



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

MATHEUS FELIPE FOGGIA ALBERNAZ

**EMPREGO DE RESÍDUOS DE BIOMASSAS ORIUNDOS
DA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA EM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND
EM CONCRETO CONVENCIONAL**

Palmas/TO
2022

MATHEUS FELIPE FOGGIA ALBERNAZ

**EMPREGO DE RESÍDUOS DE BIOMASSAS ORIUNDOS
DA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA EM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND
EM CONCRETO CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Fundação Universidade Federal do Tocantins como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Aurélio Pessoa
Picanço

Palmas/TO
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A331e Albernaz, Matheus Felipe Foggia.

Emprego de resíduos de biomassa oriundos da queima de cerâmica vermelha em substituição parcial do cimento Portland em concreto convencional. / Matheus Felipe Foggia Albernaz. – Palmas, TO, 2022.

58 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2022.

Orientador: Aurélio Pessoa Picanço

1. Resíduos de biomassa. 2. Substituição do cimento Portland. 3. Otimização de resultados. 4. Gestão sustentável. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

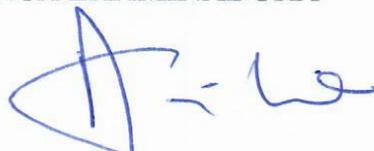
FOLHA DE APROVAÇÃO

MATHEUS FELIPE FOGGIA ALBERNAZ

EMPREGO DE RESÍDUOS DE BIOMASSAS ORIUNDOS DA PRODUÇÃO DE
CERÂMICA VERMELHA EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
PORTLAND EM CONCRETO CONVENCIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental,
Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca
Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA



Dr. Aurélio Pessoa Picanço (Presidente)
Universidade Federal do Tocantins



Dr. Sérgio Carlos Bernardo Queiroz (Membro Titular Interno)
Universidade Federal do Tocantins



Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho (Membro Titular Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

Aprovada em: 27 de outubro de 2022.

Dedico este trabalho a todos que de certa forma me ajudaram, mas em especial ao meus pais, Marco Augusto Velasco Nascimento Albernaz e Tatyana Kelly Foggia, pelos ensinamentos que me ensinaram em nossos anos juntos, especialmente aqueles sobre honestidade, resiliência e paciência. Vou carregá-los comigo para sempre, muito obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Tocantins – UFT e a todos os professores desta instituição, pelo conhecimento, aprendizado, amadurecimento profissional, e pelo espaço cedido para a minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aurélio Picanço, pela dedicação, seriedade, compromisso e posição prestativa ao longo dessa pesquisa.

Aos meus pais, Marco Augusto e Tatyana Kelly, pela confiança, amor e apoio nessa jornada acadêmica, além de exemplo de perseverança para a vida.

Aos meus avós queridos, Marcos e Irailde, Benedito e Goretti, pelo amor, conselhos e incentivo aos estudos.

A minha noiva, pelo incentivo, amor, carinho e apoio durante toda esta jornada, mas em especial pela compreensão dos momentos que destinei a pesquisa.

Aos meus padrinhos, Marcelo e Milena, Adriana e Osiel, pelo carinho, incentivo e ensinamentos.

Ao meu irmão, pelo espírito de fraternidade, mas principalmente, por instigar em mim o espírito de competitividade, em especial nos primeiros semestres da faculdade.

Ao laboratório “Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais”, em especial aos senhores André Mendes e Bernardo Tutikian, pela colaboração e parceria na realização dos ensaios desse trabalho.

Ao laboratório “Controle Engenharia”, em especial ao senhor José Humberto, também pelo auxílio, colaboração e parceria na realização dos ensaios desse trabalho.

Aos meus queridos amigos e parceiros de curso, pelos momentos de felicidade, descontração, estudos, além da amizade e companheirismo.

A todos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo. “

(Peter Drucker)

RESUMO

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água, por isso, o estudo executado possibilitou a avaliação da substituição parcial do cimento por cinza de biomassa em concreto convencional, na qual buscou a mitigação dos custos envolvidos no descarte da cinza, a reutilização por meio de sua reinserção na cadeia produtiva e a diminuição da emissão de gases do efeito estufa, devido o fator clínquer. Esse trabalho ocorreu através de um planejamento experimental executado pela metodologia do delineamento do composto central rotacional (DCCR) que levou em consideração o teor de substituição de cimento por cinza e o tempo de cura do concreto, onde foram mapeadas as influências destes parâmetros para os valores de teores de substituição entre 2% e 18% e o tempo de cura do concreto entre 0 e 35 dias, abrangendo desde idades iniciais até idades finais. O objetivo de tal estudo foi a otimização da escolha das melhores combinações para poder se atingir os melhores resultados, o qual foi obtido através do gráfico de superfície de resposta encontrado para cada uma das respostas de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água. Após a execução dos ensaios e de toda a análise executada, concluiu-se que apesar da cinza possuir alguns parâmetros fora das especificações das normativas, apresentou resultados satisfatórios, permitindo chegar ao traço com melhor desempenho, que ocorreu para o teor de substituição de 2,05% e tempo de cura de 26,20 dias, o qual obteve-se $36,82 \pm 2,58$ MPa. Os resultados também mostraram que essa substituição parcial é uma alternativa que além de sustentável, devido o fator clínquer, também possui grande viabilidade técnica pois pode ser empregado tanto para uso convencional quanto estrutural e, ainda, ajuda na redução da poluição, redução de consumo de materiais não renováveis e faz a reinserção de materiais na cadeia produtiva.

Palavras-chaves: Resíduos de biomassa, substituição do cimento Portland, otimização de resultados, gestão sustentável.

ABSTRACT

Concrete is the second most consumed material in the world, second only to water, so the study carried out made it possible to evaluate the partial replacement of cement by biomass ash in conventional concrete, in which it sought to mitigate the costs involved in the disposal of ash, the reuse through its reinsertion in the production chain and the reduction of the emission of greenhouse gases, due to the clinker factor. This work took place through an experimental planning performed by the methodology of the design of the rotational central compound (DCCR) that took into account the content of replacement of cement by ash and the curing time of the concrete, where the influences of these parameters were mapped to the values of substitution contents between 2% and 18% and the curing time of the concrete between 0 and 35 days, covering from initial ages to final ages. The objective of this study was to optimize the choice of the best combinations in order to achieve the best results, which was obtained through the response surface graph found for each of the responses of compressive strength, tensile strength by diametrical compression and water absorption. After carrying out the tests and all the analysis performed, it was concluded that despite the ash having some parameters outside the specifications of the regulations, it presented satisfactory results, allowing to reach the trait with the best performance, which occurred for the substitution content of 2, 05% and curing time of 26.20 days, which resulted in 36.82 ± 2.58 MPa. The results also showed that this partial replacement is an alternative that, in addition to being sustainable, due to the clinker factor, also has great technical feasibility as it can be used for both conventional and structural use, and also helps to reduce pollution, reduce consumption of non-renewable materials and reinserts materials into the production chain.

Keywords: Biomass waste, replacement of Portland cement, optimization of results, sustainable management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descarte incorreto de Cinzas de Biomassa.....	21
Figura 2 - Reação química e atuação das adições no concreto.....	22
Figura 3 - Micro Estrutura do concreto com adições	22
Figura 4 - Fluxograma da pesquisa.....	28
Figura 5 - Granulometria a laser da cinza	34
Figura 6 - Resultado de Slump teste.....	37
Figura 7 - Resultado dos ensaios de Resistência à compressão	37
Figura 8 - Variáveis independentes da regressão da resistência à compressão	39
Figura 9 - ANOVA da regressão da resistência à compressão.....	39
Figura 10 - Diagrama de dispersão da resistência à compressão	40
Figura 11 - Gráfico de Pareto da resistência à compressão.....	41
Figura 12 - Gráfico de superfície de resposta da resistência à compressão	42
Figura 13 - Resultado de resistência à tração por compressão diametral.....	42
Figura 14 - Variáveis independentes da regressão da resistência à tração por compressão diametral.....	43
Figura 15 - ANOVA da regressão da resistência à tração por compressão diametral....	44
Figura 16 - Diagrama de dispersão da resistência à tração por compressão diametral ..	45
Figura 17 - Gráfico de Pareto da resistência à tração por compressão diametral.....	45
Figura 18 - Gráfico de superfície de resposta da resistência à tração por compressão diametral.....	46
Figura 19 - Resultado de absorção água por imersão dos corpos de prova.....	47
Figura 20 - Variáveis independentes da regressão da absorção água por imersão dos corpos de prova.....	48
Figura 21 - ANOVA da regressão da absorção água por imersão dos corpos de prova	48
Figura 22 - Diagrama de dispersão da absorção água por imersão dos corpos de prova	49
Figura 23 - Gráfico de Pareto da absorção água por imersão dos corpos de prova.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos resíduos de acordo com Artigo 13 da Lei nº 12.305	19
Tabela 2 - Caracterização física do cimento.....	29
Tabela 3 - Relação dos traços de concretos calculados em proporção e em massa	30
Tabela 4 - Ensaio no estado fresco e endurecido do concreto	31
Tabela 5 - Parâmetros de estudo do planejamento experimental	32
Tabela 6 - Caracterização física dos agregados.....	33
Tabela 7 - Massa específica da cinza.....	34
Tabela 8 - Caracterização física da cinza	35
Tabela 9 - Caracterização química da cinza	36
Tabela 10 - Parâmetros de estudo do planejamento experimental	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVO	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1. Biomassa	17
3.1.1. Principais tipos de biomassa usados pela indústria cerâmica	17
3.1.1.1. Eucalipto.....	17
3.1.1.2. Pinus	18
3.2. Indústria cerâmica.....	18
3.3. Resíduos sólidos	19
3.3.1. Classes dos resíduos de acordo com a Lei Nº 12.305/10	19
3.3.2. Resíduos de biomassa.....	20
3.4. Pozolanas e reações pozolânicas.....	21
3.4.1. Cinzas pozolânicas agroindustriais	23
3.5. Construção civil	23
3.5.1. Concreto	24
3.5.2. Cimento	24
3.5.3. Agregado	25
3.6. Planejamento experimental.....	26
3.6.1. Delineamento do composto central rotacional (DCCR)	26
3.6.2. Metodologia de superfície de resposta (MSR).....	27
3.6.3. Gráfico de Pareto.....	27
4. METODOLOGIA.....	28
4.1. Caracterização física e química dos rejeitos	28
4.1.1. Cimento	29
4.2. Verificação das características do concreto no estado fresco e endurecido.....	30
4.2.1. Dosagem do Concreto	30
4.2.2. Características do concreto no estado fresco e endurecido	31
4.3. Análise dos dados	31
5. RESULTADOS	33
5.1. Caracterização dos Materiais	33
5.1.1. Agregados.....	33
5.1.2. Cinza.....	33
5.1.2.1. Caracterização física.....	33

5.1.2.2.	Caracterização química.....	35
5.2.	Abatimento de tronco de cone (Slump Test)	36
5.3.	Resistência à compressão.....	37
5.3.1.	Função de regressão	38
5.3.2.	Diagrama de dispersão	39
5.3.3.	Gráfico de Pareto.....	40
5.3.4.	Superfície de resposta.....	41
5.4.	Resistência à tração por compressão diametral	42
5.4.1.	Função de regressão	43
5.4.2.	Diagrama de dispersão	44
5.4.3.	Gráfico de Pareto.....	45
5.4.4.	Superfície de resposta.....	46
5.5.	Absorção água por imersão dos corpos de prova	47
5.5.1.	Função de regressão	47
5.5.2.	Diagrama de dispersão	49
5.5.3.	Gráfico de Pareto.....	50
5.6.	Comparativo dos resultados do DCCR.....	50
6.	CONCLUSÕES	52
7.	REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água, conforme a revista Isto É (WALGER, 2018) [72], e por isso, traz fatores importantes em sua produção, devido ao grande consumo de cimento, que estão relacionados com o elevado consumo de energia e a geração de gases do efeito estufa [70]. A produção de cimento consome uma grande quantidade de combustível, chegando a um consumo de 60 a 130 kg de combustível e 110 kWh de energia elétrica para produzir uma tonelada de cimento (SETIC-UFSC, [s.d.]) [68], sem falar do fator clínquer, que é toda a poluição causada pelo clínquer, principal matéria prima de fabricação do cimento.

Uma forma de minimizar esses efeitos negativos resultantes dos altos fornos das indústrias cimenteiras poderia estar vinculado a redução no consumo do cimento ou sua substituição por outros materiais de menor impacto ambiental, como por exemplo o uso de cinzas de biomassa geradas nas mais diversas atividades [37], que foi o tema proposto por esse trabalho. Portanto, este estudo baseou-se na promoção de reutilização de resíduos por meio da reinserção na cadeia produtiva e na mitigação dos custos envolvidos no seu descarte [50].

Contudo, buscou-se abordar a produção de concreto com substituição parcial do cimento por resíduos de biomassas que possam ser utilizados para fins estruturais, considerando se essas adições de resíduos podem ajudar na redução do consumo de cimento e se esses materiais estão à altura para substituição do mesmo [65]. Essa aplicação de biomassa em substituição parcial do cimento se justifica devido seu potencial pozolânico, que favorece a substituição do cimento, visando diminuir o fator clínquer [62], principal matéria prima da fabricação do cimento e causador de poluição do ar [37].

Para isso, caracterizou-se os materiais utilizados na confecção dos traços e, verificou-se as características do concreto com os resíduos de biomassas no estado fresco e endurecido, levando em consideração o traço de referência, que não possuía substituições, para assim poder avaliar a viabilidade dessa substituição favorecendo a redução do fator clínquer.

Desse modo, o trabalho aborda sobre a gestão sustentável das cinzas, promovendo sua reutilização e a mitigação dos custos envolvidos no seu descarte [50][47], além da emissão de gases do efeito estufa, devido ao fator clínquer, e também

por ser ambientalmente correto, porque dá uma destinação a biomassa e retira gás carbônico da atmosfera [49].

Esse trabalho se faz relevante devido a utilização de cinza sem qualquer tipo de tratamento, que é oriunda da fábrica de blocos de cerâmica vermelha localizada na cidade de Palmas/TO, além, de que o estudo mais próximo realizado foi uma tese de doutorado sobre o estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar na região de Ouro Preto, Minas Gerais.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Avaliar a produção de concreto com menor teor cimentício por meio da substituição parcial do cimento por cinzas oriundas da queima de cerâmicas vermelhas, levando em consideração a superfície de resposta dos resultados.

2.2. Objetivos específicos

- 2.2.1. Caracterizar os materiais utilizados na confecção dos traços de concreto para elaboração da dosagem correta do concreto;
- 2.2.2. Verificar as características do concreto com a substituição de cimento por cinza no estado fresco e endurecido;
- 2.2.3. Mapear a influência do teor de substituição de cimento por cinza e tempo de cura do concreto na resposta de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por imersão;
- 2.2.4. Avaliar a possibilidade da substituição do cimento pela cinza contribuindo para a redução do fator clínquer.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Biomassa

Biomassa é a matéria orgânica empregada na produção de energia (BIOMASSABR, [s.d.]) [32]. Nem toda a produção primária do planeta passa a incrementar a biomassa vegetal, pois parte dessa energia acumulada é utilizada pelo ecossistema na sua própria manutenção. Os pontos positivos do uso da biomassa na produção de energia são o pequeno custo, o fato de ser renovável, permitir o reaproveitamento de resíduos e ser bem menos poluente que outras fontes de energia como o petróleo ou o carvão.

Dentre as biomassas mais utilizadas estão a lenha, o bagaço da cana-de-açúcar, galhos e folhas de árvores, papéis, papelão. A renovação da biomassa ocorre através do ciclo do carbono. A combustão da biomassa ou de seus derivados provoca a liberação de CO₂ na atmosfera. As plantas, através da fotossíntese, convertem esse CO₂ nos hidratos de carbono, liberando oxigênio.

Deste modo, a utilização da biomassa, desde que não seja de forma predatória, não altera a composição da atmosfera. A biomassa se destaca pela grande densidade energética e pela facilidade de armazenamento, conversão e transporte (BIOMASSABR, [s.d.]) [32].

Apesar do emprego de biomassa como fonte de energia traga vantagens, é relevante ressaltar que se deve ter um rigoroso controle sobre as áreas desmatadas (BIOMASSABR, [s.d.]) [32]. Um exemplo disso foi à expansão da indústria de álcool no Brasil, onde várias florestas foram desmatadas para dar lugar às plantações de cana-de-açúcar. Por isso a preocupação ambiental, mais do que nunca, deve ser prioridade total na utilização da biomassa (BIOMASSABR, [s.d.]) [32].

3.1.1. Principais tipos de biomassa usados pela indústria cerâmica

3.1.1.1. Eucalipto

O gênero *Eucalyptus* é conhecido por sua grande variabilidade genética. São centenas de espécies com propriedades físicas e químicas tão diversas que fazem com que os eucaliptos sejam usados para as mais diversas finalidades. Mesmo dentro de uma mesma espécie, propriedades podem variar marcadamente, fazendo com que determinadas progênies ou procedências sejam apropriadas para um determinado processo industrial e que outras sejam totalmente inúteis (PEREIRA et al., 2000) [63].

3.1.1.2. Pinus

Segundo Missio et al. (2015) [58], o gênero Pinus compreende aproximadamente 600 espécies florestais, em que a madeira das espécies Pinus elliottii e Pinus taeda destaca-se por apresentar grande aplicação industrial no Brasil. Essas espécies foram as que melhor se adaptaram ao clima na região sul e sudeste do país, tornando-se fontes renováveis de ciclo rápido, com mercado abrangendo os setores de paletes, embalagens, mobiliário, construção civil e indústrias de celulose e papel.

3.2. Indústria cerâmica

O setor industrial é o maior consumidor de energia a partir de biomassa, e dentro do setor destaca-se a Indústria da Cerâmica Vermelhas, uma grande consumidora de lenha para fabricação de blocos (LOPES; BRITO; MOURA, 2016) [48].

A ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica) aponta em seu site oficial que o mercado nacional conta com cerca de 6.903 fabricas de cerâmicas e olarias, sendo responsável por mais de 293 mil empregos diretos, 900 mil indiretos e gerando um faturamento anual de R\$ 18 bilhões (4,8% do faturamento da indústria da construção civil) (ANICER, [s.d.]) [29].

Ainda segundo a ANICER são produzidas por mês no Brasil 4 bilhões de Blocos/tijolos cerâmicos, uma quantidade altíssima. Para produção de 2000 blocos segundo Lopes (2016) [48] é consumido um volume de 2800 m³ de cavacos de lenha, fazendo uma proporção com os dados da ANICER e os fornecidos por Lopes (2016) [48], são necessários 5,6 bilhões de m³ de cavacos para produção dos 4 bilhões de blocos/Tijolos.

Segundo Escobar (2016) [38], o Eucalyptus e Pinus geram respectivamente 0,5% e 0,25% de cinzas, levando em consideração que a indústria cerâmica consome 5,6 bilhões de m³ mês, logo a um volume de cinzas de aproximadamente 28 milhões de m³.

Segundo Vaske (2012) [71], grande parte dessas cinzas são descartadas sem um mínimo de controle, que é um risco muito grande para contaminação do solo, lençol freático e do ar, pois parte destas cinzas se dispersão no ar.

De acordo com a Fundação Nacional da Cerâmica (FUNDACER) [41], para minimizar os impactos ambientais as indústrias têm utilizado biomassas renováveis em seus fornos, consumindo o que é descartado pelas indústrias agrícolas e moveleiras, ajudando a limpar o meio ambiente.

3.3. Resíduos sólidos

Gerados em todos os momentos das atividades humanas, os resíduos, de todos os efeitos causados por eles, podem-se destacar um deles, sendo uma grande quantidade de emissão de gases do efeito estufa (MASILAMANI et al., 2017) [51]. Nos últimos anos, os resíduos deixaram de ser sobras indiscriminadas e passaram a ser matéria prima, deixando claro a mudança no modo de ver e tratar os resíduos (MELO, 2012) [56]. A autora comenta que, o que era antes considerado “lixo” ou rejeito descartado, passa a ser tratado de forma diferenciada, sendo classificado e tratado visando sua reinserção na cadeia produtiva. Os resíduos podem ser oriundos das mais diversas atividades, sendo as principais delas industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de varrição, entre outras.

3.3.1. Classes dos resíduos de acordo com a Lei Nº 12.305/10

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 [33], classifica os resíduos sólidos quanto à sua origem e quanto à sua periculosidade, para que possam ser geridos de forma adequada. Nas ações de gestão de resíduos, a lei é um instrumento indispensável, sendo aplicada por instituições e órgãos fiscalizadores. A partir da classificação apresentada pela lei, o gerador de um resíduo pode naturalmente identificar o potencial de risco do mesmo, bem como reconhecer as melhores alternativas para reciclagem e/ou destinação final.

Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 [33], em seu artigo 13, traz a classificação dos resíduos quanto a origem e quanto a periculosidade. E esta classificação foi apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos resíduos de acordo com Artigo 13 da Lei nº 12.305

Quanto à origem	Quanto à periculosidade
a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;	a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de	b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;	
c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;	
d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;	
e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;	
f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;	
g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;	
h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;	
i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;	
j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;	
k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;	

Fonte: Lei nº 12.305, adaptada pelo autor (2022).

3.3.2. Resíduos de biomassa

As origens dos resíduos de biomassa são diversas: doméstica, agropecuária ou industrial e podem causar sérios problemas ao meio-ambiente e à saúde pública, se descartados de modo incorreto (BIOMASSABR, [s.d.]) [32]. Entretanto, devido ao seu

baixo custo e disponibilidade imediata, os resíduos podem ser aproveitados, reduzindo custos de produção e a poluição ambiental (BIOMASSABR, [s.d.]) [32].

Por isso, novas tecnologias podem ser desenvolvidas com a finalidade de transformar resíduos em novos produtos, para que os materiais residuais deixem de ser problemas e se tornem soluções (BIOMASSABR, [s.d.]) [32].

A quantidade de resíduos de biomassa gerada é elevadíssima. Por exemplo a cana-de-açúcar, estima-se que cerca de 178,15 milhões de toneladas de bagaço e palhas secas foram produzidos na safra 2017/18, considerando dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2018) [25].

Ainda de acordo com a Conab [25], é complexo estimar o total de resíduos agropecuários produzidos no País, mas acredita-se que o número é da ordem de um bilhão de toneladas por ano. Portanto, é fácil entender que resíduos são matérias-primas de baixo custo disponíveis nos locais onde são produzidos.

O emprego de biomassa como fonte para geração de energia da origem a cinzas, que são resíduos, e como resíduos devem ser tratados adequadamente para que não se tornem potenciais problemas ambientais conforme a Figura 1.

Figura 1 - Descarte incorreto de Cinzas de Biomassa



Fonte: Google Imagens, 2021.

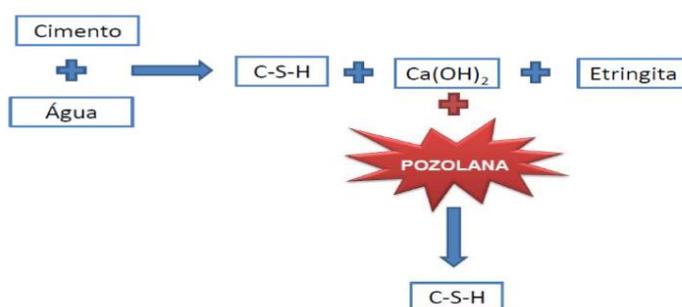
3.4. Pozolanas e reações pozolânicas

Produtos usados como materiais suplementares em substituição parcial do cimento Portland são ditas adições minerais (SALES, 2012) [64]. Estes materiais são empregados com objetivo de aprimorar o desempenho de matrizes cimentícias (CORDEIRO, 2006) [36]. Dentre as adições minerais destacam-se as pozolanas. Trata-se de um material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio (ACI, 2002) [27].

Resumidamente, a NBR 12653 (ABNT, 2014) [11] define que pozolanas são materiais que contêm consideráveis teores de sílica ou alumina em sua forma reativa. O termo pozolana faz referência à cinza vulcânica originária da ilha italiana de Pozzuoli (MASSAZZA, 1998) [52]. A crescente utilização de pozolanas em matrizes cimentícias motiva o desenvolvimento de inúmeros métodos para avaliação da atividade pozolânica (SALES, 2012) [64].

Segundo Mendes et al. (2017) [57], são definidas como Material Silicoso ou Sílico Aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o Hidróxido de Cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes. As Figuras 2 e 3 apresentam o resumo da atuação química das adições em concreto.

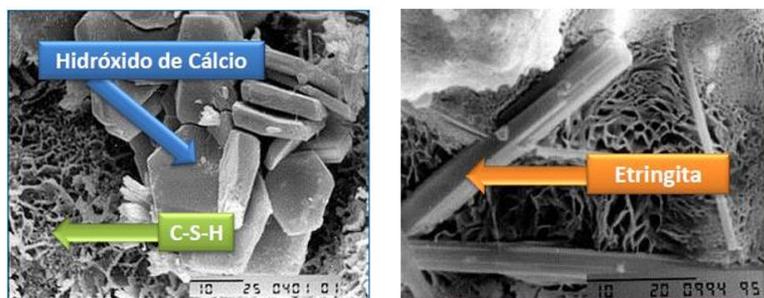
Figura 2 - Reação química e atuação das adições no concreto



Fonte: Isaia, 2011 [31].

Segundo Mendes et al. (2017) [57], as adições podem ser superpozolanas ou não, com grande reatividade com o hidróxido de cálcio, produto gerado na hidratação do cimento.

Figura 3 - Micro Estrutura do concreto com adições



Fonte: Isaia, 2011 [31].

Este material também produz C-S-H, como o gerado pelo clínquer, aumentando

as resistências do concreto e atua fisicamente, como ponto de nucleação, conforme a Figura 3. Com isso, potencializa as reações, melhorando as propriedades da mistura.

O primeiro é o ganho econômico obtido com a substituição de uma parte substancial do cimento Portland por uma pozolana natural mais barata (TORKAMAN; ASHORI; MOMTAZI, 2014) [69].

3.4.1. Cinzas pozolânicas agroindustriais

Os A produção de grãos no Brasil é grande e visualiza-se um panorama favorável à sua expansão (SALES, 2012) [64]. Segundo estimativa do IBGE (2017) [44], a safra de 2017 foi de cerca de 240 milhões de toneladas, 30,3% superior à safra colhida em 2016 (185,8 milhões de toneladas). O crescimento na produção se deve, em especial, à ampliação do cultivo de soja, milho e arroz.

O aumento da produção agrícola, inevitavelmente, acarreta a geração de maior volume de resíduos decorrentes dessas atividades. Os resíduos agrícolas estão entre as principais preocupações ambientais do mundo (GETAHUN; SHITOTE; GARIY, 2018) [42].

Esse fato aliado à crescente demanda energética do país e a necessidade de um desenvolvimento baseado em energias limpas e renováveis, motiva o aproveitamento energético dos resíduos agroindustriais pela calcinação em termoelétricas.

A queima de biomassas em diversos tipos de atividades acaba gerando cinzas, resíduo que em grande parte não tem uma destinação correta, e acaba indo para os aterros sanitários. O teor de cinzas é a fração que permanece como resíduo, após a combustão do carvão vegetal. Varia de 0,5% a mais de 5,0%, dependendo da espécie, da quantidade de casca e da presença de terra e areia na madeira. Teores muito elevados exigem limpezas mais frequentes e podem provocar corrosão em equipamentos metálicos (PEREIRA et al., 2000) [63].

3.5. Construção civil

A Segundo Lucas e Benatti (2008) [49], destacam o setor da construção civil como um grande consumidor de recursos naturais, apresentando então um potencial muito grande para o aproveitamento de resíduos como materiais de construção, sendo um destes materiais o concreto.

Nos próximos anos, a construção civil tem o desafio de incorporar a

sustentabilidade em seus processos produtivos, seja pela busca de novas matérias-primas e produtos mais ambientais (TORKAMAN; ASHORI; MOMTAZI, 2014) [69].

O cimento é parte componente mais importante do material de construção mais utilizado do mundo, o concreto. Todavia, existem aspectos desfavoráveis agregados ao concreto quanto a sua utilização em tão grande proporção, sendo os grandes problemas ambientais relacionados a produção de cimento, acima de tudo concernente a geração de gases maximizadores de efeito estufa e consumo de materiais não renováveis (agregados naturais) (SALES, 2012) [64].

3.5.1. Concreto

O concreto desempenha um papel importante no desenvolvimento moderno de nossa sociedade, pois é um dos materiais de construção mais exigentes depois da água, devido às suas matérias-primas de baixo custo e alta resistência à compressão (HAW et al., 2020) [43].

Conforme descrito por Mehta e Monteiro (2014) [55], o concreto é um dos materiais de construção mais antigos. O concreto é um material que ao longo do tempo apresenta variações significativas de suas propriedades. No concreto a máxima resistência é alcançada com uma pasta de cimento simples, devido ao alto custo do cimento, faz-se a junção de outros materiais, chamados de agregados, em que, para uma dada resistência e uma dada consistência, há uma distribuição granulométrica ótima (combinação de agregado miúdo/grauído) que minimiza a quantidade de pasta.

As características do concreto dependem do seu estado físico. No seu estado fresco, um atributo importante é a trabalhabilidade, responsável por facilitar sua aplicação. Já no estado endurecido, a durabilidade, permeabilidade e, principalmente, a resistência à compressão são suas principais características.

3.5.2. Cimento

O cimento é o maior produto manufaturado da Terra em massa, e quando combinado com água e agregados minerais, forma materiais à base de cimento (por exemplo, concreto) (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018) [66].

O cimento pode ser definido como um aglomerante hidráulico constituído de óxidos (cálcio, silício, ferro e alumínio) que em contato com a água tem a capacidade de endurecer. A norma C 150 (ASTM, 2018) [28] define Cimento Portland como um

aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfatos de cálcio como um produto de adição.

3.5.3. Agregado

O agregado, um dos ingredientes mais importantes na elaboração da dosagem de concreto. Sobretudo porque aproximadamente 70 a 80% do volume do concreto é composto por agregados, o que torna o custo mais baixo por unidade de volume, devido os mesmos serem de menor custo que o cimento. A atuação dos agregados é decisiva em certas propriedades, entre as quais a redução de retração na pasta, aumento da resistência ao desgaste e melhoria na trabalhabilidade (NEVES, 2009) [60].

A utilização dos agregados deve-se ao fato de que quanto maior a quantidade de agregado menor será a relação água/cimento efetiva, em outros casos, um teor maior de agregado resultaria em menor retração e menor exsudação. Portanto, menor dano à aderência entre o agregado e a pasta e também menores as variações térmicas devidas ao calor de hidratação do cimento (NEVILLE, 2015) [61]. Segundo Neville (2015) [61], a influência do agregado na resistência do concreto não é somente devida a sua resistência mecânica, mas também é significativamente, à sua absorção e às características de aderência. A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é um importante fator de resistência do concreto, especialmente da resistência à flexão. Um exemplo que se pode dar a cerca desse conceito é que uma superfície mais áspera como a de partículas britadas, resulta em uma melhor aderência devido ao intertravamento mecânico.

Quanto as dimensões, os agregados são classificados em dois grupos. Os miúdos (areias quartzosas), os graúdos (seixos rolados, cascalho, britas) e os agregados pétreos de grandes grãos de 250 mm, entre 76mm e 250mm, conforme estabelecidas especificações da NBR 7211 (ABNT, 2019) [5] e NBR 9935 (ABNT, 2011) [10]. Os agregados inorgânicos leves, celular granulado, segundo as especificações brasileiras, encontra-se em dois grupos: o grupo I, os miúdos, quando pelo menos 98% dos grãos passam na peneira de 4,8mm. No grupo II, os graúdos, quando pelo menos 90% dos grãos ficam retidos na peneira de 4,8mm, conforme os limites estabelecidos através da NBR 7213 (ABNT, 2013) [6].

3.6. Planejamento experimental

O planejamento experimental envolve combinações entre os níveis de dois ou mais fatores escolhidos para estudo do processo. Esta técnica visa mostrar como esses fatores (variáveis independentes do processo) podem influenciar uma resposta (BARROS NETO et al., 2001) [30]. A escolha do planejamento adequado é função do número de variáveis independentes, da disponibilidade de matéria prima e dos custos (IEMMA & RODRIGUES, 2009) [45].

Os efeitos das variáveis independentes são calculados sobre as variáveis de resposta. A análise estatística favorável permite a elaboração de modelos matemáticos preditivos e de superfícies de resposta para definir faixas ótimas operacionais das variáveis dentro dos limites estudados. Deve ser realizada a validação experimental das condições otimizadas (IEMMA & RODRIGUES, 2009) [45].

Ao se ter conhecimento destes dados, pode-se dar continuidade ao experimento de forma objetiva, o que proporciona economia de tempo e, conseqüentemente de desperdícios na execução do trabalho [26].

Vale ressaltar que um dos objetivos principais do DOE é encontrar condições de operação de processos que maximizem ou minimizem a resposta de um sistema [26].

3.6.1. Delineamento do composto central rotacional (DCCR)

A metodologia do planejamento composto central rotacional (DCCR) consiste em um grupo de procedimentos, estatísticos e matemáticos, que podem ser usados no estudo das inter-relações entre uma ou mais respostas (variáveis dependentes) com inúmeros fatores (variáveis independentes) [53].

A principal característica de um Delineamento Composto Central está na otimização do sistema, e, então, avaliar o delineamento de acordo com os pontos axiais e a parte curvilínea formada durante a resposta otimizada do processo. Nesse delineamento, existem para um determinado número de fatores, os ortogonais, não ortogonais e/ou rotacionais, podendo ser divididos de forma ortogonal em blocos, tendo a possibilidade de trabalhar com poucas combinações entre os seus fatores e níveis (CHAVES, 2008) [35].

No Planejamento Experimental Fatorial, também conhecido como Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) é bastante comum em experimentos com variáveis independentes, pois englobam diversas combinações entre os níveis a partir de

dois fatores, além de apresentar a vantagem de fornecer o maior número possível de graus de liberdade para o resíduo. Neste planejamento fatorial, costuma-se utilizar um número menor de medidas, explorando todo o espaço experimental para obtenção de respostas de dados práticos (IEMMA & RODRIGUES, 2009) [45].

3.6.2. Metodologia de superfície de resposta (MSR)

A metodologia de superfície de resposta (MSR) objetiva otimizar uma resposta influenciada por diversos fatores. Trata-se de uma técnica sequencial para obter o ponto mais próximo possível do ideal. Para a execução da sistemática, é necessário o uso de softwares estatísticos (MONTGOMERY, 2017) [59].

As representações gráficas partem de um modelo matemático mais robusto, no qual a variável dependente se relaciona com as variáveis independentes numa aproximação por meio de um modelo que pode ser de primeira ordem ou não [26].

O método da inclinação máxima ascendente é uma maneira gráfica de obter a região de resposta ótima. Quando se pretende maximização da resposta, a região ideal será aquela que apresentar maior inclinação da reta e quando se deseja a minimização tem-se a inclinação máxima descendente (MONTGOMERY, 2017) [59].

Desse modo, verifica-se a superfície de resposta ideal para um dado experimento de acordo com o desejado pelo experimentador [26].

3.6.3. Gráfico de Pareto

O gráfico de Pareto é uma representação visual utilizando um gráfico de barras que organiza as informações de modo que permita evidenciar quais fatores são mais importantes, em que é organizado de modo decrescente de magnitude permitindo visualização dos tópicos mais relevantes na ocorrência de um fato em análise (WERKEMA, 1995; FERREIRA, 2015) [73][40].

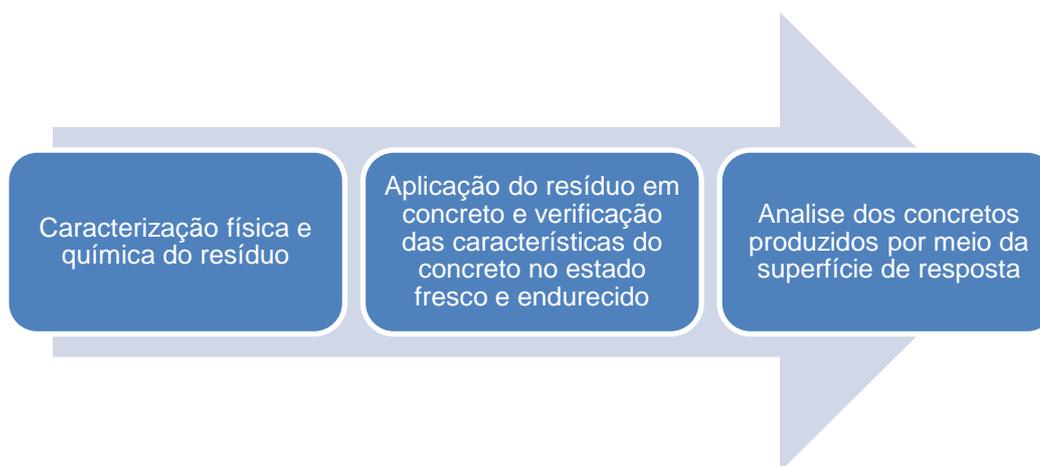
O princípio estabelece que uma redução de cerca de 20% das causas relativas a um determinado problema, seja ele qual for, acarreta a resolução de cerca de 80% destes problemas existentes, ou seja, o princípio denominado 80-20 enuncia que 80% dos resultados advém de 20% das causas, sendo assim é possível concentrar esforços para melhoria nas áreas em que há concentração dos ganhos (WERKEMA, 1995) [73].

A base mais importante acerca deste princípio é de que “muitas poucas coisas são importantes; mas as que são importantes são tremendamente importantes” (KOCH, 2014, p. 30) [46].

4. METODOLOGIA

A pesquisa é classificada como aplicada, pois avaliou a possibilidade da substituição parcial do cimento Portland por cinzas de biomassa oriundas da queima de cerâmicas vermelhas, demonstrando assim se as propriedades do concreto foram alteradas com a utilização dos resíduos. A Figura 4 mostra o fluxograma da metodologia desta pesquisa.

Figura 4 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor, (2021).

4.1. Caracterização física e química dos rejeitos

A caracterização física e química da cinza ocorreu embasada na NBR 12653:2015 [11], que trouxe todos os ensaios a serem realizados para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto. Essa caracterização saiu desde ensaios mais simples como massa específica, NBR 16605:2017 [14], e composição granulométrica, NBR NM 248:2003 [24], até ensaios mais complexos como no caso de material retido na peneira de 45 μm , NBR 15894-3:2010 [12], índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias, NBR 5752:2014 [3], e atividade pozolânica com cal aos 7 dias, NBR 5751:2015 [2], para ensaios físicos e, para os químicos a análise química - método de arbitragem, NBR NM 22:2012 [20], análise química - determinação de anidrido sulfúrico, NBR NM 16:2012 [18], determinação do teor de umidade, NBR NM 24:2002 [21]¹, determinação de perda ao fogo, NBR NM 18:2012 [19], e determinação do teor de álcalis disponíveis, NBR NM 25:2003 [22].

¹ Não se foi utilizada a NBR 17051:2022 pois o ensaio foi realizado no final de 2021 e, essa nova norma entrou em vigor em 30 de junho de 2022.

4.1.1. Cimento

Foi utilizado o Cimento Portland CP II F-32 que é um dos tipos mais comuns de cimento encontrado no mercado e também devido sua versatilidade, sendo utilizado para aplicações gerais, como no preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido (UFSC Materioteca, 2016) [67]. Sua caracterização foi retirada do próprio fabricante, que fornece todos os dados e ensaios necessários para a caracterização física e química (CARASEK et al., 2016) [34].

O resultado dos ensaios de caracterização do cimento, os limites normativos dos parâmetros e as respectivas normas utilizadas para a determinação destes estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização física do cimento.

PROPRIEDADE		RESULTADO	LIMITES – NBR 16697:2018	NORMA
Massa específica (g/cm ³)		3,07	-	NBR 16605:2017 [14]
Finura (Blaine – m ² /kg)		3770	>2600	NBR 16372:2015 [13]
Pasta de consistência normal	Quantidade de água (g)	26,60	-	NBR 16607:2018 [15]
	Consistência (mm)			
Tempo de pega	Início de pega (min)	215,00	>60	NBR NM 16607:2018 [15]
	Fim de pega (min)	283,00	<600	
Resistência à Compressão	1 dia (MPa)	15,90	>10	[7]
	3 dias (MPa)	27,60	>20	NBR 7215:2019 [7]
	7 dias (MPa)	33,80	>32	

Fonte: CARASEK et al., 2016 [34].

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização do cimento, constatou-se que estes atendem aos limites normativos.

4.2. Verificação das características do concreto no estado fresco e endurecido

4.2.1. Dosagem do Concreto

A dosagem do concreto é a determinação da mistura mais econômica de um concreto, com características capazes de atender às condições de serviço, utilizando os materiais disponíveis [31] e, por isso, este trabalho avaliou o desempenho de concretos dosados com várias resistências à compressão axial, pelo método de dosagem ACI (American Concrete Institute) [27], o qual é composto de 7 etapas.

A primeira foi a escolha do abatimento, onde se adotou um Slump test de 8 ± 2 cm, devido se encaixar dentro de quase todos os tipos de construção (Mehta e Monteiro) [54], seguido pela escolha da dimensão máxima característica do agregado graúdo, que conforme visto na caracterização dos agregados foi de 9,5 mm, posteriormente se fez a estimativa dos teores de água e ar incorporado, que baseado no abatimento e na dimensão máxima característica do agregado graúdo para a tabela de “sem ar incorporado”, foi de 228 L/m^3 , entretanto, após correções para o abatimento escolhido ficou em 220 L/m^3 . O quarto passo foi a estimativa da relação água/cimento, que ocorreu para um concreto de f_{ck} de 30Mpa e em um desvio padrão da amostra de 5,5 Mpa, do qual foi dado para um controle razoável dos materiais, resultando em uma relação água cimento (a/c) no valor de 0,42925. Posteriormente, a partir do consumo de água e relação a/c, se calculou um teor de cimento de $512,52 \text{ kg/m}^3$ e seguidamente o se calculou do teor de agregado graúdo, originado da relação entre o módulo de finura do agregado miúdo e dimensão máxima característica do agregado graúdo onde se fez a multiplicação dessa relação pela massa unitária do agregado graúdo, gerando um volume de $854,52 \text{ kg/m}^3$ de agregado graúdo. E, por fim, no sétimo passo, se calculou o volume de agregado miúdo de $686,97 \text{ kg/m}^3$.

Vale ressaltar que após todo esse processo se fez a correção da umidade da areia e a montagem dos traços em proporção e em massa, respectivamente, para cada um dos traços, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação dos traços de concretos calculados em proporção e em massa

Traço de Concreto	Cimento	Areia	Brita	Relação a/c	Cinza	Unidade
T 2,93%	1	1,34	1,67	0,43	0,0293	-
	9,01	12,44	15,47	3,98	0,2395	Kg
T 5%	1	1,34	1,67	0,43	0,0500	-

	8,81	12,44	15,47	3,98	0,4087	Kg
T 10%	1	1,34	1,67	0,43	0,1000	-
	8,35	12,44	15,47	3,98	0,8173	Kg
T 15%	1	1,34	1,67	0,43	0,1500	-
	7,89	12,44	15,47	3,98	1,2260	Kg
T 17,07%	1	1,34	1,67	0,43	0,1707	-
	7,69	12,44	15,47	3,98	1,3952	Kg

Fonte: autor (2022)

4.2.2. Características do concreto no estado fresco e endurecido

Após a caracterização do resíduo de biomassa, e da dosagem dos traços com seus respectivos teores de substituição de cimento, foram verificados a influência da substituição nas características do concreto no estado fresco e endurecido, que ocorreu pelos seguintes ensaios descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios no estado fresco e endurecido do concreto

NORMA	ENSAIO
NBR 16889 (ABNT, 2020) [16]	Determinação da consistência por abatimento do tronco de cone
NBR 5739 (ABNT, 2018) [1]	Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos
NBR 7222 (ABNT, 2011) [8]	Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos
NBR 9778 (ABNT, 2009) [9]	Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica

Fonte: Autor, (2022).

4.3. Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada através de um planejamento experimental do Delineamento do Composto Central Rotacional (DCCR) da qual resultou em uma Superfície de Resposta (MSR) para cada uma das variáveis dependentes (respostas).

Essa avaliação considerou duas variáveis independentes, sendo elas o teor de substituição de cimento por cinza e o tempo de cura do concreto, o que permitiu encontrar os intervalos ideais para otimização dos resultados.

Os resultados que se buscou otimização em relação as variáveis independentes supracitadas foram a resistência à compressão, a resistência à tração e a absorção de água.

Todo esse processo entregou gráficos de superfície de resposta, mostrando estatisticamente os resultados obtidos para um dado intervalo.

Para identificação da influência dos parâmetros teor de substituição de cinza por cimento e o tempo de cura do concreto foi utilizado o software Protimiza Experimental Design que executou toda a metodologia do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) resultando nos gráficos de superfície de resposta para a otimização do processo.

Desta forma a finalidade do planejamento experimental foi determinar a faixa de operação onde fosse obtido a maior resistência à compressão, resistência à tração, e absorção de água no concreto produzido.

Portanto, foi utilizado um DCCR com 4 pontos fatoriais, 3 pontos centrais e 4 pontos axiais, totalizando 11 ensaios. Para cada ensaio foi feito um total de 5 corpos de prova, totalizando 165 corpos de prova, o que permitiu definir melhor comportamento de cada parâmetro.

Na Tabela 5 apresentam-se os parâmetros de estudo do planejamento em valores reais.

Tabela 5 - Parâmetros de estudo do planejamento experimental

ENSAIO	Nº ENSAIO	Teor de Substituição (%)	Tempo de Cura (dia)
Ensaio nos pontos fatoriais	1	5	7
	2	15	7
	3	5	28
	4	15	28
Ensaio nos pontos axiais	5	2,93	17,50
	6	17,07	17,50
	7	10	2,65
	8	10	32,35
Ensaio nos pontos centrais	9	10	17,50
	10	10	17,50
	11	10	17,50

Fonte: autor (2022)

Os resultados do planejamento experimental foram analisados pelo software Protimiza Experimental Design, tendo seus modelos de predição e as respectivas superfícies de resposta calculadas para um intervalo de confiança de 95% (p -valor < 0,05). Os resultados dessa análise estão apresentados na parte de resultados desta pesquisa.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterização dos Materiais

Nesse estudo, foram utilizados, para a composição de concretos, os seguintes materiais: cimento CP II F-32, devido sua possibilidade diversa de aplicação e por ser um dos cimentos mais utilizados no Brasil; agregado miúdo natural de origem quartzosa; agregado graúdo britado de origem granítica e; cinza de biomassa oriunda da queima de tijolos cerâmicos de uma fábrica localizada na cidade de Palmas/TO.

5.1.1. Agregados

A caracterização dos agregados foi realizada de acordo com as especificações das normas brasileiras NBR 16972: 2021 [17], NBR NM 52:2009 [23] e NBR NM 248:2003 [24] e, os resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização física dos agregados.

DETERMINAÇÕES	AGREGADO MIÚDO	AGREGADO GRAÚDO
Massa unitária (g/cm ³)	1,31	1,52
Massa específica (g/cm ³)	2,63	2,67
Módulo de finura	1,76	5,71
Dimensão máxima (mm)	4,80	9,50

Fonte: autor (2022)

5.1.2. Cinza

5.1.2.1. Caracterização física

A caracterização física da cinza ocorreu em duas etapas, onde a primeira consistiu nos ensaios preliminares de massa específica e composição granulométrica, que foi realizada de acordo com as especificações das normas brasileiras NBR 16605:2017 [14] e NBR NM 248:2003 [24] e, demonstrado na Tabela 6 e na Figura 5. A segunda etapa consistiu na verificação dos parâmetros exigidos pela NBR 12653:2015 [11], que determina os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, na qual foram realizados os ensaios de material retido na peneira de 45 µm, índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias e atividade pozolânica com cal aos 7 dias, de acordo com as especificações das normas brasileiras NBR 15894-3:2010 [12], NBR 5752:2014 [3] e NBR 5751:2015 [2], respectivamente, e conforme apresentado na Tabela 7.

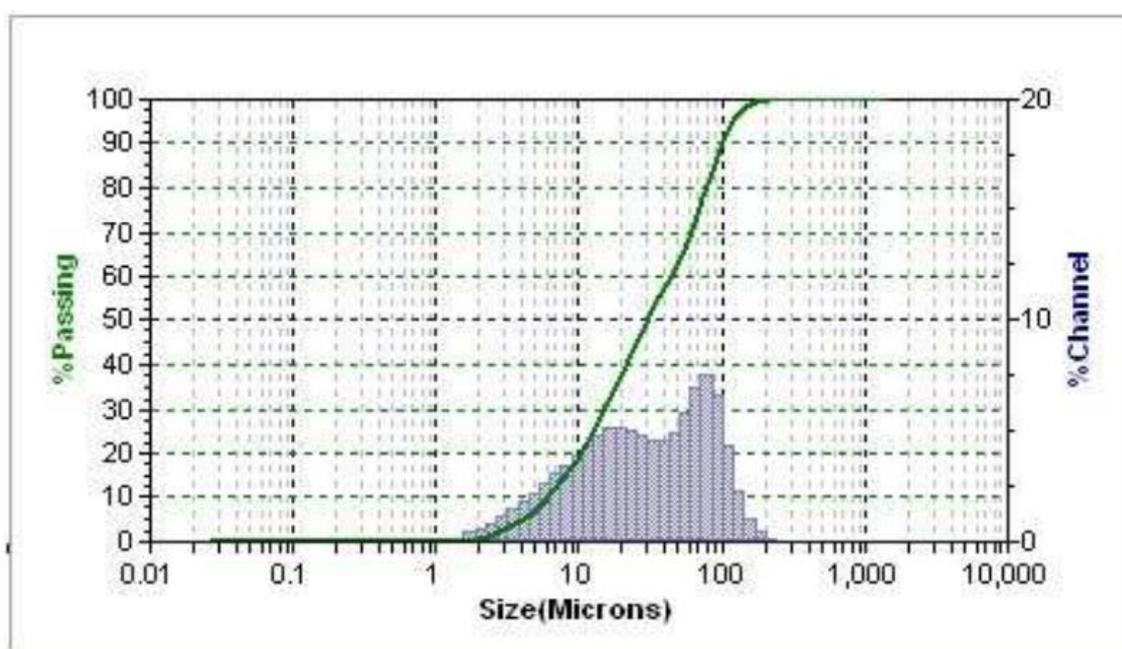
Tabela 7 - Massa específica da cinza

PROPRIEDADE	RESULTADO	NORMA
Massa específica (g/cm ³)	2,77	NBR 16605:2017 [14]

Fonte: autor (2022)

Conforme apresentado pela Tabela 7, obteve-se uma massa específica de 2,77 g/cm³ e, a determinação dessa massa resulta da influência do peso próprio no concreto, bem como seu conhecimento é importante para o cálculo de substituição do cimento pela cinza.

Figura 5 - Granulometria a laser da cinza



Fonte: autor (2022)

A Figura 5 apresenta a granulometria a laser da cinza, pode-se ver que a finura da cinza está um pouco abaixo de 5 micrômetros e um pouco acima de 100 micrômetros, o que é bem fino quando comparado ao agregado miúdo e graúdo. Essa finura contribuiu para diminuição da trabalhabilidade do concreto como podemos observar na seção de resultados, mais especificamente nas propriedades do concreto em seu estado fresco. Essa absorção da cinza também pode diminuir a quantidade de cimento hidratado no concreto, já que o teor de sílica da cinza utilizada nessa pesquisa ficou bem abaixo do da norma específica para utilização de cinza em substituição de cimento.

Tabela 8 - Caracterização física da cinza

Requisitos Físicos				
Propriedades	Classe do Material Pozolânico			Valores Obtidos
	N	C	E	
Material Retido na Peneira de 45 μm [12]	< 20%	< 20%	< 20%	46,50%
Desempenho com o Cimento Portland aos 28 dias [3]	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	84,04%
Teor de Umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	0,70 %

Fonte: autor (2022)

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos nos ensaios físicos para a cinza utilizada na pesquisa, os valores de parâmetros da tabela são os exigidos pela NBR 12653:2015 [11] que faz a especificação dos índices do material pozolânico para que seja garantido o aumento da resistência à compressão e a flexão em idades avançadas, a redução da porosidade e permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos, aumento da resistência à íons de cloreto, mitigação da reação álcali-agregado, redução da ocorrência de eflorescências e aumento da resistividade elétrica. O material estudado é classificado como material pozolânico de classe E devido não ser cinza volante produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas (classe C) e por também não estar inserido nas pozolanas naturais ou artificiais elencadas na classe N.

Apesar de o material não estar dentro de todos os parâmetros físicos exigidos pela norma, para que seja garantida tais características, foi ensaiado e mapeado uma superfície de resposta buscando verificar quais impactos traria para o concreto estudado.

5.1.2.2. Caracterização química

A análise química realizada neste trabalho foi uma análise elementar qualitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), que foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – LCVMat da Unisinos, ensaio esse viabilizado pelos professores André Mendes e Bernardo Tutikian, do qual trouxe todos os parâmetros químicos exigidos pela NBR 12653:2015 [11], conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização química da cinza

Requisitos Físicos				
Propriedades	Classe do Material Pozolânico			Valores Obtidos
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70 %	≥ 70 %	≥ 50 %	6,33 %
SO ₃	≤ 4 %	≤ 5 %	≤ 5 %	3,72 %
Teor de Umidade	≤ 3 %	≤ 3 %	≤ 3 %	0,70 %
Perda ao Fogo	≤ 10 %	≤ 6 %	≤ 6 %	27,69 %
Alcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5 %	≤ 1,5 %	≤ 1,5 %	0 %

Fonte: autor (2022)

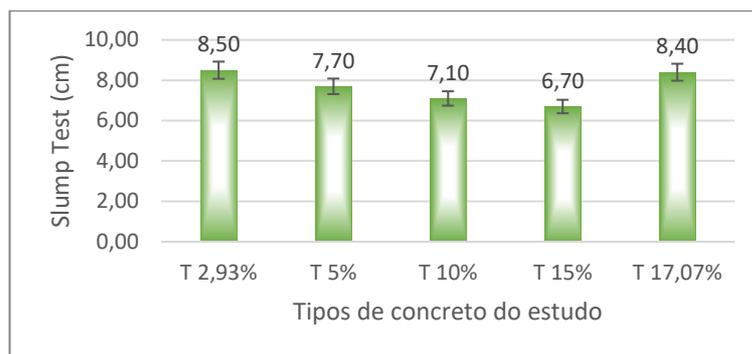
A Tabela 9 apresenta toda a caracterização química da amostra, que foi realizada em conformidade com a NBR 12653:2015 [11], trazendo os ensaios de análise química - método de arbitragem - NBR NM 22:2012 [20], análise química - determinação de anidrido sulfúrico NBR NM 16:2012 [18], determinação do teor de umidade NBR NM 24:2002 [21] (lembrando que não se foi utilizada a NBR 17051:2022 pois o ensaio foi realizado no final de 2021 e, essa nova norma entrou em vigor em 30 de junho de 2022), determinação de perda ao fogo NBR NM 18:2012 [19] e determinação do teor de álcalis disponíveis NBR NM 25:2003 [22].

Os parâmetros exigidos de acordo com a classe do material pozolânico garantiriam o aumento da resistência à compressão e a flexão em idades avançadas, a redução da porosidade e permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos, aumento da resistência à íons de cloreto, mitigação da reação álcali-agregado, redução da ocorrência de eflorescências e aumento da resistividade elétrica. Entretanto, apesar de o material estudado (classe E) não estar dentro de todos os parâmetros químicos exigidos pela norma, para que seja garantida tais características, foi ensaiado e mapeado uma superfície de resposta buscando verificar quais impactos traria para o concreto estudado.

5.2. Abatimento de tronco de cone (Slump Test)

A Figura 6 apresenta os valores (respostas) do parâmetro de abatimento do tronco de cone (slump test) dos corpos de prova para cada teor de substituição.

Figura 6 - Resultado de Slump teste



Fonte: autor (2022)

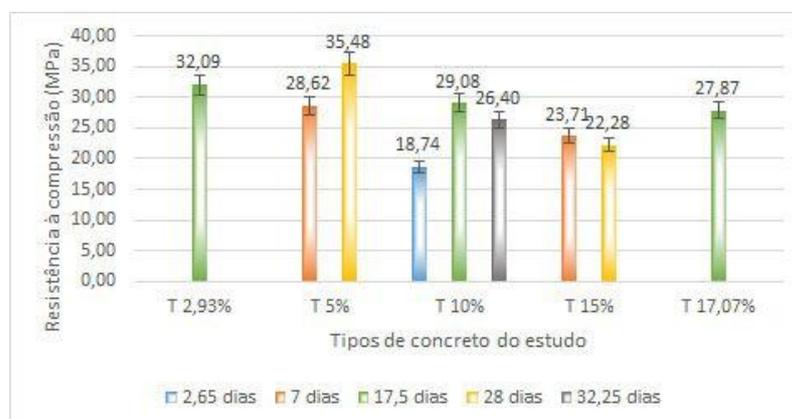
Estatisticamente o slump teste seguiu um padrão em que apresenta uma diminuição de sua trabalhabilidade até o percentual de 15% de substituição, onde desceu sua trabalhabilidade até 6,7cm, conforme pode-se ver pelo gráfico. A partir do percentual de 15% pôde-se observar um aumento de sua trabalhabilidade devido ao traço de 17,07% de substituição apresentar uma trabalhabilidade de 8,4cm, onde teve uma variação de 4,1cm em relação ao traço de 15% de substituição. Contudo, isso pode ser explicado devido a diminuição do calor de hidratação, oriunda da maior adição de cinza neste traço.

Essa diminuição da trabalhabilidade do concreto também pode ser justificada pela finura da cinza, que foi apresentada pela sua granulometria a laser, onde materiais finos costumam ter superfície específica maior, absorvendo assim, mais água na hora das reações de endurecimento do concreto.

5.3. Resistência à compressão

A Figura 7 apresenta os valores (respostas) do parâmetro de resistência à compressão simples dos corpos de prova após os respectivos períodos de cura.

Figura 7 - Resultado dos ensaios de Resistência à compressão



Fonte: autor (2022)

Observando-se a Figura 7, pode-se constatar que o T5% aos 28 dias de idade foi o traço que obteve maior resistência a compressão, dentro das análises da pesquisa. Contudo, é importante destacar que o T 2,93% apresentou resistência satisfatória com idade inferior ao T 5%, o que nos leva a entender que os traços com menores teores de substituição independentemente da idade obtiveram melhor desempenho na variável resposta de resistência a compressão, pois logo atrás do T 5% e do T 2,93%, podemos observar o T10% com 29,08 MPa.

Nota-se, observando as barras representadas na Figura 7, que as resistências tendem a reduzir-se com o aumento da substituição do cimento por cinza, que pode ser justificado pela quantidade insuficiente de água para molhar todo o aglomerante, visto que a pozolana é mais fina e apresenta uma maior superfície específica ou então por não haver hidróxido de cálcio suficiente para formação de mais CSH com a reação pozolânica [52], resultantes da reação derivada do cimento [39], que é a ponte de ligação entre o aglomerado e aglomerante e, deixando sua eficiência apenas em baixos teores de substituição.

Vale lembrar que com a visualização dos resultados da Figura 7, esses concretos produzidos podem ser utilizados para fins estruturais, pois de acordo com a tabela 7.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) [4], concretos estruturais devem ter uma resistência mínima de 20 MPa e, dentre os concretos estudados o que apresentou menor resistência foi o traço com 10% de substituição aos 2,65 dias com uma resistência de 18,74 MPa, que apesar de estar abaixo de 20 MPa, se enquadra totalmente dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma, uma vez que essa resistência de 20 Mpa são para concretos aos 28 dias.

5.3.1. Função de regressão

A análise dos ensaios foi executada pelo software Protimiza Experimental da qual considerou para a resistência a compressão um p-valor de 0,05, resultando em 95% de confiabilidade. Entretanto, como pode se observar na Figura 8, o valor de $X_1 \cdot X_2$ está maior do que o nível de significância recomendado, porém, ele foi considerado pelo cálculo devido ajustar melhor o modelo no cálculo da ANOVA, que verifica se as médias são iguais ou não estatisticamente, por resultar em um R^2 maior, que explica a variação do modelo e, por a função de regressão ainda se encaixar dentro do limite estabelecido de 95% de confiabilidade.

Figura 8 - Variáveis independentes da regressão da resistência à compressão

Regressão					
	Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
<input type="checkbox"/>	Média	29,80	1,04	28,70	0,0000
<input checked="" type="checkbox"/>	x_1	-3,01	0,87	-3,44	0,0137
<input type="checkbox"/>	x_1^2				
<input checked="" type="checkbox"/>	x_2	2,03	0,87	2,33	0,0589
<input checked="" type="checkbox"/>	x_2^2	-3,17	0,99	-3,19	0,0189
<input checked="" type="checkbox"/>	$x_1 \cdot x_2$	-2,07	1,24	-1,68	0,1446

$Y_1 = 29,80 - 3,01 x_1 + 2,03 x_2 - 3,17 x_2^2 - 2,07 x_1 x_2$

Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Na Figura 8 observa-se a função de regressão obtida, em que leva em consideração tanto o teor de substituição quanto o tempo de cura do concreto, mostrando que ambas as variáveis têm influência direta na resposta de resistência à compressão.

Através das análises dos coeficientes de regressão pode-se visualizar que a porcentagem de variação explicada pelo modelo (R^2) foi de 83,44% e que a significância da função está em 98,51% (p-valor = 0,01591), conforme elencado na Figura 9.

Figura 9 - ANOVA da regressão da resistência à compressão

ANOVA					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	184,7	4	46,2	7,6	0,01591
Resíduos	36,7	6	6,1		
Falta de Ajuste	28,5	4	7,1	1,7	0,39693
Erro Puro	8,2	2	4,1		
Total	221,4	10			

$R^2 = 83,44\%$

Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Os resultados do planejamento estatístico demonstraram que, de uma forma geral, as duas variáveis independentes (teor de substituição e tempo de cura) contribuíram para uma melhora na resistência à compressão.

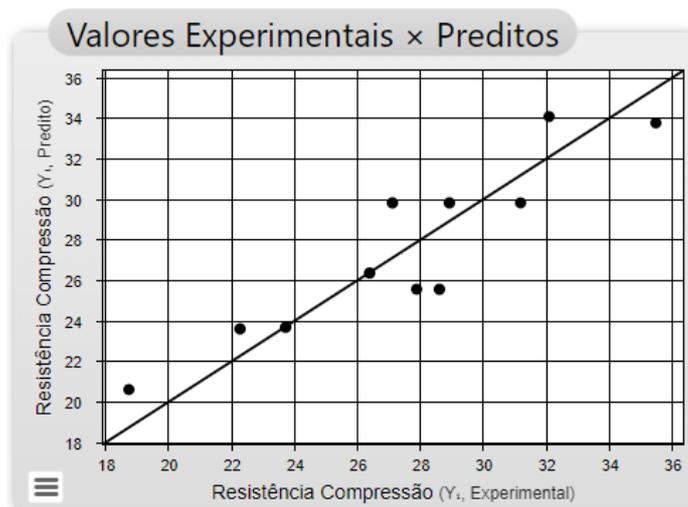
5.3.2. Diagrama de dispersão

Quando se deseja avaliar a relação entre elementos, o diagrama de dispersão é

usado, excelente representação que indica o vínculo entre duas variáveis quantitativas (FERREIRA, 2015) [40].

Para análise das variáveis elencadas na pesquisa, utilizou-se o diagrama de dispersão, evidenciado na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de dispersão da resistência à compressão



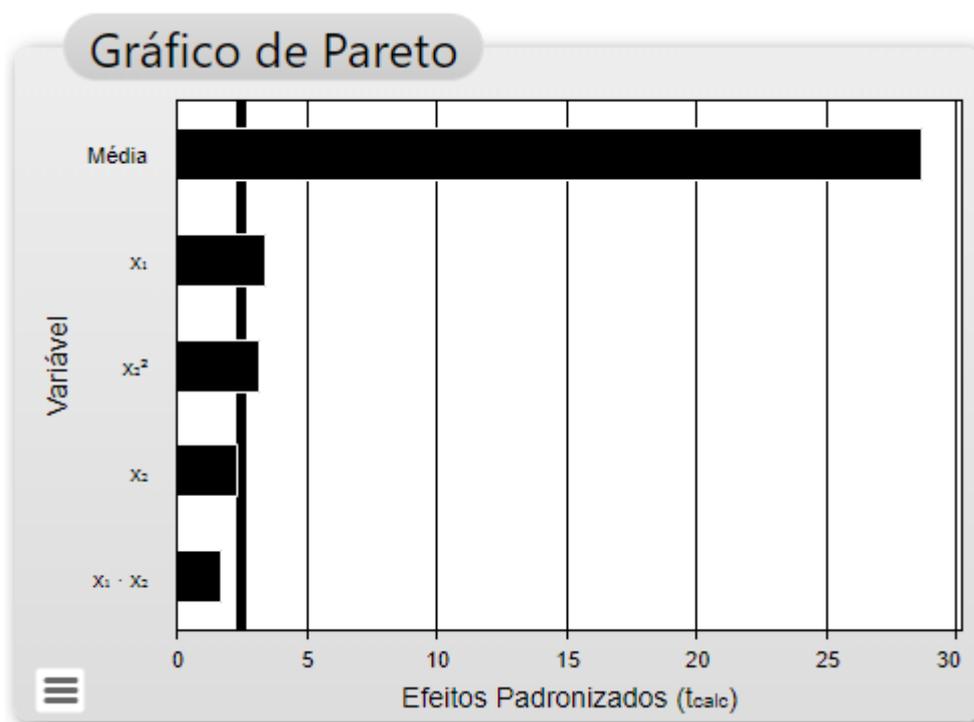
Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Através da Figura 10 foi possível traçar uma linha de tendência em relação aos dados obtidos na pesquisa. O relacionamento entre variáveis indica que tipo de consequência a alteração em uma variável do sistema acarreta na outra. Percebe-se que na representação os eixos vertical e horizontal comportam cada qual uma variável de análise, verificando ao final, o padrão evidenciado, onde foi possível interpretar e obter correlações positivas, pois a medida que a variável x aumenta a y também aumenta.

5.3.3. Gráfico de Pareto

Para se constatar atividades de alto impacto em um procedimento experimental ou qualquer tipo de trabalho, visando obter excelentes resultados devido à concentração de esforços nestas poucas atividades, utilizamos o gráfico de Pareto, conforme elencado na Figura 12.

Figura 11 - Gráfico de Pareto da resistência à compressão



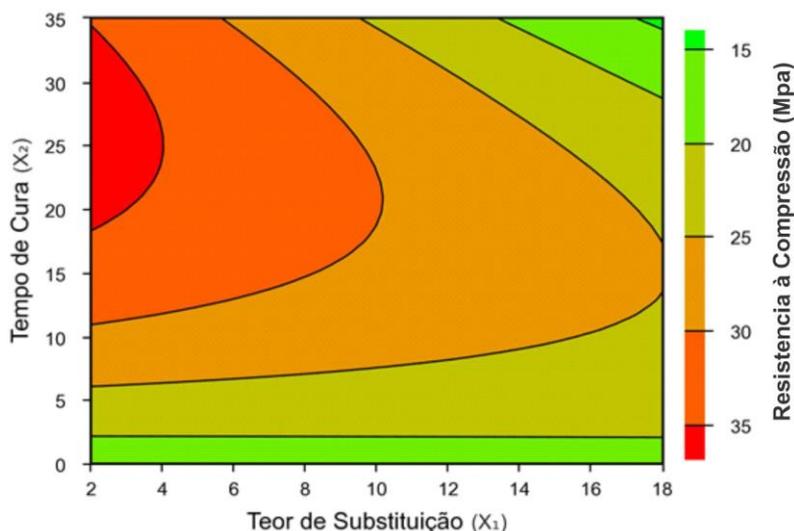
Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Observando a Figura 11, pode-se concluir que o coeficiente do modelo de maior relevância para a resistência à compressão é o Teor de Substituição (X_1) com nível de significância de 99%, seguido pelo Tempo de Cura ao quadrado (X_2^2) com significância de 98% e o Tempo de Cura (X_2) com 95% de significância, para o coeficiente. Vale lembrar que também temos o Teor de Substituição pelo Tempo de Cura ($X_1 \cdot X_2$), com significância de 85,55%, que apesar de não ser tão representativo quanto os demais índices, foi deixado dentro da curva de regressão por melhor ajustar o modelo de cálculo da ANOVA, ajustando a linha de regressão mais próxima dos dados reais e por permanecer com o modelo de regressão dentro do p-valor de 0,05.

5.3.4. Superfície de resposta

A Figura 12 mostra mais uma vez o que foi demonstrando com os resultados dos rompimentos à compressão, em que as resistências tendem a reduzir com o aumento da substituição do cimento por cinza, deixando sua melhor performance nos teores com até 4% de substituição e para idades mais avançadas.

Figura 12 - Gráfico de superfície de resposta da resistência à compressão

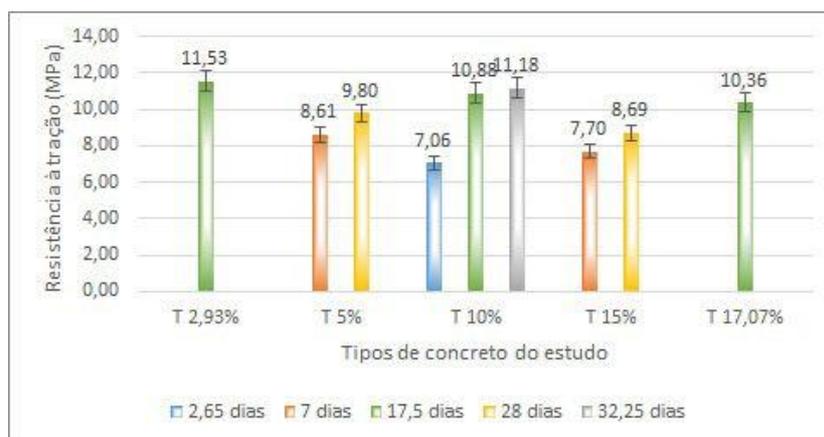


Portanto, a partir da análise da Figura 12, chegou-se à conclusão de que o teor de substituição do cimento pela cinza e o tempo de cura tem grande influência na resistência à compressão, sendo que idades primárias e teores maiores de substituição não possuem tanta efetividade.

5.4. Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 13 apresenta os valores (respostas) do parâmetro de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova após os respectivos períodos de cura.

Figura 13 - Resultado de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: autor (2022)

Observando-se a Figura 13, pode-se constatar que o T 2,93% aos 17,5 dias de idade foi o traço que obteve maior resistência a compressão, dentro das análises da pesquisa. Contudo, é importante destacar que o T 10% apresentou resistência satisfatória

com idade muito superior ao T 2,93%, o que nos leva a entender que os traços com maiores teores de substituição em idades mais avançadas podem obter desempenho igual aos traços com menor substituição, pois logo atrás do T 2,93% e do T 10% temos o T 17,07% com 10,36 MPa.

Nota-se, observando as barras representadas na Figura 13, que as resistências tendem a serem maiores nas idades intermediárias, sendo pouco efetivas em idades primárias, além de que o aumento da substituição do cimento por cinza, traz uma leve diminuição das resistências em idades mais avançadas. Esse fenômeno evidenciado pode ser justificado pela quantidade insuficiente de água para molhar todo o aglomerante, visto que a pozolana é mais fina e apresenta uma maior superfície específica ou então por não haver hidróxido de cálcio suficiente para formação de mais CSH com a reação pozolânica [52], resultantes da reação derivada do cimento [39], que é a ponte de ligação entre o aglomerado e aglomerante e, deixando sua eficiência apenas em baixos teores de substituição.

5.4.1. Função de regressão

A análise dos ensaios foi executada pelo software Protimiza Experimental da qual considerou para a resistência à tração por compressão diametral um p-valor de 0,05, resultando em 95% de confiabilidade. Entretanto, como pode se observar na Figura 14, o valor de X_1 está maior do que o nível de significância recomendado, porém, ele foi considerado pelo cálculo devido ajustar melhor o modelo no cálculo da ANOVA, que verifica se as médias são iguais ou não estatisticamente, por resultar em um R^2 maior, que explica a variação do modelo e, por a função de regressão ainda se encaixar dentro do limite estabelecido de 95% de confiabilidade.

Figura 14 - Variáveis independentes da regressão da resistência à tração por compressão diametral

Regressão					
	Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
<input type="checkbox"/>	Média	10,60	0,42	25,26	0,0000
<input checked="" type="checkbox"/>	x_1	-0,46	0,35	-1,30	0,2345
<input type="checkbox"/>	x_1^2				
<input checked="" type="checkbox"/>	x_2	1,00	0,35	2,83	0,0252
<input checked="" type="checkbox"/>	x_2^2	-1,13	0,40	-2,80	0,0264
<input type="checkbox"/>	$x_1 \cdot x_2$				

$$Y_2 = 10,60 - 0,46 x_1 + 1 x_2 - 1,13 x_2^2$$

Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Na Figura 14 observa-se a função de regressão obtida, em que leva em consideração tanto o teor de substituição quanto o tempo de cura do concreto, mostrando que ambas as variáveis têm influência direta na resposta de resistência à compressão, porém, mostra também que o tempo de cura (X_2) tem maior expressão na obtenção da resposta (resistência à tração por compressão diametral).

Através das análises dos coeficientes de regressão pode-se visualizar que a porcentagem de variação explicada pelo modelo (R^2) foi de 71,52% e que a significância da função está em 97,47% (p-valor = 0,02530), conforme observado na Figura 15.

Figura 15 - ANOVA da regressão da resistência à tração por compressão diametral

ANOVA					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	17,5	3	5,8	5,9	0,02530
Resíduos	7,0	7	1,0		
Falta de Ajuste	5,8	5	1,2	1,9	0,38287
Erro Puro	1,2	2	0,6		
Total	24,5	10			

$R^2 = 71,52\%$

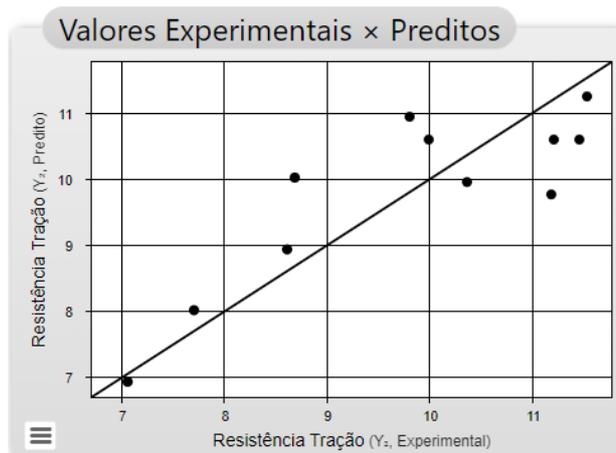
Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Os resultados do planejamento estatístico demonstraram que, de uma forma geral, as duas variáveis independentes (teor de substituição e tempo de cura) contribuíram para uma melhora na resistência à tração por compressão diametral, sendo que o tempo de cura tem maior expressão na obtenção dessa resposta.

5.4.2. Diagrama de dispersão

Para analisar a relação entre as variáveis elencadas na pesquisa, utilizou-se o diagrama de dispersão para indicar o vínculo entre duas variáveis quantitativas, evidenciado na Figura 16.

Figura 16 - Diagrama de dispersão da resistência à tração por compressão diametral



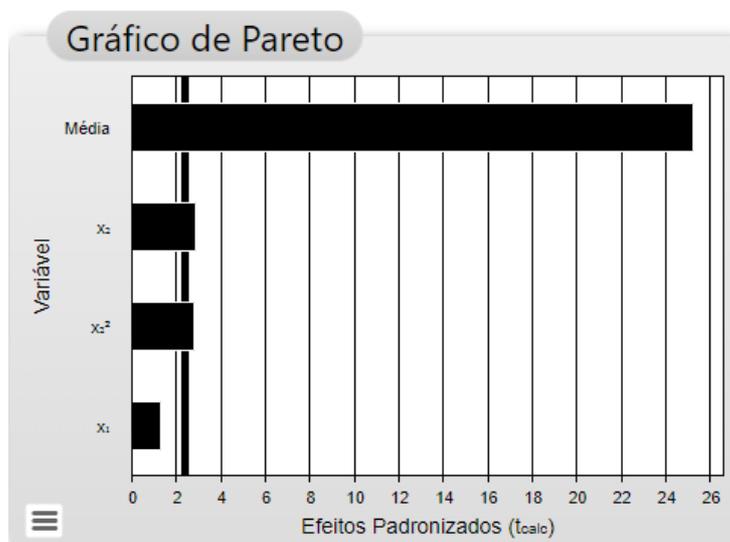
Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

NA Figura 16 foi possível traçar uma linha de tendência em relação aos dados obtidos na pesquisa, em que o relacionamento entre variáveis indica que tipo de consequência a alteração em uma variável do sistema acarreta a outra. Na representação os eixos vertical e horizontal comportam cada qual uma variável de análise, verificando ao final o padrão evidenciado, que para a Figura 16, se tem correlações positivas, pois a medida que a variável x aumenta a y também aumenta.

5.4.3. Gráfico de Pareto

Foi utilizado o gráfico de Pareto para evidenciar melhor as atividades de alto impacto, concentrando esforços nas poucas atividades que mais importam, conforme elencado na Figura 17.

Figura 17 - Gráfico de Pareto da resistência à tração por compressão diametral



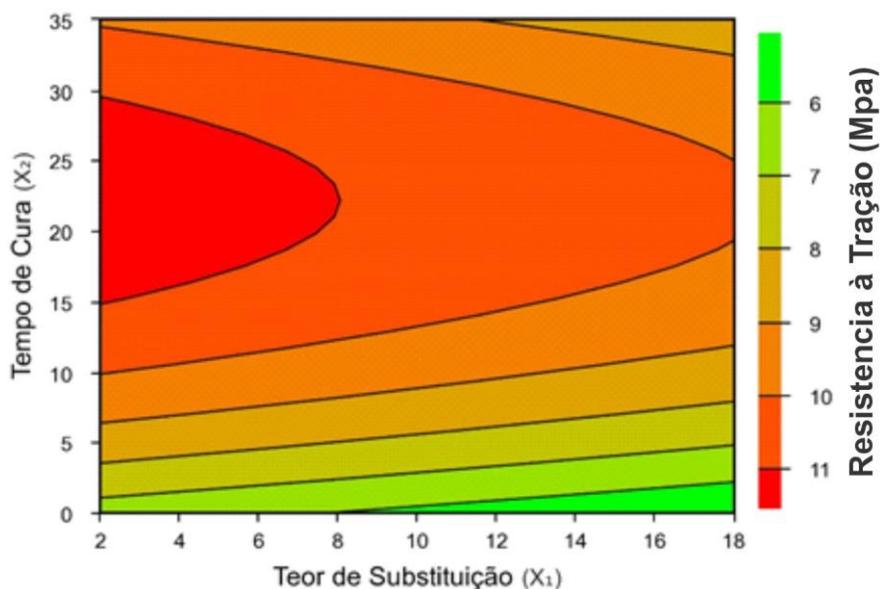
Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

A Figura 17 permite concluir que o coeficiente do modelo de maior relevância para a resistência à tração por compressão diametral é o Tempo de Cura (X_2) com nível de significância de 97,48%, seguido pelo Tempo de Cura ao quadrado (X_2^2) com significância de 97,36%, para o coeficiente. Vale lembrar que também temos o Teor de Substituição (X_1), com significância de 76,50%, que apesar de não ser tão representativo quanto os demais índices, foi deixado dentro da curva de regressão por melhor ajustar o modelo de cálculo da ANOVA, ajustando a linha de regressão mais próxima dos dados reais e por permanecer com o modelo de regressão dentro do p-valor de 0,05.

5.4.4. Superfície de resposta

A Figura 18 mostra mais uma vez o que foi demonstrando com os resultados dos rompimentos à tração por compressão diametral, em que as resistências tendem a serem maiores nas idades intermediárias e finais, sendo pouco efetivas em idades primárias, além de que o aumento da substituição do cimento por cinza, traz uma leve diminuição das resistências em idades mais avançadas.

Figura 18 - Gráfico de superfície de resposta da resistência à tração por compressão diametral



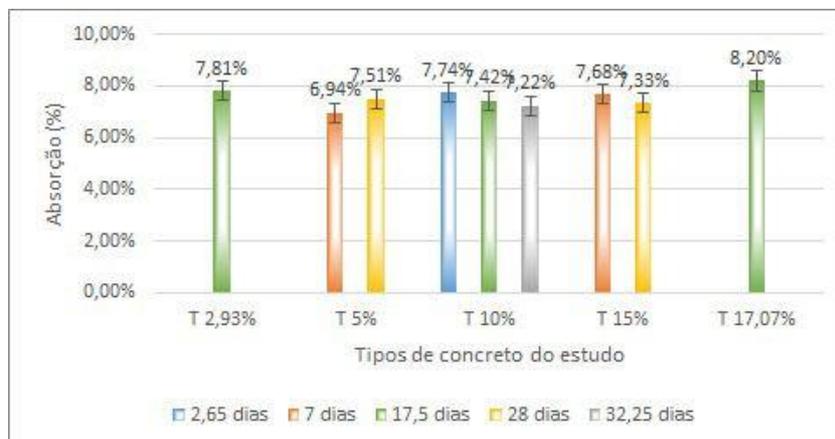
Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Portanto, a partir da análise da Figura 18, chegou-se à conclusão de que o teor de substituição do cimento pela cinza não tem tanta influência na resistência à tração por compressão diametral, mas o tempo de cura impacta bastante em seus valores, sendo mais efetivos em idades intermediárias e finais.

5.5. Absorção água por imersão dos corpos de prova

A Figura 19 apresenta os valores (respostas) do parâmetro de absorção de água dos corpos de prova após os respectivos períodos de cura.

Figura 19 - Resultado de absorção água por imersão dos corpos de prova



Fonte: autor (2022)

A partir da Figura 19, pode-se constatar que o T 17,07% aos 17,5 dias de idade foi o traço que obteve maior absorção de água dentro das análises da pesquisa. Contudo, é importante destacar que o T 2,93% apresentou uma alta absorção com a mesma idade do T 17,07%, entretanto, o T 10% aos 17,5 dias já apresenta uma absorção intermediária, o que nos leva a entender que o tempo de cura tem certa influência na absorção, mas não deixa completamente clara qual é sua representatividade.

Nota-se, observando as barras representadas na Figura 21, que as absorções não possuem um padrão bem definido do que influência e não influência em seu resultado, deixando essa definição para análises mais profundas, conforme foi apresentado nos tópicos seguintes.

5.5.1. Função de regressão

A análise primária dos ensaios de absorção considerou um p-valor de 0,05, resultando em 95% de confiabilidade, entretanto, devido não possuir nenhum dos parâmetros dentro dessa faixa de 95% ($\alpha = 5\%$), como pode se observar na Figura 20, adotou-se um p-valor de 0,10, do qual resulta em 90% de confiabilidade.

Figura 20 - Variáveis independentes da regressão da absorção água por imersão dos corpos de prova

Regressão					
	Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
<input type="checkbox"/>	Média	7,36	0,12	61,57	0,0000
<input checked="" type="checkbox"/>	x_1	0,14	0,10	1,38	0,2098
<input checked="" type="checkbox"/>	x_1^2	0,22	0,11	1,89	0,1013
<input type="checkbox"/>	x_2				
<input type="checkbox"/>	x_2^2				
<input checked="" type="checkbox"/>	$x_1 \cdot x_2$	-0,23	0,14	-1,62	0,1501

$Y_3 = 7,36 + 0,14 x_1 + 0,22 x_1^2 - 0,23 x_1 x_2$

Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Mesmo fazendo a mudança do grau de confiabilidade estatística da amostra, para esse novo modelo adotado, apenas 1 variável se encaixaria, forçando um pouco os resultados, pois apresentou-se com um p-valor de 0,1013, estando também acima do valor limite de 10%, conforme demonstrado na Figura 20.

Para a continuidade da pesquisa e uma forma de demonstrar a influência de cada parâmetro dentro da variável dependente (resposta), foi considerado o X_1^2 , com significância de 89,87%, o $X_1 \cdot X_2$, com significância de 84,99% e o X_1 com 79,02%.

Através das análises dos coeficientes de regressão pode-se visualizar que a porcentagem de variação explicada pelo modelo (R^2) foi de apenas 53,57%, sendo um valor muito baixo para representar uma função de regressão, além de que a significância da função foi apenas de 87,33% (p-valor = 0,12669), encontrando-se fora do valor de referência e, portanto, não podendo representar estatisticamente a amostra, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 - ANOVA da regressão da absorção água por imersão dos corpos de prova

ANOVA					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	0,7	3	0,2	2,7	0,12669
Resíduos	0,6	7	0,1		
Falta de Ajuste	0,5	5	0,1	1,7	0,41698
Erro Puro	0,1	2	0,1		
Total	1,2	10			

$R^2 = 53,57\%$

Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

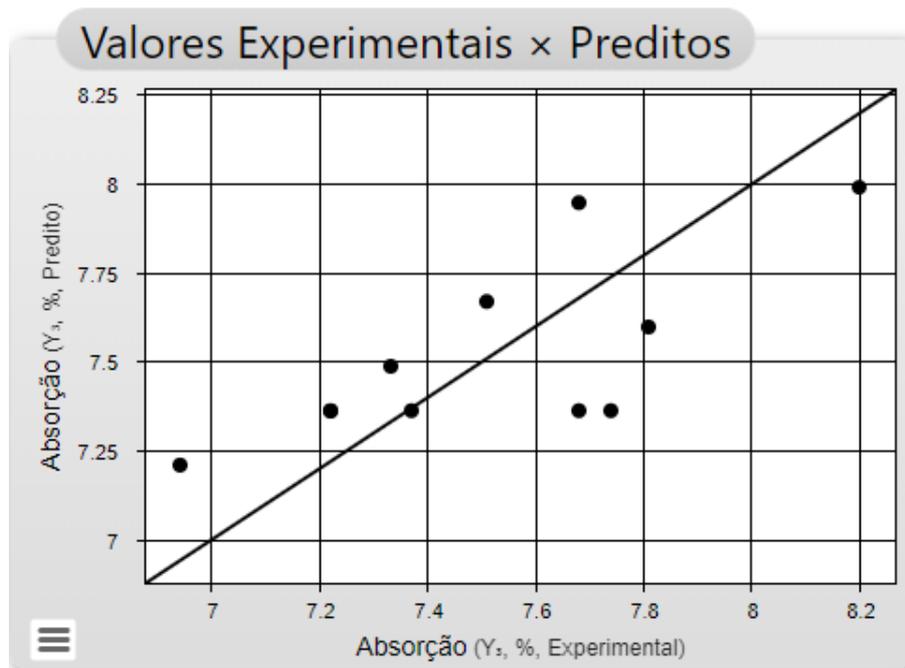
Os resultados do planejamento estatístico demonstraram que, de uma forma

geral, essa resposta (absorção) não possui correlação com as variáveis estudadas (teor de substituição e tempo de cura), uma vez que se encontram fora do nível de significância das variáveis independentes e da função de regressão, além, de que elas não conseguem explicar o modelo com um valor significativo (R^2), estando próximo apenas de 50% de representatividade e, isto mostra mais uma vez que esse modelo não pode ser utilizado para a explicação da absorção de água considerando tais parâmetros.

5.5.2. Diagrama de dispersão

O diagrama de dispersão indica o vínculo entre duas variáveis quantitativas, ajustando a reta de regressão aos dados reais do sistema, conforme evidenciado na Figura 22.

Figura 22 - Diagrama de dispersão da absorção água por imersão dos corpos de prova



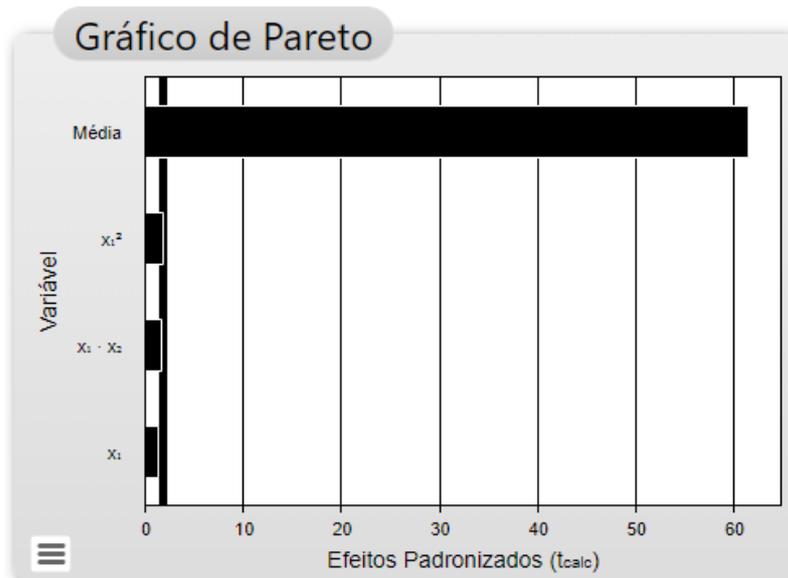
Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Após observação da Figura 22 foi possível traçar uma linha de tendência em relação aos dados obtidos na pesquisa e, verificar que a reta se apresenta muito longe dos dados reais do estudo, não sendo tão significativa para representar esse modelo e, conforme citado no tópico anterior, sendo explicada/influenciada pelos resíduos e não pela regressão.

5.5.3. Gráfico de Pareto

Buscando as variáveis mais importantes do processo, utilizou-se o gráfico de Pareto, que para esse caso, adotou uma significância de 90% ($\alpha = 10\%$), conforme apresentado pela Figura 23.

Figura 23 - Gráfico de Pareto da absorção água por imersão dos corpos de prova



Fonte: Protimiza Experimental Design, (2022).

Partindo da Figura 23, pode-se concluir que nenhuma das variáveis estudadas possui significância para o coeficiente do modelo, não ajustando o modelo de cálculo da ANOVA, não ajustando a linha de regressão mais próxima dos dados reais e não permanecendo com o modelo de regressão dentro do p-valor de 0,10. Para tanto, não é possível fornecer uma superfície de resposta para o modelo pois os dados apresentados não são válidos estatisticamente.

5.6. Comparativo dos resultados do DCCR

A Tabela 10 apresenta o comparativo dos valores (respostas) para cada um dos pontos do delineamento experimental realizado, mostrando o impacto de cada uma das variações.

Tabela 10 - Parâmetros de estudo do planejamento experimental

ENSAIO	Nº ENSAIO	Teor de Substituição (%)	Tempo de Cura (dia)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Absorção de Água (%)
Ensaio nos	1	5	7	28,62	8,61	6,94
	2	15	7	23,71	7,7	7,68

pontos fatoriais	3	5	28	35,48	9,8	7,51
	4	15	28	22,28	8,69	7,33
Ensaio nos pontos axiais	5	2,93	17,50	32,09	11,53	7,81
	6	17,07	17,50	27,87	10,36	8,2
	7	10	2,65	18,74	7,06	7,74
	8	10	32,35	26,4	11,18	7,22
Ensaio nos pontos centrais	9	10	17,50	28,94	9,99	7,68
	10	10	17,50	31,17	11,21	7,37
	11	10	17,50	27,13	11,45	7,22

Fonte: autor (2022)

Como se pode observar, para resistência à compressão, tanto o teor de substituição do cimento pela cinza quanto o tempo de cura possuem grande influência na variação dos resultados, já a resistência à tração, possui grande influência do tempo de cura, mas nem tanta do teor de substituição do cimento pela cinza e, por fim, a absorção, possui pouca ou nenhuma influência de ambas as variáveis, uma vez que possui resultados muito aleatórios e o delineamento não foi estatisticamente viável para explicação dessa resposta.

6. CONCLUSÕES

Com a caracterização dos materiais utilizados foi possível a elaboração da dosagem correta para o concreto, o qual permitiu a verificação das características no estado fresco e endurecido, possibilitando o mapeamento da influência do teor de substituição e do tempo de cura para cada uma das respostas da pesquisa.

Apesar da cinza estudada não se encaixar dentro de todos os parâmetros solicitados pela NBR 12653, apresentou resultados satisfatórios para resistência, trabalhabilidade e absorção.

Obteve-se a superfície de resposta da resistência à compressão e à tração, mapeando sua abrangência em teores de substituição entre 2% e 18% e o tempo de cura do concreto entre 0 e 35 dias, pegando desde idades primárias até idades avançadas (finais), otimizando a escolha das melhores combinações para poder se atingir os melhores resultados.

De acordo com toda a pesquisa, se determinou que o traço que apresentou a melhor otimização foi o de teor de substituição de 2,05% e tempo de cura de 26,20 dias, uma vez que ao se falar em concreto buscamos sua melhor resistência à compressão, a qual obteve-se $36,82 \pm 2,58$ MPa.

Portanto, os resultados alcançados mostram mais uma vez que a substituição parcial do cimento é uma alternativa que além de sustentável, para o problema do fator clínquer (poluição gerada pela fabricação do cimento), é também uma alternativa com grande viabilidade técnica, pois serve tanto para concreto convencional quanto concreto estrutural e ainda ajuda na redução de poluição, na redução de consumo de materiais não renováveis e faz a reinserção de materiais na cadeia produtiva.

7. REFERÊNCIAS

- [1] _____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- [2] _____. **NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015.
- [3] _____. **NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.
- [4] _____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- [5] _____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2019.
- [6] _____. **NBR 7213: Agregados leves para concreto isolante térmico**. Rio de Janeiro, 2013.
- [7] _____. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019. 59
- [8] _____. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- [9] _____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
- [10] _____. **NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.
- [11] _____. **NBR 12653. Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015.
- [12] _____. **NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm**. Rio de Janeiro, 2010.

[13] _____. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

[14] _____. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

[15] _____. **NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

[16] _____. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

[17] _____. **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021.

[18] _____. **NBR NM 16: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico.** Rio de Janeiro, 2012.

[19] _____. **NBR NM 18: Cimento Portland – Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

[20] _____. **NBR NM 22: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem.** Rio de Janeiro, 2012.

[21] _____. **NBR NM 24: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2003.

[22] _____. **NBR NM 25: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis.** Rio de Janeiro, 2003.

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

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

- [25] Acomp. safra bras. cana, v. 4 - Safra 2017/18, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-73, abril 2018. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 01 fev. 2021.
- [26] ALVES, G. P. **Planejamento de Experimentos**. 1. ed. Indaial: UNIASSELV, 2019. 212 p.
- [27] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. State-of-the-artreport on high-strength concrete, ACI 363R-92 (Reapproved 1997). **ACI Manual of Practice 2001**. ACI, Detroit (USA), 2001. 18p.
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Portland Cement. C150/ C150M, ASTM, Pennsylvania, 2018.
- [29] ANICER. **Dados oficiais**. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/>>. Acesso em: 24 set. 2022.
- [30] BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2001. 289 p.
- [31] BATTAGIN, A. F., “Cimento Portland”. In: ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ipsis, v.1, pp. 185-232, 2011.
- [32] BIOMASSABR. **O que é Biomassa - Saiba mais sobre Biomassa a energia do presente brasileiro e mundial**. Disponível em: <<http://www.biomassabr.com/bio/biomassabr.asp>>. Acesso em: 24 set. 2022.
- [33] BRASIL, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). European Commission, (1996).
- [34] CARASEK, H. et al. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 3, p. 714–732, set. 2016.
- [35] CHAVES, A. T. C. A. **Otimização do processo de biodiesel etílico do óleo de girassol (*Helianthus annuus*) aplicando um delineamento composto central**

rotacional (DCCR). 2008. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, UFPB/CCE, Paraíba, 2008.

[36] CORDEIRO, G. C., **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 485 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia Ambiental) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

[37] DEMIS, S.; TAPALI, J. G.; PAPADAKIS, V. G. An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 291–300, out. 2014.

[38] ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: O caso dos pellets de madeira**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.

[39] FERNANDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 1, p. 113–122, jan. 2011.

[40] FERREIRA, V. **Estatística básica**. Rio de Janeiro: SESES, 2015.

[41] Fundação Nacional da Cerâmica FUNDACER. **Sustentabilidade**. Disponível em: <<http://fundacer.org.br/sustentabilidade-2/>>. Acesso em: 23 abr. 2022.

[42] GETAHUN, M. A.; SHITOTE, S. M.; GARIY, Z. C. A. Artificial neural network based modelling approach for strength prediction of concrete incorporating agricultural and construction wastes. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 517–525, nov. 2018.

[43] HAW, T. T. et al. Sustainable cementitious composites reinforced with metakaolin and halloysite nanotubes for construction and building applications. **Applied Clay Science**, v. 188, p. 105533, abr. 2020.

[44] IBGE. **Estimativa para a safra 2017**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/17171-em-setembro-ibge-preve-safra-de-graos-30-3-superior-a-2016.html>>. Acesso em: 11 out. 2021.

[45] IEMMA, A. F. & RODRIGUES, M. I. **Planejamento de experimentos &**

otimização de processos. 2 ed. Campinas: Cárita Editora, 2009. 326 p.

[46] KOCH, R. **O gestor 80/20.** São Paulo: Vogais, 2014.

[47] KRAEMER, M. E. P. Resíduos industriais e a questão ambiental associada à contabilidade aplicada ao ambiente natural. **Pensar Contábil**, v. 7, n. 30, p. 1-14, 2006.

[48] LOPES, G. DE A.; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. DE. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de são paulo. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 679–686, 20 jun. 2016.

[49] LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 405–418, 2008.

[50] MADANI HOSSEINI, M.; SHAO, Y.; WHALEN, J. K. Biocement production from silicon-rich plant residues: Perspectives and future potential in Canada. **Biosystems Engineering**, v. 110, n. 4, p. 351–362, 1 dez. 2011.

[51] MASILAMANI, D. et al. Sustainable packaging materials from tannery trimming solid waste: A new paradigm in wealth from waste approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 885–891, out. 2017.

[52] MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. 4. ed. **Lea's chemistry of cement and concrete.** 4. ed. New York: J. Wiley, 1998. p. 471-631.

[53] MATTIETTO, R. A.; MATTA, V. M. Utilização de um delineamento composto central rotacional para avaliação microbiológica de polpas de açaí pasteurizadas. **XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Buzios, RJ, p. 1-6, 11 set. 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/70610/1/2012-184.pdf>. Acesso em: 22 set. 2022.

[54] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Microestrutura, Propriedades e Materiais.** IBRACON. São Paulo, 2008.

[55] MEHTA, K.P., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2014.

[56] MELO, Thais Felipe de. **Gestão de resíduos sólidos: um estudo sobre grupos de influência no município de Piracicaba - SP.** 2012. 186 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

[57] MENDES, A. S. et al. Desenvolvimento de concretos leves para o Concrebol. **Revista Ibracon Concreto & Construções.** Ano XLIV, p. 84-90, 2017.

[58] MISSIO, A. L. et al. Propriedades mecânicas da madeira resinada de *Pinus elliottii*. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1432–1438, 14 abr. 2015.

[59] MONTGOMERY, D. **Introdução ao controle estatístico da qualidade.** Rio de Janeiro: LTC, 2017.

[60] NEVES, Idércio França Das. Materiais de construção: **Estudo de dosagem racional de concreto estrutural comum.** Pontifícia universidade católica do Paraná – Curitiba-PR. 2009.

[61] NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto - 5ª Edição.** [s.l.] Bookman Editora, 2015.

[62] OMRAN, A. et al. Field trials with concrete incorporating biomass-fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 660–669, out. 2018.

[63] PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

[64] SALES, Caroline Pessôa. **Produção e caracterização de cinza de capim elefante com vistas à sua aplicação como pozolana.** 2012. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2012.

[65] SATA, V. et al. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 94–100, jan. 2012.

- [66] SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, dez. 2018.
- [67] SETIC-UFSC. Materioteca Cimento. Disponível em: <<https://materioteca.paginas.ufsc.br/files/2016/09/ACV-cimento.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2022.
- [68] SETIC-UFSC. Materioteca Sustentável. Disponível em: <<https://materioteca.paginas.ufsc.br/cimento/#:~:text=Fonte%3A%20WBCSD%20%E2%80%93%20CSI%20%2C%202012.&text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20cimento%20consome>>. Acesso em: 24 abr. 2022.
- [69] TORKAMAN, J.; ASHORI, A.; MOMTAZI, A. S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 432–436, jan. 2014.
- [70] VAN RUIJVEN, B. J. et al. Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 15–36, set. 2016.
- [71] VASKE, N. R.. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 2012. 325 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2012.
- [72] WALGER, J. **O concreto é o segundo material mais consumido no mundo**. Disponível em: <<https://www.tetrisej.com.br/single-post/concreto>>. Acesso em: 24 abr. 2022.
- [73] WERKEMA, M. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1995.