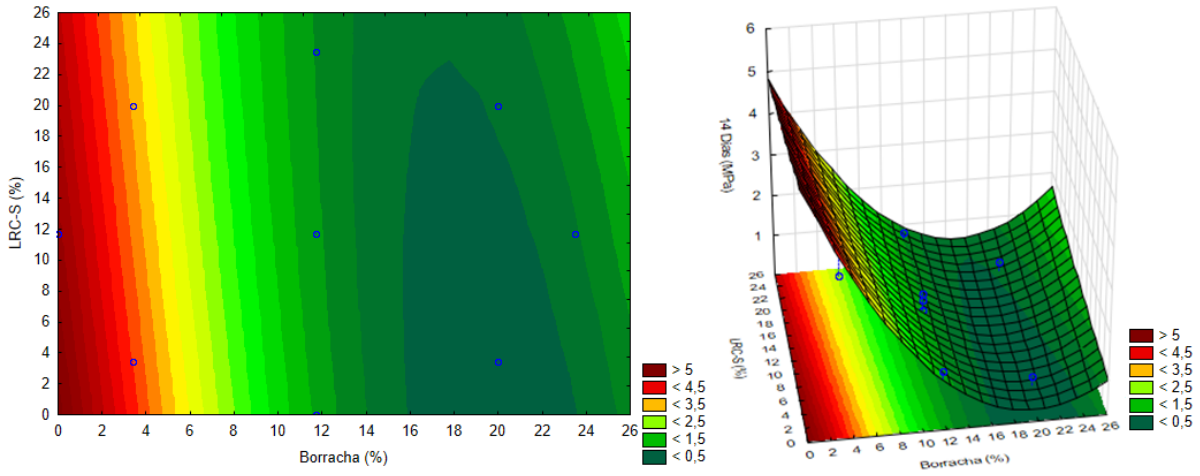
Fonte: o autor.

Figura A.6 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 7 dias em função das variáveis independentes.



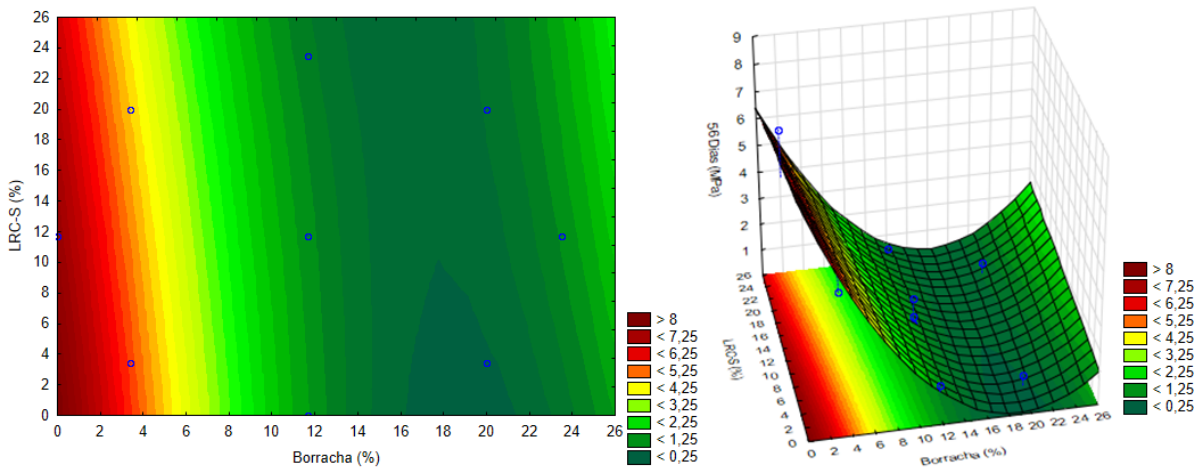
Fonte: o autor.

Figura A.7 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 14 dias em função das variáveis independentes.



Fonte: o autor.

Figura A.8 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da resistência à compressão aos 56 dias em função das variáveis independentes.



Fonte: o autor.

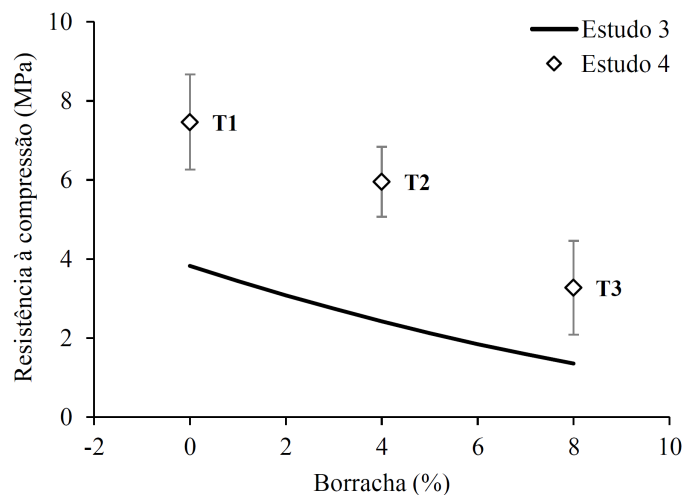
APÊNDICE B

ESTUDO 4

B.1 Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 3, 7 e 14 dias.

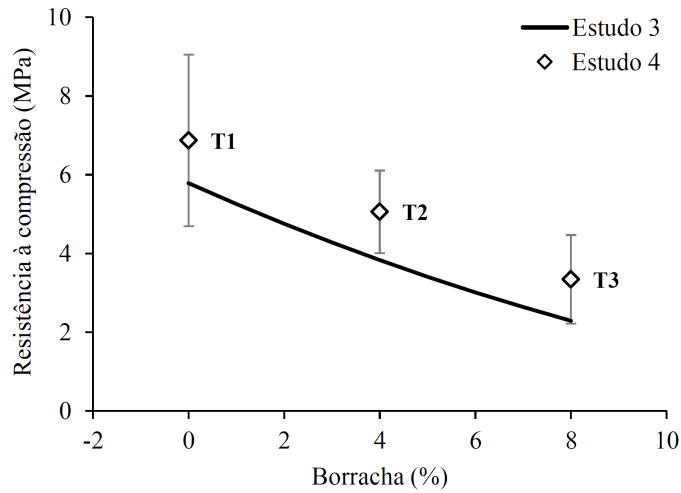
Partindo do equacionamento realizado no Estudo 3, obteve-se os gráficos das Figuras B.1, B.2 e B.3, que representam as curvas dos 3, 7 e 14 dias para resistência à compressão dos tijolos de concreto com LRC-S e borracha, e os pontos obtidos com o Estudo 4. Salienta-se que foi mantido constante em 15% a porcentagem de substituição do cimento por LRC-S, pois de acordo com o Estudo 3, apenas a borracha tem efeito significativo.

Figura B.1 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 3 dias.



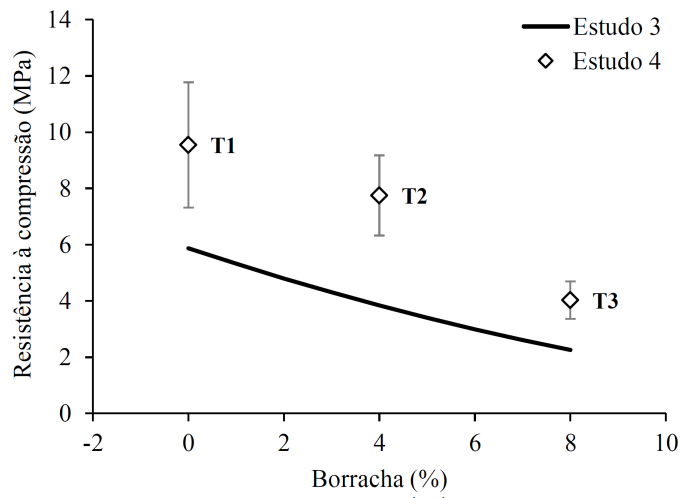
Fonte: o autor.

Figura B.2 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 7 dias.



Fonte: o autor.

Figura B.3 – Comparação entre a curva de resistência à compressão obtida com o Estudo 3 e os pontos do Estudo 4, para 14 dias.



Fonte: o autor.

Analisando as Figuras B.1, B.2 e B.3 pode-se perceber que, no Estudo 4, a resistência dos tijolos manteve a mesma tendência dos tijolos do Estudo 3, para as idades analisadas, porém com valores superiores. Esse aumento da resistência pode ser explicado pela diferença granulométrica do agregado utilizado e pelo grau de vibração imposto pela mesa vibratória, que, para o Estudo 4, foram diferentes daqueles empregados no Estudo 3.