

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

CRISTIANO AUGUSTO MANHÃES SILVEIRA

**APLICAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL PARA A AVALIAÇÃO DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO
AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO**

VOLTA REDONDA

2016

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**APLICAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL PARA A AVALIAÇÃO DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO
AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais Cerâmicos, linha de pesquisa em materiais Cerâmicos

Aluno:

Cristiano Augusto Manhães Silveira

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

VOLTA REDONDA

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

S587a Silveira, Cristiano Augusto Manhães.

Aplicação de um planejamento fatorial para a avaliação das propriedades mecânicas do concreto com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro. / Cristiano Augusto Manhães Silveira. - Volta Redonda: UniFOA, 2016.

70 p. : II

Orientador(a): Profº Dr. Sérgio Roberto Montoro

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2016

1. Materiais - dissertação. 2. Concreto. 3. Resíduo de vidro. I. Montoro, Sérgio Roberto. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Cristiano Augusto Manhães Silveira

**APLICAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL PARA A AVALIAÇÃO
DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO**

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

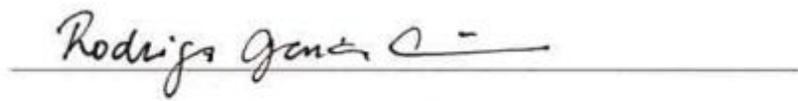
Banca Examinadora



Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro



Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral



Prof. Dr. Rodrigo Garcia Amorim

DEDICATÓRIA

Por toda a oportunidade me dada dedico aos meus pais, Braz Pedro da Silveira (*in memoriam*) e Isis Manhães Silveira, ao meu filho Cassiano Augusto Corrêa Silveira e a minha esposa Ana Paula Amorim Corrêa, pelo apoio e compreensão das ausências e momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Mestrado em Materiais MEMAT do UniFOA, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do MEMAT e aos técnicos de laboratório pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Aos Professores e em especial ao Orientador Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro, pelo apoio e dedicação no decorrer de nosso projeto e resultados obtidos.

RESUMO

Devido à crescente busca pela sustentabilidade e necessidade cada vez maior em se reduzir a extração de matérias primas e concomitantemente a reciclagem de produtos diversos, visando à preservação de nossas jazidas juntamente com o benefício ambiental na redução dos resíduos gerados. Objetivando se ganho econômico em todos os processos envolvidos propõe se um planejamento fatorial para a avaliação das propriedades mecânicas do concreto com substituição do agregado miúdo (areia) por resíduo de vidro.

Sendo o frete responsável por boa parte dos custos de produção desse produto final conciliou se a obtenção desse resíduo de vidro proveniente do processo de produção industrial onde há grande volume gerado de uma unidade fabril na região do Médio Paraíba Fluminense, adequando o grande mercado consumidor regional, com uma população de aproximadamente 1 milhão de habitantes.

Obteve se resultados que indicam grande viabilidade com uso desse rejeito na produção do concreto para uso estrutural, conseguindo chegar a resistências compatíveis comparados aos padrões normais de fabricação de concretos, aliando tanto o ganho econômico na redução de extração da areia e na destinação dos resíduos, diminuição dos custos com frete, quanto no ganho ambiental, mantendo nossas jazidas para as gerações vindouras.

Palavras-chave: Concreto, resíduo de vidro, resistência à compressão.

ABSTRACT

Due to the increasing search for sustainability and increasing need to reduce the extraction of raw materials and simultaneously the recycling of diverse products, aiming at the preservation of our deposits along with the environmental benefit in reducing the waste generated. The objective of this study was to determine if economic gain in all the processes involved proposes a factorial planning for the evaluation of the mechanical properties of the concrete with replacement of the small aggregate (sand) by glass residue.

Being the freight responsible for much of the production costs of this final product, it was agreed that the production of this glass residue from the industrial production process where there is a large volume generated from a manufacturing plant in the region of the Middle Paraíba Fluminense, adapting the large regional consumer market, With a population of approximately 1 million inhabitants.

Was obtained results that indicate high visibility with the use of this waste in the production of concrete for structural use, managing to reach compatible resistance compared to normal concrete manufacturing standards combining both economic gain in the sand extraction reduction and disposal of waste, decrease of freight costs, as the environmental gain, keeping pots deposits for future generations.

Keywords: Concrete, Glass residue, Compressive strength.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas**
- **UniFOA - Centro Universitário Oswaldo Aranha**
- **CP - Cimento Portland**
- **ARI - Alta Resistência Inicial**
- **RS - Resistente à Sulfetos**
- **S/R - Razão Sinal/Ruído**
- **ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland**
- **ASTM - American Society for Testing and Materials**
- **DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral - Ministério de Minas e Energia**
- **DOE - Design of Experiments**
- **ANOVA - Análise de Variância**
- **SQ - Soma dos Quadrados**
- **GL - Grau de Liberdade**
- **QM - Quadrado Médio**
- **MSR - Metodologia de Superfície de Resposta**
- **CA - Concreto Armado**

LISTA DE FIGURAS

- **Figura 1** - Localização do município de Porto Real em relação ao Estado do RJ e SP;
- **Figura 2** – Modelo Geral de um sistema de processo;
- **Figura 3** – Uma superfície tridimensional de resposta, mostrando o rendimento; esperado, como uma função da temperatura e da concentração de alimentação;
- **Figura 4** – Curvas de nível da superfície de resposta da Figura 3;
- **Figura 5** – Vista do depósito de rejeitos de vidro da empresa Guardian S.A.,
- **Figura 6** – Prensa utilizada nos ensaios de compressão;
- **Figura 7** – Corpos de prova após desmoldagem e ao fundo a prensa utilizada;
- **Figura 8** – Resultados comparativos de resistência à compressão dos resultados dos testes após 28 dias;
- **Figura 9** – Resultados dos ensaios de resistência à compressão para cada uma das famílias estudadas;
- **Figura 10** – Comparação dos resultados de resistência à compressão para cada uma das famílias estudadas;
- **Figura 11** – Comparação dos resultados de resistência à compressão nas famílias de concretos onde foi utilizada a mesma granulometria de vidro;
- **Figura 12** – Comparação dos resultados de resistência à compressão das famílias de concreto 1 e 3, onde foram utilizados um teor de vidro de 10%;
- **Figura 13** – Comparação dos resultados de resistência à compressão das famílias de concreto 2 e 4, onde foram utilizados um teor de vidro de 25%;
- **Figura 14** – Gráficos do tipo Boxplot evidenciando a resistência mecânica;
- **Figura 15** – Gráficos do tipo Interval Plot evidenciando a resistência;
- **Figura 16** – Histogramas da resistência mecânica em função do % vidro incorporado;
- **Figura 17** – Histogramas da resistência mecânica em função da granulometria
- **Figura 18** – Gráficos do efeito principal das variáveis investigadas (Main Effect Plot) evidenciando a resistência mecânica após 7 e 28 dias em função da granulometria;
- **Figuras 19 e 20** – Análises da variância dos efeitos individuais e combinado das variáveis investigadas nos resultados de resistência mecânica após 7 e 28 dias Respectivamente e gráficos do tipo Pareto dos efeitos padronizados evidenciando a contribuição de cada variável investigada e sua interação;

LISTA DE TABELAS

- **Tabela 1** – Exemplo de estrutura de tabela ANOVA;
- **Tabela 2** – Composição química do cimento CP III-40 RS da Votorantim;
- **Tabela 3** – Informações técnicas do cimento CP III-40 RS da Votorantim;
- **Tabela 4** – Características da areia natural e brita 1 NBR NM248;
- **Tabela 5** – Características da areia artificial – pó de vidro resultados obtidos em laboratório conforme NBR 7251;
- **Tabela 6** – Matriz ortogonal de experimentos de Taguchi L4;
- **Tabela 7** – Valores dos parâmetros estudados;
- **Tabela 8** – Características das famílias produzidas;
- **Tabela 9** – Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto;
- **Tabela 10** – Resultados dos ensaios de compressão em 7 dias;
- **Tabela 11**– Resultados dos ensaios de compressão em 28 dias;
- **Tabela 12** – Resumo dos Resultados dos ensaios de compressão.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
OBJETIVO	2
REVISÃO DA LITERATURA	3
Aplicações de resíduos de vidro	3.1
Concreto.....	3.2
Tipos de cimento.....	3.2.1
Cimento Portland Comum (CP I).....	3.2.1.1
Cimento Portland Composto (CP II).....	3.2.1.2
Cimento Portland de Alto-Forno (CP III).....	3.2.1.3
Cimento Portland Pozolânico (CP IV).....	3.2.1.4
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI).....	3.2.1.5
Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS).....	3.2.1.6
Agregados utilizados.....	3.2.2
Areia.....	3.2.2.1
Brita.....	3.2.2.2
PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	4
Método de Taguchi	4.1
Arranjo ortogonal	4.1.1
Razão sinal/ruído (S/R)	4.1.2
Análise de variância	4.1.3
Metodologia de superfície de resposta ou de contorno	4.2
MATERIAIS	5
Cimento	5.1
Resíduo de Vidro	5.2
Demais Insumos utilizados	5.3
CARACTERIZAÇÃO	6
Resíduo de vidro.....	6.1
Classificação Granulométrica	6.1.1
ARRANJO EXPERIMENTAL	7
RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	8

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	9
CONCLUSÕES.....	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11

1 INTRODUÇÃO

Devido a crescente corrente de sustentabilidade e reaproveitamento que se faz necessário aos dias atuais, se veem buscando alternativa para a diminuição na geração de resíduos na indústria em geral, motivado pelos elevados custos para segregação destes, e ao legado que permanecerá para as gerações vindouras, Passa-se por um processo de transformação onde tentamos adequar essa sustentabilidade aos processos produtivos em geral. Não diferente disso, a indústria de produção de vidros juntamente com a indústria da construção civil, somam uma importante cadeia produtiva e conseqüentemente são responsáveis por grandes consumos de matérias primas e altos índices de geração de resíduos em seus processos isoladamente. Com esse cenário, um desafio se apresenta para toda a humanidade, promover o desenvolvimento sustentável, reduzindo tanto o consumo de matéria prima quanto à geração de resíduos. Essa pesquisa visa fomentar a substituição de agregado miúdo em concreto ou argamassa de cimento e areia, por resíduo de vidro moído oriundo da indústria de vidros planos da região do médio Paraíba Fluminense. Vários estudos existem com esse objetivo de substituição, porém, regionalmente, devido à logística favorecida e abundância do material estudado tem se grande potencial de consumo, pois estamos localizados no meio do eixo Rio-São Paulo e em crescente desenvolvimento industrial, populacional e humano. Devido aos materiais convencionais utilizados para a produção do concreto não estarem disponíveis próximos ao local de produção, provocando um acréscimo substancial no custo de produção do concreto; principalmente devido à logística para aquisição e transporte. Deve se ressaltar, o risco ligado à produção de resíduos. Diante deste fomento, propõe-se a aplicação de um planejamento fatorial para a avaliação das propriedades mecânicas do concreto com substituição do agregado miúdo (areia), por resíduo de vidro.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste estudo envolve o ensaio experimental e estatístico para a avaliação das propriedades mecânicas do concreto com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro através do uso de uma matriz ortogonal de experimentos de Taguchi L_4 (metodologia criada por Genichi Taguchi na após a Segunda Guerra Mundial, onde os dados são inseridos em uma matriz ortogonal permitindo a otimização dos resultados e números de amostras do experimento) e pela Metodologia de Superfície de Resposta, com o auxílio do *software* estatístico *Minitab*[®]16, tendo como principal foco o estudo da influência do teor de vidro e sua granulometria na resistência à compressão dos concretos produzidos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aplicações de resíduos de vidro

Existem diversos resíduos gerados, porém o vidro assume um espaço saliente, já que sua produção anual no Brasil supera 800.000 toneladas, desses apenas cerca de 220 mil toneladas (27%), são alvos de algum tipo de reaproveitamento (CEMPRE, 2007).

O mais aplicável mercado para a sucata de vidro atualmente é formado pelas vidrarias, que compram o material de sucateiros na forma de cacos ou recebem o material diretamente em suas campanhas de reciclagem. Porém, a reciclagem de vidro tem vários fatores limitadores como custos de transporte proibitivos, impurezas e mistura de sucatas de cores diferentes que são difíceis de serem separadas.

Segundo o Conama (2007), o vidro é classificado como resíduo reciclável para outras destinações. Ele deverá ser reutilizado, reciclado ou encaminhado a áreas de armazenamento temporário, sendo disposto de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Na da indústria da construção civil, o processo de produção de concreto se apresenta com enorme potencial para englobar alguns tipos de resíduos. O uso de outros aditivos no concreto, na forma de agregados fino ou grosseiro já foi estudado por vários pesquisadores. Alguns desses materiais são adicionados com o objetivo de aumentar as características mecânicas dos concretos como a sílica, pó de basalto, escórias, misturas de materiais pozzolânicos, cinzas, etc. (BABU, PRAKASH, 1995). Outros simplesmente são incorporados à mistura para utilizar a capacidade de aprisionamento do concreto, que por sua vez pode estar destinada à diminuição da periculosidade do material agregado (adição de resíduos classe I) ou diminuição da quantidade de material destinado ao aterro (adição de diferentes tipos de produtos poliméricos) gerando custos adicionais para o armazenamento temporário e/ou definitivo, aumentando os custos de produção e conseqüentemente o valor do produto para o cliente final.

Existem países utilizando o vidro como agregado fino no concreto. Diversas pesquisas realizadas, como exemplo destacam se os estudos de Babu e Prakash (1995), Polley et al. (1998), de Shao et al. (2000) e. Onde Babu e Prakash pesquisaram o uso de vidro reciclado como substituto do agregado fino (areia) no

concreto obtendo resultados satisfatórios similares aos concretos tradicionais, já Polley e Shao pesquisaram o uso de sílica, vidro finamente moído e cinzas volantes, mas em substituição ao cimento, adicionados em proporções de até 30% em peso com tamanho de partícula abaixo de 0,15mm. Esses autores verificaram que o concreto produzido com a adição de vidro moído apresentou melhorias em suas propriedades mecânicas, como: resistência à compressão, flexão e tração; devido às reações pozolânicas. Para faixas mais grosseiras, o concreto produzido apresentava problemas de aumento de volume gerados pela reação álcali/sílica. Babu e Prakash (1995) constataram que o vidro pode influenciar a qualidade do concreto. (Just et al., 2011).

Constatou-se que o benefício da adição do vidro estava ligado à diminuição dos vazios entre os grãos do agregado fino (aumento do empacotamento das partículas), pois o efeito pozolânico acontece com vidros de granulometria fina (<75mm) partículas finas favorecem uma rápida e benéfica reação pozolânica. Para vidros com granulometria grosseira (>0,75mm), a reação álcali/sílica acontece preferencialmente. Devido ao aumento de vazios permitindo a penetração de umidade.

(Just et al., 2011)

Há exemplos da utilização de vidro em escala real, temos o exemplo do estado norte-americano de Nova York que apresenta recomendações para seu uso em concretos e ainda na Austrália que já faz uso do vidro moído proveniente do lixo em concretos para construção (CRENTSIL, et al., 2001 apud LÓPEZ, AZEVEDO, BARBOSA NETO, 2005).

Na Inglaterra, (Brunel University London) pesquisou-se sistematicamente as características dessa substituição em diversas proporções (0, 5, 15 e 20%), Obtendo resultados positivos nos ensaios de compressão, tração e resistência à flexão de concreto com teor de resíduos de vidro de 20% onde os mesmos aumentaram em 5,28%, 18,38% e 8,92%, respectivamente, em 28 dias. (Sadoon Abdallah, 2014).

Na Austrália, (School of Engineering, Deakin University), pesquisou-se buscando o percentual substitucional ótimo em relação à resistência à compressão. Três amostras de concreto foram testadas aos 7 e 28 dias, para proporções de 15, 20, 25, 30 e 40% de substituição do vidro. A resistência à compressão encontrado

aumentou-se a um nível de 30%, ponto em que a carga de ruptura foi de 9% e 6% mais elevada em relação ao controle após 7 e 28 dias, respectivamente. Isto demonstra que o concreto contendo até 30% de vidro fino desenvolveu maior resistência à compressão do que o concreto tradicional. (M. Adaway & Y. Wang, 2015)

Portanto visando a redução na geração de resíduos oriundos da produção de vidros, é proposto um estudo para a utilização de vidro moído na produção de concreto objetivando ganho tanto econômico na diminuição da extração de areia; como ambiental reutilizando material que era descartado na produção do vidro.

Enfatizou-se no conceito de mobilidade e redução de custos com transportes dos materiais, foi concedido pela indústria Guardian Vidros planos S.A. localizada em Porto Real (Figura 1). Têm-se a logística favorecida e abundância do material estudado e grande potencial de consumo, pois localizados no meio do eixo Rio - São Paulo e em crescente desenvolvimento industrial, populacional e humano.

Devido aos materiais convencionais utilizados para a produção do concreto nem sempre estarem disponíveis próximos ao local de produção e consumo, que é um item fundamental para a utilização do concreto, pois se têm um tempo limite de início de pega (NBR 11581 - Cimento Portland-Determinação dos tempos de pega), reduzindo a possibilidade de utilização de outras fontes do produto em função da relação distância/tempo.

Figura 1 - Localização do município de Porto Real em relação ao Estado do Rio e São Paulo.



Fonte: site- openclipart.org/detail/19920/mapa-do-rio-de-janeiro

O Mercado consumidor regional é amplo devido às várias indústrias presentes, como: CSN, PSA-Peugeot/Citröen, Volkswagen Caminhões, Nissan, Votorantim Siderurgia, Hyundai, Michelin; Jaguar/Land Rover; entre outras.

Esses grandes consumidores, representam juntamente com uma população de mais de um milhão de pessoas do Médio Paraíba das cidades: Angra dos Reis, Barra do Piraí, Barra Mansa, Itatiaia, Parati, Pinheiral, Piraí, Porto Real, Quatis, Resende, Rio Claro, Rio das Flores, Valença e Volta Redonda, sem contar as cidades paulistas que estão próximas e poderiam aumentar em mais 300% de consumo estimado. Portanto apresentam um promissor consumo sendo o concreto o segundo produto mais consumido do mundo ultrapassando sua utilização em uma tonelada por pessoa, esse material de suma importância para o desenvolvimento da construção civil, tem se tornando um vilão para o meio ambiente, devido a seu impacto, com diversos materiais que compõe. O concreto consome esses materiais no mesmo ritmo da sua utilização. Notando isso e tendo o aparecimento de materiais que surgem para reduzir os males ao meio ambiente, pesquisadores estão cada vez mais investindo em métodos novos para produção de concreto, utilizando a garrafa pet, as cascas orgânicas, o isopor, a borracha de pneu e outros materiais.

Contudo propõe-se estudos e análise comparatória de trabalhos que usaram o vidro como agregado miúdo no concreto, melhorando assim as suas características. Mesmo com uma divergência de resultados, o uso do vidro mostrou o porquê de tantos estudos em novas tecnologias, e que mesmo aquilo que seria descartado, torna-se um material de grande valor para a construção civil, por seus benefícios.

3.2 Concreto

O concreto é “material construtivo” amplamente disseminado. Podemos encontrá-lo em nossas casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, nos edifícios mais altos do mundo, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, até em plataformas de extração petrolífera móveis.

Estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que consiste, segundo a *Federación Iberoamericana de Hormigón*

Premesclado (FIHP), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água.

No Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos aproximadamente 60 milhões. Resumidamente, pode-se afirmar que o concreto é uma pedra artificial que se molda à necessidade construtiva do ser humano. Este é capaz de desenvolver um material que, depois de endurecido, tem resistência similar às das rochas naturais e, quando no estado fresco, é composto plástico: possibilita sua modelagem em formas e tamanhos os mais variados. Duas propriedades do concreto que o destacam como material construtivo são: sua resistência à água – diferentemente do aço e da madeira, o concreto sofre menor deterioração quando exposto à água, razão de sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água, e sua plasticidade, que possibilita obter formas construtivas inusitadas, como se vê nas obras arquitetônicas diversas. Mas existem outras vantagens: a disponibilidade abundante de seus elementos constituintes e seus baixos custos.

“Em termos de sustentabilidade, o concreto armado consome muito menos energia do que o alumínio, o aço, o vidro, e também emite proporcionalmente menos gases e partículas poluentes”, ressalta Arnaldo Forti Battagin, chefe dos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), o concreto é um material compósito que consiste de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas de diferentes naturezas.

O aglomerante é o cimento em presença de água; O agregado é qualquer material granular, como areia, pedregulho, seixos, rocha britada, escória de alto-forno e resíduos de construção e de demolição; se as partículas de agregado são maiores do que 4,75mm, o agregado é dito graúdo; caso contrário, o agregado é miúdo; Os aditivos e adições são substâncias químicas adicionadas ao concreto em seu estado fresco que lhe alteram algumas propriedades, adequando-as às necessidades construtivas.

“O concreto é uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos e adições), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de

cimento”, define Inês Battagin, superintendente do CB-18 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O segredo para que mistura se comporte como descrito acima está justamente na presença do cimento. Esta mistura finamente moída de compósitos inorgânicos calcinados (calcário, argila) que, quando combinada com água, endurece. As reações químicas entre os minerais do cimento e a água (reações de hidratação) resultam na pasta que se solidificará com o tempo, reunindo em torno de si os agregados.

Há dois tipos básicos de cimento. Os que não endurecem debaixo da água e, quando endurecidos, dissolvem-se lentamente se expostos à água. Sua origem remonta ao Egito Antigo e à Mesopotâmia. E os cimentos usados no concreto, que permanecem estáveis em ambiente aquoso, solidifica-se e mantém suas propriedades (resistência à água); por isso, dito cimento hidráulico. O cimento hidráulico largamente empregado no concreto moderno é o cimento Portland.

3.2.1 Tipos de cimento

As dosagens do cimento e do concreto, ou seja, as proporções dessas misturas são tão importantes para a obtenção de um produto de qualidade que são normatizadas. Cada país possui normas técnicas que recomendam como obter diferentes cimentos e concretos para diferentes aplicações. No Brasil, o mercado da construção civil dispõe de 6 opções de cimentos:

3.2.1.1 Cimento Portland Comum (CP I)

É o cimento Portland sem quaisquer adições, exceto gesso, usado para controlar a pega (o tempo necessário para o endurecimento parcial do composto). É recomendado para o uso em construções de concreto em geral, quando não são exigidas propriedades especiais do cimento. É normalizado pela ABNT NBR 5732.

3.2.1.2 Cimento Portland Composto (CP II)

Tem adições de escória, pozolana ou fíler em pequenas proporções. Sua composição segue a norma ABNT NBR 11578. Devido ao desempenho equivalente

ao CP I, o cimento composto atende plenamente às necessidades da maioria das aplicações usuais, apresentando, em muitos casos, vantagens adicionais.

3.2.1.3 Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) – (Utilizado nesse trabalho)

Normalizado pela ABNT NBR 5735, este cimento pode conter escória de alto-forno variando de 35 a 70% de sua massa. Por apresentar maior impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação e alta resistência à expansão e a sulfatos (reações álcali-agregado), este cimento é vantajoso em obras de concreto massa, tais como a construção de barragens.

3.2.1.4 Cimento Portland Pozolânico (CP IV)

Possui pozolana (cinzas volantes naturais ou artificiais nome derivado da localidade italiana de Pozzuoli) em quantidade que varia de 15 a 50% de sua massa. É normalizado pela ABNT NBR 5736. Recomendado para obras expostas à ação de água corrente e para ambientes agressivos por suas propriedades de baixa permeabilidade, alta durabilidade, alta resistência à compressão a idades avançadas.

3.2.1.5 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI)

Por atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação, este cimento é usado por fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, de tubos, lajes, meio-fio, mourões, postos e de elementos arquitetônicos pré-moldados, que necessitam de um cimento de elevada resistência inicial para a rápida desforma. O desenvolvimento dessa propriedade é obtido pela utilização de uma dosagem específica de calcário e argila na produção de clínquer e pela moagem mais fina do cimento, normalizados pela ABNT NBR 5733.

3.2.1.6 Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)

Com as propriedades de elevada resistência a Sulfetos, ele é Normalizado pela ABNT NBR 5737 e recomendado para obras em ambientes agressivos, tais como: redes de esgotos e obras em regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas. Os cinco tipos de cimento expostos anteriormente podem ser resistentes a sulfatos, caso observarem os parâmetros para essa propriedade em sua nomenclatura (RS).

3.2.2 Agregados utilizados

Agregados é a nomenclatura utilizada para Minerais para Construção Civil: Areia, Brita e Cascalho.

Informações sobre as principais características físicas e químicas desse grupo de minerais, suas aplicabilidades e formas de ocorrência. (DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral – Ministério de Minas e Energia) –

Os agregados para indústria da construção civil são os insumos mais consumidos no mundo. Dessa forma, os agregados são matérias granulares, sem e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil. Podem ser classificados levando-se em conta a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos. Com relação à origem, podem ser chamados de agregados naturais e artificiais.

Naturais são os materiais extraídos em sua forma fragmentar, sendo está, a forma que o material é encontrado na sua área fonte (jazida). Como exemplo de agregados naturais tem: areia e cascalho. Os agregados artificiais são os materiais que são extraídos em forma de blocos e precisam passar por processos de fragmentação, como a brita e areia britada.

Considerando a densidade, existem agregados leves (pedra-pomes, vermiculita...); agregados normais (brita, areia, cascalho...); agregados pesados (barita, magnetita...).

Quanto ao tamanho dos fragmentos, tem-se: agregados miúdos, os materiais com diâmetro entre 4,8mm até diâmetro mínimo de 0,075mm, especificada pela norma ABNT NBR 7211. Como exemplo de agregado miúdo tem: areias de origem natural, encontrada como fragmentos, ou resultante de britagem.

Define-se ainda agregado graúdo, ou pedregulho, os materiais com diâmetro mínimo de 4,8mm e máximo de 152mm, especificada pela mesma norma citada anteriormente. Como exemplo de agregados graúdos tem: cascalho e brita.

Levando em conta esses conceitos, é possível deduzir que os agregados são obtidos em rochas cristalinas ou depósitos naturais sedimentares. As propriedades físicas e químicas dos agregados e as misturas ligantes são essenciais para a vida das estruturas (obras) em que são usados. São muitos os casos de colapsos de

estruturas em que é possível chegar-se a conclusão que a causa foi à seleção e o uso inadequado dos agregados.

A exploração destes materiais em sua área fonte (pedreira, depósito sedimentar) depende basicamente de três fatores: a qualidade do material, o volume de material útil e o transporte, ou seja, **a localização geográfica da jazida.**

Estes materiais agregados são utilizados principalmente para confecção de concreto, blocos para revestimento de edifícios, proteção de taludes de barragens, pedra britada para os leitos de ferrovias, aeroportos e rodovias, blocos para calçamento de ruas, avenidas, em indústria de cerâmica, de vidro, etc.

3.2.2.1 Areia

Areia é uma substância natural, proveniente da desagregação de rochas; para utilização como agregado em concreto de possuir granulometria variando entre 0,05 e 5 milímetros pelas normas da ABNT. Praticamente, todas as rochas são passíveis de resultar em areias pela desagregação mecânica. No entanto, as mais favoráveis são aquelas com altos teores de quartzo, uma vez que esse mineral restará como resíduo, após a decomposição física e/ou química.

As areias são constituídas principalmente por quartzo, um mineral de fórmula geral SiO_2 amplamente distribuído na crosta terrestre, constituindo aproximadamente 12% dela.

Dependendo da granulometria e grau de pureza, as areias têm empregos específicos. Aquelas de baixo teor de ferro são usadas na fabricação de vidros e na indústria cerâmica e refratária. As areias com alta concentração de sílica se usam na siderurgia, para confecção de ligas ferro-silício. As areias mais grosseiras e com maior impureza se utilizam na construção civil e as mais finas como abrasivos.

Os materiais mais comuns são areias quartzosas e pó de pedra granítico ou calcário (cerca de 20% de britagem). Fonte (DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral – Ministério de Minas e Energia).

A areia pertence ao grupo dos Agregados para construção civil (areia, brita e cascalho) que ocupam 1º lugar em quantidade e 2º em valor no mundo.

Os baixos preços unitários resultam da relação entre limites de **distância** de distribuição (**uso local**) e larga distribuição de pequenos empreendimentos. Na produção e comércio predominam o imprevisto e a informalidade.

3.2.2.2 Brita

Material classificado como agregado de origem artificial, de tamanho graúdo. Tendo como área fonte as pedreiras, que exploram rochas cristalinas com solos pouco espessos de cobertura, no estado físico sem muita alteração, de preferência aquela contendo rochas quartzo – feldspáticas como os granitos, gnaisses. Porém, às vezes, rochas como o basalto e calcários microcristalinos, também são explorados para essa finalidade. (DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral – Ministério de Minas e Energia)

A textura da rocha fonte deve ser coesa e não muito grossa, com baixa porosidade, ausência de plano de fraqueza ou estrutura isotrópica. Não é recomendável utilizar rochas xistosas, com acamamento, foliações finas, micro fraturas.

A produção de agregados para a construção civil está distribuída por todo território nacional. O número de empresas que produzem pedra britada é da ordem de 250, a maioria de controle familiar. Estas empresas geram cerca de 15.000 empregos diretos; 60% produzem menos de 200.000 toneladas/ano; 30%, entre 200.000 toneladas/ano e 500.000 toneladas/ano; e 10%, mais do que 500.000 toneladas/ano. Cerca de 2.000 empresas se dedicam à extração de areia, na grande maioria, pequenas empresas familiares, gerando cerca de 45.000 empregos diretos. Destas, 60% produzem menos de 100.000 toneladas/ano; 35%, entre 100.000 toneladas ano e 300.000 toneladas/ano; e 5%, mais do que 300.000 toneladas/ano. (DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral – Ministério de Minas e Energia)

A participação dos tipos de rocha utilizadas na produção de brita é a seguinte: granito e gnaiss – 85%; calcário e dolomito – 10%; e basalto e diabásio – 5%. O Estado de São Paulo responde por cerca de 30% da produção nacional. Outros importantes estados produtores são Minas Gerais (12%), Rio de Janeiro (9%), Paraná

(7%), Rio Grande do Sul (6%) e Santa Catarina (4%). (DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral – Ministério de Minas e Energia)

Quanto aos minerais, devem-se evitar rochas que predominem os minerais deletérios: micas (especialmente biotita e clorita, em percentagem superior a 20%), assim como, os óxidos, sulfetos e carbonatos em grãos grossos. É preferível rochas com ausência de minerais desagregados ou em decomposição (feldspato, micas e máficos).

A forma e superfície do grão também exercem influência. Portanto, formas arredondadas e superfícies lisas reduzem a porosidade entre os grãos e facilitam a fluidez do concreto. Formas angulosas e superfícies rugosas facilitam a aderência do cimento.

As normas técnicas (NBR) são: agregado para concreto (7211), apreciação petrográfica (7389), amostragem (7216), forma (7809), pedra e agregados naturais (7225), alterabilidade (12696/7).

Os tamanhos de britas são classificados pela ABNT NBR 7525, como:

Nº 1 – 4,8 a 12,5mm; Nº 2 – 12,5 a 25mm; Nº 3 – 25 a 50mm; Nº 4 – 50 a 76mm;

Nº 5 – 76 a 100mm

4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A necessidade crescente da otimização de produtos e processos, minimizando custos e tempos, maximizando rendimento, produtividade e qualidade de produtos, dentre outros objetivos, tem levado profissionais de diferentes formações a buscarem técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos. A metodologia do planejamento fatorial, associada à análise de superfície de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro.

A seguir são apresentadas algumas justificativas da utilização do planejamento experimental (RODRIGUES e LEMMA, 2009):

1. Sabe-se bem que o desenvolvimento de um novo produto e/ou processo é, em geral, dependente de um grande número de variáveis. O planejamento consciente dos experimentos que devem ser realizados para determinar e mesmo quantificar, a influência das variáveis sobre as respostas desejadas, é indispensável para que resultados confiáveis sejam obtidos e para que análises estatísticas consistentes possam ser realizadas. Nesse contexto, pode-se considerar que para o desenvolvimento de produtos e processos através de procedimentos de tentativa e erro, conforme registros do século passado foram, de fato, importantes naquele momento. No entanto, a forte competitividade, a difusão da tecnologia, bem como a competência e a responsabilidade dos pesquisadores atuais inviabiliza tais procedimentos;

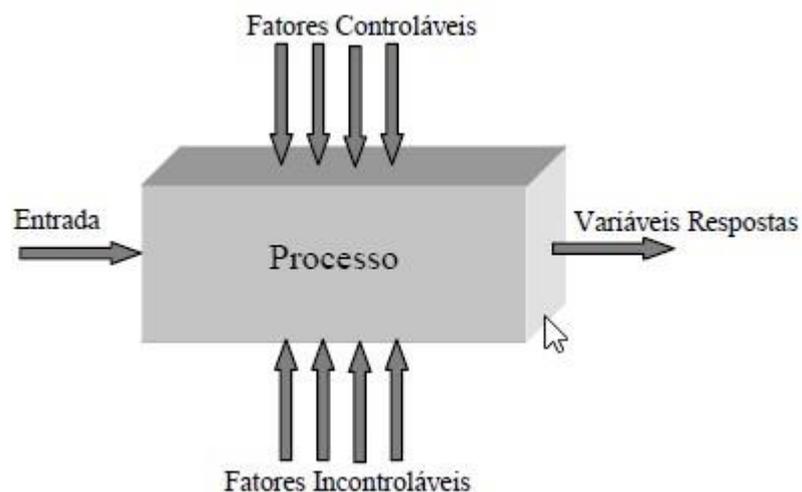
2. Quantificar o efeito das variáveis do processo através das técnicas do planejamento experimental, com o objetivo de obter informações sobre a robustez ou não das respostas desejadas, é de fundamental importância para a área de implementação de controle de processos;

3. Otimização do rendimento de processos, de formulações que conduzam à maior aceitação global do produto, bem como do custo da competitividade, etc.

Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de ensaios, em que são realizadas mudanças intencionais nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, para que seja possível, depois a observação das mudanças ocorridas nas variáveis de saída, ou seja, nas variáveis respostas, identificar as possíveis razões para tal mudança. Em geral, os experimentos são utilizados para estudar fenômenos de algum processo ou material através de uma técnica estabelecida dos processos e

sistemas. Pode-se visualizar o processo como uma combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transforma uma entrada (geralmente um material) em uma saída, que possui uma ou mais respostas observáveis. Algumas variáveis do processo são controláveis, enquanto outras variáveis não são possíveis. Um experimento pode determinar quais variáveis de entrada são influentes na resposta, definir qual o nível das variáveis influentes proporciona uma resposta perto do valor desejado, com uma variabilidade pequena na resposta e até mesmo a diminuição dos efeitos causados pelas variáveis que não são possíveis de controlar. A Figura 2 apresenta de maneira simplificada um processo (MONTGOMERY, 2001).

Figura 2 – Modelo Geral de um sistema de processo



Fonte: (Adaptado de MONTGOMERY, 2001)

O planejamento de experimentos, também conhecido como DOE (*Design of Experiments*) é uma poderosa ferramenta para a identificação de um conjunto de fatores de um processo (parâmetros). Esses parâmetros são importantes e exercem influência sobre o mesmo e determinam que níveis desses fatores devam ser mantidos para otimizar a resposta (ou característica de qualidade) de interesse. O DOE ajuda a maximizar as informações obtidas a partir de um determinado número de experimentos, utilizando o mínimo de recursos. Pode ser obtida por meio de um planejamento fatorial, ou seja, uma abordagem estruturada com base em métodos

estatísticos que suportam a simultânea mudança de mais de um fator (GUNASEGARAM et al., 2009).

O início das técnicas de planejamento de experimentos (DOE), foi liderado pelo trabalho pioneiro de Ronald Fisher entre 1920 e 1930. Durante este tempo Fisher foi responsável pela análise estatística de dados na Estação Agrícola Experimental de Rothamsted, Inglaterra. A partir de observações realizadas na rotina de trabalho, Fisher observou que as falhas ocorridas na realização dos experimentos muitas vezes prejudicavam a análise de dados do processo ou sistema e, a partir dessas observações, sistematizou o pensamento estatístico e os princípios para projetar investigações experimentais, incluindo o conceito de planejamento fatorial e da análise de variância (MONTGOMERY, 2001).

Embora o uso de planejamento estatístico em ambientes industriais tenha começado somente na década de 1930, este foi impulsionado pelo desenvolvimento da metodologia de superfície de resposta proposta por Box e Wilson, em 1951. Box e Wilson reconheceram e exploraram o fato de que muitos experimentos industriais eram fundamentalmente diferentes dos experimentos agrícolas de duas maneiras: a variável resposta geralmente podia ser observada imediatamente e o pesquisador podia aprender rapidamente informações cruciais de um pequeno grupo de pistas e que, por sua vez, poderiam ser usados para planejar o próximo experimento. Ao longo dos 30 anos posteriores, a metodologia de superfície resposta e as técnicas de planejamento de experimento foram difundidas por todas as indústrias de processo, principalmente em pesquisa e desenvolvimento.

Os métodos de planejamento de experimentos podem desempenhar um papel importante em projetos de engenharia, onde novos produtos são desenvolvidos ou os já existentes, melhorados. Algumas aplicações incluem: avaliação e comparação de projeto básico, avaliação de alternativas de material, seleção de parâmetros do projeto para assegurar que o produto funcione em amplas condições de campo, tornando o produto robusto e determinação de parâmetros chave do projeto que produzem impacto na execução (MONTGOMERY, 2001).

A seguir são apresentadas algumas vantagens do planejamento experimental (RODRIGUES e LEMMA, 2009):

1. Redução do número de experiências ou repetições e melhora na qualidade da informação obtida através dos resultados;
2. Os fatores podem ser analisados simultaneamente;
3. É possível otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo;
4. Permite calcular e avaliar o erro experimental. Isso é fundamental para que se possa especificar o nível de confiança estatística com o qual será possível estimar a reprodutibilidade do resultado desejado, ou seja, não é prudente confiar num resultado isolado.

No final de 1970 teve início o crescente interesse da indústria ocidental na melhoria da qualidade com o uso de planejamento de experimentos. Este fato deve-se ao trabalho de Genichi Taguchi, onde defendeu o uso de experimentos projetados, no qual o mesmo denominou de projeto robusto. Com isso, os processos se tornam insensíveis a fatores ambientais ou outros fatores que são difíceis de controlar, encontrando os níveis das variáveis do processo que proporcionam uma variável resposta em torno do valor desejado, ao mesmo tempo reduzindo a variabilidade em torno deste valor. Taguchi sugeriu os experimentos fatoriais fracionários e matrizes ortogonais, juntamente com alguns métodos estatísticos para resolver estes problemas (MONTGOMERY, 2001).

4.1 Método de Taguchi

Logo após a Segunda Guerra Mundial, Genichi Taguchi, cientista japonês, envolveu-se com o desenvolvimento de um método de melhoria de qualidade, que mais tarde seria adotado por muitas empresas como Toyota, Fuji Film, entre outras. O método é reconhecido mundialmente como o método de Taguchi, que fez as técnicas de planejamento de experimentos mais aplicáveis (ROY, 2001).

Taguchi dividiu as estratégias da engenharia de qualidade em três fases: projeto do sistema, projeto dos parâmetros e projeto da tolerância. Para o projeto do sistema, deve-se determinar as configurações do produto ou processo para garantir um bom resultado. Para a fase de projetos dos parâmetros, aplica-se o que se tem por conhecimento como método de Taguchi, usado para melhorar o desenvolvimento do processo por meio do ajuste dos níveis dos fatores, controlando-se os ruídos para

obter um produto final de maior qualidade ou diminuir os custos de produção e, por último, para o projeto da tolerância, o objetivo é determinar um limite para o qual as características dos níveis dos fatores mantêm a variabilidade do processo aceitável, ou seja, dentro do esperado pelos clientes e para as empresas em termos de custo (ROY, 2001; WERKEMA e AGUIAR, 1996).

Ressalta-se que, a segunda fase citada anteriormente, de projeto dos parâmetros, pode ser considerada a fase mais importante, visto que as características da qualidade do produto ou processo otimizado, a resposta considerada para o propósito do experimento em questão, é encontrada nesta fase, sendo ainda determinado nesta mesma fase, os parâmetros que podem influenciar nessas características de qualidade, os quais são classificados como fatores de sinal (valores pretendidos para a resposta a ser otimizada), ruído (parâmetros que não podem ser controlados no processo, que causam desvio da resposta da meta especificada, levando a perda de qualidade) e controle (fatores especificados pela equipe que faz os experimentos e seus respectivos níveis)

. O modelo proposto por Taguchi, inserido dentro das técnicas de planejamento de experimentos, é útil na redução do número de experimentos. Para isso, matrizes ortogonais, das quais se extrai o máximo de informações possíveis através de um número mínimo de experimentos realizados, são escolhidas, proporcionando um modelo que irá gerar informações suficientes para a otimização de um problema (ASILTURK e AKKUS, 2011).

Um arranjo ou matriz ortogonal é uma matriz bidimensional construída com propriedades matemáticas especiais, de tal maneira que, a escolha de um par qualquer de colunas no arranjo fornece todos os pares de combinação de cada número do arranjo. O registro mais antigo da matemática dos arranjos ortogonais data de 1897, por Jacques Hadamard, matemático francês. De fato, a exploração desse artifício matemático, deu-se apenas a partir da Segunda Guerra Mundial, com o emprego do conceito de projeto saturado pelos estatísticos ingleses Plackett e Burman (ROSS, 1991).

Basicamente, a partir do problema em estudo, uma vez identificado o número de fatores que se deseja investigar, os respectivos níveis e a quantidade de experimentos que se pretende realizar, levando em consideração tempo e custo,

escolhe-se o arranjo ortogonal de Taguchi que melhor se ajusta as características de tal problema (SENTHILKUMAR *et. al.*, 2010).

Segundo Chiang e Hsieh (2009), o método de Taguchi é uma ferramenta de cálculo poderosa, capaz de encontrar os parâmetros significativos de um processo ideal através de múltiplos aspectos qualitativos. A aplicação do método de Taguchi compreende as seguintes etapas (FREITAS *et. al.*, 2013):

- ✓ Selecionar a variável resposta a ser otimizada;
- ✓ Identificar os fatores (variáveis de entrada) e escolher os seus respectivos níveis;
- ✓ Selecionar a matriz ortogonal apropriada ao estudo em questão;
- ✓ Realizar os experimentos de forma aleatória, evitando possíveis erros sistemáticos;
- ✓ Analisar os resultados encontrados através da relação sinal-ruído (S/R) e por meio de análise de variância (ANOVA);
- ✓ Identificar parâmetros significativos que controlam o processo.

A etapa de escolha da matriz ortogonal apropriada pode ser realizada consultando-se a literatura de TAGUCHI e KONISHI, (1987).

Podem existir variáveis independentes (ou entradas) na relação sinal-ruído que podem comprometer o desempenho de um processo. Por esta razão, são definidas duas categorias: fatores controláveis e fatores não controláveis (FREITAS *et al.*, 2013). O método de Taguchi utiliza matrizes ortogonais para estudar diversos fatores com um número reduzido de experimentos (FREITAS *et al.*, 2013; SHARMA *et al.*, 2005). Além disso, o método pode oferecer outras vantagens como: a redução da variabilidade do processo, a conformidade do resultado esperado e, conseqüentemente, a redução de custos operacionais (BARROS, BRUNS e SCARMINIO, 1995). A análise de variância (ANOVA) é aplicada no método estatístico de Taguchi para avaliar a significância dos parâmetros utilizados no processo (ROSA *et al.*, 2009).

4.1.1 Arranjo ortogonal

Genichi Taguchi teve como meta de seu trabalho o projeto de parâmetros, que utiliza experimentos estatisticamente planejados, propondo uma estratégia para realização de experimentos, a qual foi baseada em experimentos fatoriais fracionários (MATTOS, 2004).

Taguchi desenvolveu um tipo de matriz especial que pode ser utilizado em várias situações. Essas matrizes são denominadas arranjos ortogonais. A importância da utilização do arranjo ortogonal consiste na habilidade de avaliar vários fatores com um número mínimo de testes (LOPES, 2008; ROSS, 1991).

A escolha da matriz ortogonal de Taguchi que melhor se ajusta ao problema depende do número de fatores que se deseja investigar, dos níveis dos fatores e da quantidade de experimentos que se pretende realizar, conforme a disponibilidade de tempo e custo. Os arranjos ortogonais com dois níveis são denominados L_4 , L_8 , L_{12} , L_{16} e L_{32} , com três níveis podem ser L_9 , L_{18} e L_{27} . O número na designação do arranjo indica quantos ensaios serão necessários, por exemplo, L_{16} possui 16 ensaios (ROSS, 1991).

Com o arranjo ortogonal selecionado, os fatores e as interações que se deseja analisar poderão ser atribuídos às diversas colunas. Cada fator deve ser colocado em uma coluna e às colunas restantes, as interações que se pretendem analisar seus efeitos. Para a realização da distribuição das colunas de interação, deve-se utilizar uma das ferramentas propostas por Taguchi (ROSS, 1991).

4.1.2 Razão sinal/ruído (S/R)

Para o aperfeiçoamento do processo e, conseqüentemente, melhorar a qualidade dos produtos produzidos, é preciso reduzir a variação existente. Essa variação pode ser identificada observando a resposta do experimento. Taguchi idealizou uma transformação dos dados em outro valor, que representa a relação Sinal-Ruído (S/R). Essa relação é determinada pela medição da variação. A relação S/R exige no mínimo dois valores observados de cada configuração do experimento,

combinando várias repetições em um valor que reflete o quanto de variação está presente (ROSS, 1991).

A relação S/R não leva em consideração o tipo de resposta analisada. Ela representa uma diminuição da variabilidade do processo em relação à média, melhorando a qualidade do processo (PAIVA, 2008). Segundo Ozbay et al. (2009), a metodologia de Taguchi refere-se a fatores de ruído como as causas de variabilidade no desempenho, inclusive porque os produtos podem falhar. Um fator de ruído é algo que faz com que o produto ou processo com características mensuráveis, sofra um desvio no seu valor alvo. Foram desenvolvidas por Taguchi mais de setenta relações sinal/ruído, porém três destas podem ser utilizadas para um grande número de características relacionadas ao processo estudado. As três relações sinal-ruído mais utilizadas são:

Menor é melhor:

$$S / R = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \quad (1)$$

Nominal é melhor:

$$S / R = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{s^2} \quad (2)$$

Maior é melhor:

$$S / R = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \quad (3)$$

onde:

n = número de repetições no ensaio;

\bar{y} = média das observações;

s^2 = variância das observações.

O objetivo da relação sinal/ruído é identificar os valores que minimizam a perda esperada, o que implica na sua maximização, ou seja, quanto maior a relação S/R, melhores são os níveis de controle ou parâmetros do processo, resultando na minimização da variabilidade do processo (ANTONY et al., 2006; WERKEMA e AGUIAR, 1996).

Para acrescentar o resultado dos efeitos encontrados com a relação S/R, pode-se aplicar a análise estatística ANOVA padrão em relação ao S/N para identificar os fatores significantes para o aumento do valor médio da relação S/R, proporcionando assim a redução da variação do produto ou do processo (ROSS, 1991).

4.1.3 Análise de variância (ANOVA)

Com o objetivo de complementar a resposta do estudo, obtendo-se a melhor combinação dos parâmetros, toda a análise de efeito dos fatores é realizada através da análise de variância (ANOVA), que verifica se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente, identificando quais fatores são os principais responsáveis pela variação da relação sinal/ruído. A ANOVA é uma ferramenta estatística que auxilia na tomada de decisão, verificando a significância das variáveis experimentadas. Basicamente, aplica-se o teste da distribuição “F” de Snedecor-Fisher para analisar cada fator. A distribuição “F” de Snedecor é uma ferramenta estatística que auxilia na determinação dos fatores que são significantes no processo, através da comparação da variância “dentro” dos tratamentos com a variância obtida “entre” estes. Se a razão do fator do experimento é muito maior que o valor padrão do “F” de Snedecor, logo o fator correspondente exerce efeito significativo no processo (ROSS, 1991).

A Tabela 1 ilustra todos os dados necessários para a determinação do valor final de “F” de Snedecor utilizado para comparação e posterior análise do processo.

Tabela 1 – Exemplo de estrutura de tabela ANOVA.

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (QM)	F
Fator A	SQ_A	$a - 1$	SQ_A / gl_A	QM_A / QM_{ERRO}
Fator B	SQ_B	$b - 1$	SQ_B / gl_B	QM_B / QM_{ERRO}
Interação AB	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	SQ_{AB} / gl_{AB}	QM_{AB} / QM_{ERRO}
Erro	SQ_{ERRO}	$ab(n - 1)$	SQ_{ERRO} / gl_{ERRO}	
Total	SQ_{TOTAL}	$abn - 1$		

Fonte: (Adaptada de MATTOS, 2004)

Desta forma, pode-se generalizar SQ_A , SQ_B e SQ_{AB} pela Equação 4 (ZHOU et al.,2010):

$$SQ_p = t \cdot \sum_{i=1}^q (E_{p,i} - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

Na qual:

p = fatores / interações;

t = número de repetições da variável resposta para cada nível dos fatores do arranjo ortogonal;

q = número de níveis de cada fator;

$E_{p,i}$ = efeito dos fatores para cada nível i a ser estudado;

\bar{Y} = média global.

Para o SQ_{ERRO} , a Equação 5 abaixo mostra que este é representado pela soma dos quadrados devido ao erro que provém do experimento:

$$SQ_{ERRO} = \sum_{i=1}^q (\bar{y}_i - \bar{Y})^2 - \sum_{j=1}^k SQ_p \quad (5)$$

Onde:

\bar{y}_i = média das respostas para cada condição experimental;

j = número mínimo de fatores a serem analisados;

k = número máximo de fatores e interações a serem analisados;

\bar{Y} = média global.

Já o SQ_{TOTAL} é representado pela soma dos Quadrados Total de cada fator do experimento e interações entre os fatores, segundo a Equação 6 abaixo:

$$SQ_{TOTAL} = \sum_{j=1}^k SQ_p + SQ_{ERRO} \quad (6)$$

O valor padrão de F de Snedecor ou $F_{crítico}$, comparado com o valor encontrado pela ANOVA leva em consideração o nível de confiança, o grau de liberdade associado a fonte de variação e o grau de liberdade associado ao erro. Por meio destes três aspectos, determina-se o valor de $F_{crítico}$ na tabela de Snedecor-Fisher. Vale ressaltar que se o valor de F encontrado pela ANOVA for maior que o $F_{crítico}$, o fator ou interação de fatores correspondentes exerce influência na variável resposta, do contrário, o fator ou interação de fatores correspondente ao F obtido pela ANOVA que é menor que o $F_{crítico}$ não tem significância no processo, não exercendo influência alguma sobre o mesmo do ponto de vista da otimização deste (ROSS,1991). A partir

desta definição, define-se o valor-p, estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses, cujos fatores/interações com valor-p menor que 0,05 causam efeitos significativos na variável resposta (MATTOS, 2004).

O p-valor determina a adequação de rejeitar a hipótese nula em um teste de hipótese. Os valores de p varia de 0 a 1. O valor de p é a probabilidade de se obter um teste estatístico que é pelo menos tão extremo quanto o valor calculado, se a hipótese nula é verdadeira. Antes de realizar quaisquer análises, determina-se o seu nível alfa (α). Um valor de nível utilizado é de 0,05. Se o p-valor de um teste estatístico é menor do que o seu nível, pode-se rejeitar a hipótese nula (MINITAB®16). Em outras palavras, o p-valor está associado à um cálculo matemático que avalia a probabilidade estatística dos valores estarem dentro ou fora do intervalo de confiança adotado, que normalmente é de 95%. O valor do F avalia a relação entre as variâncias da resposta em relação ao fator de estudo. Trata-se de um cálculo estatístico que, por sua vez, está relacionado ao intervalo de confiança. Na ANOVA, os fatores p-valor e F precisam convergir da seguinte forma: p-valor “baixo” e F “alto”.

Portanto, o método proposto por Genichi Taguchi é baseado na análise da variância (ANOVA), envolvendo o conceito de Sinal/Ruído e escolha do arranjo ortogonal adequado para delineamento do experimento. Trata-se do modelo robusto de Taguchi, que faz com que as empresas aumentem a qualidade de seus produtos e processos, tornando-se competitivas no mercado.

Em suma, determinar os parâmetros de projeto necessários para o produto ou processo e seus respectivos níveis, realizar as experiências, analisar os resultados por meio da razão sinal-ruído e análise de variância para determinar as condições de melhor ajuste e, por fim, a realização de um teste de confirmação com as melhores condições depois de ajustados os níveis, são as principais etapas do método de Taguchi (SENTHILKUMAR et al, 2010).

Para obter informações detalhadas, muitos textos introdutórios sobre a teoria estatística elementar estão disponíveis na literatura e também podem ser encontrados na maioria dos pacotes de programas de estatística para microcomputadores (MINITAB®, STATISTICA®, SPSS e outros) (ROSA et al., 2009).

4.2 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA OU DE CONTORNO

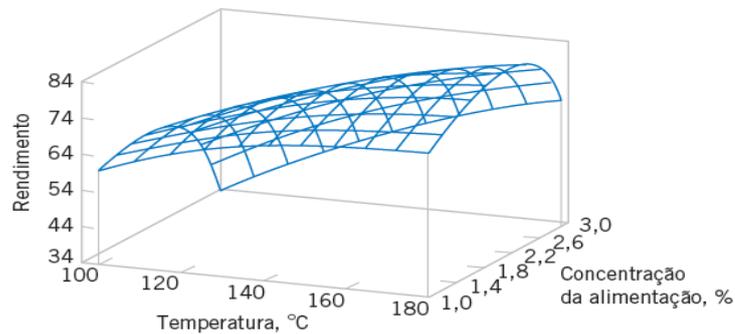
A metodologia de superfície de resposta ou MSR, também chamada de superfície de contorno é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise nas aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada por muitas variáveis e o objetivo seja otimizar essa resposta. Por exemplo, suponha que um engenheiro químico deseja encontrar os níveis de temperatura (x_1) e concentração da alimentação (x_2) que maximizem o rendimento (y) de um processo. O rendimento de um processo é uma função dos níveis de temperatura e de concentração de alimentação, como demonstra a Equação 7:

$$Y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (7)$$

em que ε representa o ruído ou erro observado na resposta Y . Se denotarmos a resposta esperada por $E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta$, então a superfície representada por $\eta = f(x_1, x_2)$ é chamada de uma superfície de resposta. (MONTORO et al., 2013; MONTGOMERY e RUNGER, 2012). É possível representar graficamente a superfície de resposta conforme mostrado na Figura 2.9, sendo η plotado contra os níveis de x_1 e x_2 . Note que a resposta foi representada como um gráfico de superfície em um espaço tridimensional.

Com o objetivo de visualizar a forma de uma superfície de resposta, frequentemente são plotados os contornos da superfície de resposta, como mostrado na Figura 3. No gráfico dos contornos, conhecido como gráfico das curvas de nível, linhas de resposta constante são desenhadas no plano x_1, x_2 .

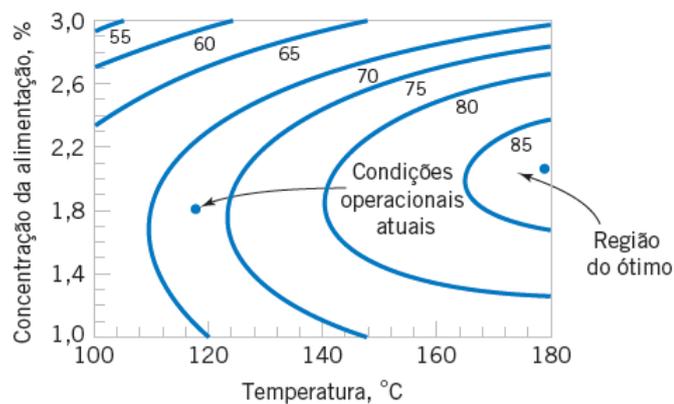
Figura 3 - Uma superfície tridimensional de resposta, mostrando o rendimento esperado, como uma função da temperatura e da concentração de alimentação.



Fonte: (MONTGOMERY, 2012)

Cada contorno corresponde a uma altura particular da superfície de resposta. O gráfico das curvas de nível é útil no estudo dos níveis de x_1 e x_2 que resultam em mudanças na forma ou na altura da superfície de resposta.

Figura 4 - Curvas de nível da superfície de resposta da Figura 3.



Fonte: (MONTGOMERY, 2012)

Na maioria dos problemas de MSR, a forma da relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Assim, a primeira etapa na MSR é encontrar uma aproximação adequada para a relação verdadeira entre Y e as variáveis

independentes. Geralmente, emprega-se um polinômio de baixo grau em alguma região das variáveis independentes. Se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, então, a função de aproximação será o modelo de primeira ordem (MONTGOMERY e RUNGER, 2012):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (8)$$

Se houver curvatura no sistema, então, um polinomial de maior grau terá que ser usado, tal como o modelo de segunda ordem (MONTGOMERY e RUNGER, 2012):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (9)$$

Muitos problemas de MSR utilizam uma ou ambas dessas aproximações polinomiais. Naturalmente, é impossível que um modelo polinomial seja uma aproximação razoável da relação funcional verdadeira sobre o espaço inteiro das variáveis independentes. Porém, para uma região relativamente pequena, elas geralmente funcionam muito bem. O método dos mínimos quadrados é usado para estimar os parâmetros nas aproximações polinomiais. A análise de superfície de resposta é, então, feita em termos da superfície ajustada. Se a superfície ajustada for uma aproximação adequada da função verdadeira de resposta, a análise da superfície ajustada será aproximadamente equivalente à análise do sistema real. MSR é um procedimento sequencial.

Frequentemente, quando ocorrer em um ponto na superfície de resposta longe do ótimo, como as condições operacionais atuais da Figura 4, haverá pouca curvatura no sistema, e o modelo de primeira ordem será apropriado. O objetivo é conduzir o experimento a uma região mais próxima a região do ótimo. Uma vez que esta região tenha sido encontrada, um modelo mais elaborado, tal como o modelo de segunda ordem, pode ser empregado, e uma análise pode ser feita para, então, localizar o ótimo. A partir da Figura 4 pode-se observar que a análise de uma superfície de resposta pode ser pensada como "subindo o morro", onde o topo do morro representa

o ponto de resposta máxima. Se o ótimo verdadeiro for um ponto de resposta mínima, então, pode-se pensar como "descendo para um vale".

O objetivo futuro da MSR é determinar as condições operacionais ótimas para o sistema ou determinar uma região do espaço fatorial, em que as especificações operacionais sejam satisfeitas. Vale ressaltar que a palavra "ótimo" na MSR é usada em um sentido especial. Os procedimentos da MSR de "subir o morro" garantem convergência para somente um ótimo local (MONTGOMERY e RUNGER, 2012).

5 MATERIAIS

5.1 Cimento

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento CP III-40 RS da Votorantim, cujas características fornecidas pelo fabricante constam nas tabelas 2 e 3. O cimento foi fornecido pela UniFOA, através do curso de Engenharia Civil.

Tabela 2: Composição química do cimento CP III-40 RS da Votorantim.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA						
Tipo	Sigla	Classe	Norma	Clinker+ Gesso	Calcário	Escória
III	CP III RS	32/ 40	5735	25 A 65%	0 a 5%	35 a 70%

Fonte: Fabricante

Tabela 3: Informações técnicas do cimento CP III-40 RS da Votorantim.

Exigências Físicas e Mecânicas										
Classe	Finura		Tempo de Pega		Expansibilidade		Resistencia a Compressão			
	Resíduo na Peneira 75mm (%)	Área específica (m ² /Kg)	Início (h)	Término (h)	A Frio (mm)	A Quente (mm)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
32	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12	≤ 5	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32
40	≤ 8,0	-	≥ 2	≤ 12	≤ 5	≤ 5	-	≥ 12	≥ 23	≥ 40

Fonte: Fabricante

5.2 Resíduo de vidro

O agregado artificial para este estudo foi produzido a partir de resíduo de vidro proveniente do processo de produção em escala industrial da Unidade fabril da Guardian S.A., localizada em Porto Real- RJ.

O Vidro utilizado foi: vidro plano e incolor retirado do interior da planta fabril.

Figura 5: Vista do depósito de rejeitos de vidro da empresa Guardian S.A., localizada em Porto Real- RJ.



Fonte: o autor

5.3 Demais insumos utilizados

Para a produção das misturas de concretos foram utilizados areia e brita. Todos esses insumos foram gentilmente fornecidos pela UniFOA, por intermédio do curso de Engenharia Civil.

6 CARACTERIZAÇÕES

6.1 Resíduo de vidro

O agregado graúdo foi caracterizado quanto a sua granulometria e densidade de massa aparente no estado seco. Todas essas caracterizações foram realizadas nas dependências da UniFOA.

6.1.1 Classificação Granulométrica

O processo de beneficiamento do agregado consistiu em submeter o resíduo de vidro à trituração em moinho de martelo até obter-se uma granulometria semelhante à do agregado miúdo natural. As tabelas 4 e 5 apresentam as principais características dos agregados utilizados.

Tabela 4 – Características da areia natural e brita 1 NBR NM248

Características	Areia	Brita 1
Densidade de Massa Aparente (Kg/cm ³)	1,47	1,43
Módulo de Finura	2,25	6,94
Coeficiente de uniformidade ($C = d_{60}/d_{10}$)	3,00	1,40

Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral

Tabela 5 – Características da areia artificial – pó de vidro resultados obtidos em laboratório conforme NBR 7251

Características	Pó de Vidro
Massa Específica (g/cm ³)	2,47
Massa Unitária Agregado Solto (g/cm ³)	1,53
Massa Unitária Agregado Úmido (g/cm ³)	1,29
Teor de Umidade (%)	4,00
Módulo de Finura	2,76
Diâmetro Máximo (mm)	4,80

Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral

É importante salientar que essa pesquisa foi realizada utilizando ferramentas estatísticas otimizando o número de amostras para obtenção de resultados mais precisos com parâmetros de controles previstos dentro das Normas ABNT aplicáveis (NBR 5738, NBR 7211, NBR 5739, NBR 11581, NBR 7214, NBR 7215) e que será objeto de pesquisas futuras.

7 ARRANJO EXPERIMENTAL

Para a produção dos corpos de provas de concreto+resíduo de vidro, foi utilizada uma matriz ortogonal de experimentos de Taguchi L_4 , conforme apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Matriz ortogonal de experimentos de Taguchi L_4 .

EXPERIMENTOS	A	B
1	-	-
2	-	+
3	+	-
4	+	+

Fonte: o autor

Os parâmetros que foram analisados nesse projeto foram a granulometria do resíduo de vidro e o teor de vidro utilizado no concreto.

Nesse contexto avaliou-se o desempenho dos concretos produzidos com substituição gradativa de agregado miúdo natural (areia) por agregado miúdo artificial (pó de vidro).

A primeira fase do experimento consistiu na definição dos parâmetros principais de análise para este estudo, assim foram definidas as principais características do concreto a ser dosado, bem como as famílias que seriam alvo do estudo.

Através da matriz ortogonal L_4 de Taguchi, foram produzidas quatro famílias de estudo, mantendo-se um mesmo traço base. Estas famílias diferem entre si pelo proporcionamento entre os teores de agregados miúdos naturais e artificiais e pela granulometria. A tabela 5 apresenta as características das famílias produzidas.

Os valores de cada um desses parâmetros são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros estudados.

Fatores	Nível Baixo (-)	Nível Alto (+)
A: Granulometria do vidro	354 μ m<40<30 (Mesh)	841 μ m>30>40 (Mesh)
B: Teor de vidro (%)	10	25

Fonte: o autor

A Tabela 8 apresenta as quatro famílias de concretos que foram produzidas neste estudo sendo as proporções de Cimento, Brita e água idênticas em todos os traços:

Tabela 8 - características das famílias produzidas.

Famílias de concreto	Traço (a: vd)	Proporção vidro/areia	Granulometria
Família 1	1,50: 0,1667	90-10	354 μ m<40<30 Mesh (Mais fina)
Família 2	1,25: 0,4167	75-25	354 μ m<40<30 Mesh (Mais fina)
Família 3	1,50: 0,1667	90-10	841 μ m>30>40 Mesh (Mais grossa)
Família 4	1,25: 0,4167	75-25	841 μ m>30>40 Mesh (Mais grossa)

Onde: c: cimento – a: areia – vd: vidro – a/c: fator água/cimento

Fonte: o autor

Para cada família foram moldados 4 corpos-de-prova de 10 cm x 20 cm. A moldagem seguiu os procedimentos da NBR 5738 (ABNT, 1994) e o adensamento mecânico foi executado em duas camadas. Todos os CP's moldados foram imersos em tanque de cura após 24 horas da moldagem e permaneceram neste estado até 24 horas antes da realização dos ensaios.

O traço utilizado foi especificado para atender a classe de agressividade II, conforme os parâmetros prescritos na NBR 6118 (ABNT, 2004). A Tabela 9 apresenta uma descrição para os parâmetros considerados.

Tabela 9 - correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de resistência do concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	CP	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40
1 – O Concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12622.					
2 – CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado					
3 – CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido					

Fonte: ABNT NBR 8953

Para cada uma das famílias estudadas foram avaliados densidade e resistência a compressão no estado endurecido.

8 RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 7 e 28 dias, segundo a NBR 5739 (ABNT, 1980). O equipamento utilizado foi uma prensa eletromecânica com carga máxima para 100 toneladas, com sistema de medição digital, acoplado a um microcomputador com impressora, para processamento e obtenção dos resultados, pertencente ao curso de Engenharia Civil do UniFOA, a Figura 6 mostra a prensa utilizada nos ensaios de compressão, a Figura 7, mostra os corpos de prova antes dos ensaios destrutivos .

Figura 6: Prensa utilizada nos ensaios de compressão.



Fonte: o autor

Figura 7: Corpos de prova após desmoldagem e ao fundo a prensa utilizada.



Fonte: o autor

As Tabelas 10 e 11, apresentam os resultados dos ensaios de compressão realizados para cada uma das famílias estudadas

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de compressão em 7 dias

Experimento de Resistência com 7 dias						
Percent. VIDRO	Granul.	CP's	RESISTÊNCIA (KN)	RESISTÊNCIA (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA(MPa)	DESVIO PADRÃO
10%	-	1	117,67	14,98	14,92	0,52
10%	-	2	114,30	14,55		
10%	-	3	122,75	15,63		
10%	-	4	113,90	14,50		
25%	-	1	112,93	14,38	16,76	1,60
25%	-	2	139,76	17,79		
25%	-	3	137,90	17,56		
25%	-	4	135,83	17,29		
10%	+	1	131,26	16,71	17,28	0,51
10%	+	2	138,47	17,63		
10%	+	3	139,68	17,78		
10%	+	4	133,34	16,98		
25%	+	1	120,65	15,36	16,41	1,84
25%	+	2	113,27	14,42		
25%	+	3	137,15	17,46		
25%	+	4	144,52	18,40		

Fonte: o autor

Tabela 11– Resultados dos ensaios de compressão em 28 dias.

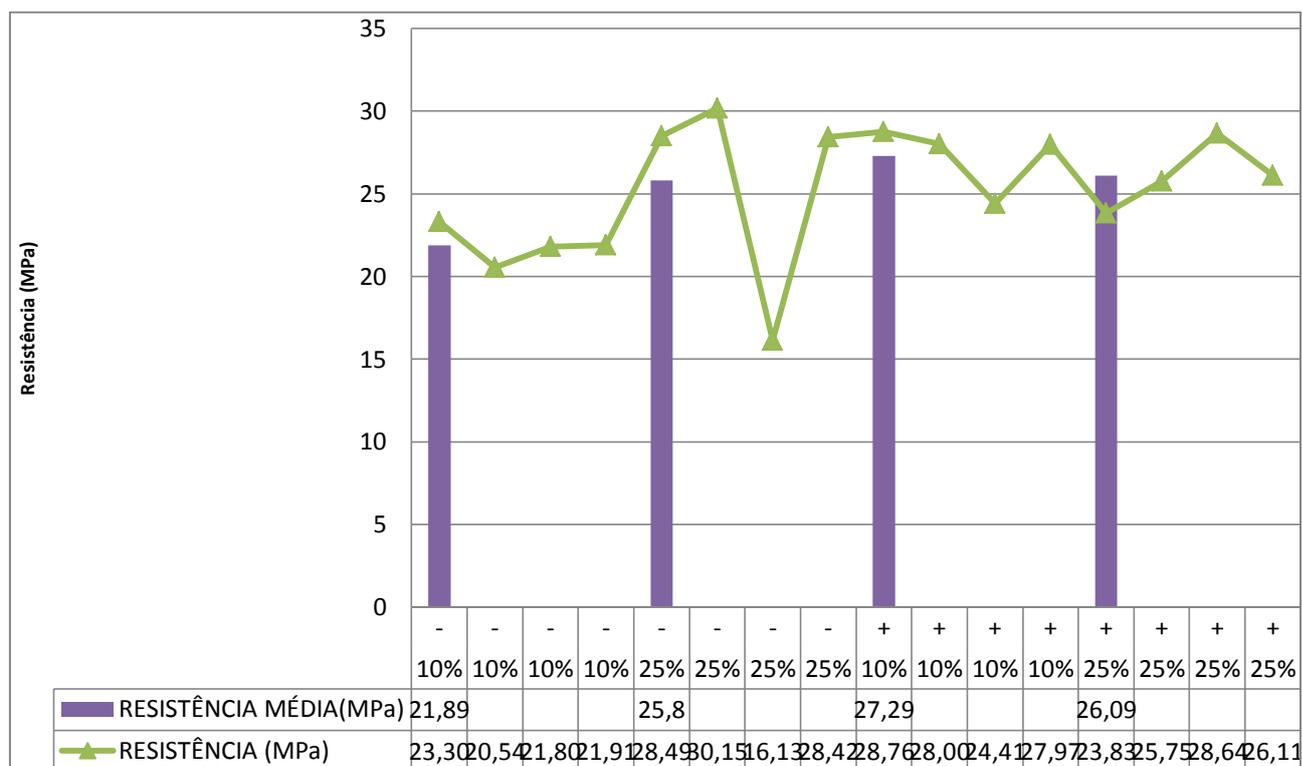
Experimento de Resistência com 28 dias						
Porcent. VIDRO	Granul.	CP's	RESISTÊNCIA (KN)	RESISTÊNCIA (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA(MPa)	DESVIO PADRÃO
10%	-	1	183,03	23,30	21,89	1,13
10%	-	2	161,34	20,54		
10%	-	3	171,23	21,80		
10%	-	4	171,87	21,91		
25%	-	1	223,82	28,50	25,80	6,50
25%	-	2	236,86	30,16		
25%	-	3	126,73	16,135		
25%	-	4	223,26	28,43		
10%	+	1	225,95	28,77	27,29	1,95
10%	+	2	219,91	28,00		
10%	+	3	191,75	24,41		
10%	+	4	219,74	27,98		
25%	+	1	187,16	23,83	26,09	1,98
25%	+	2	202,28	25,76		
25%	+	3	224,97	28,64		
25%	+	4	201,81	26,11		

Fonte: o autor

9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 8 apresenta os resultados comparativos de resistência à compressão dos resultados dos testes após 28 dias. E a tabela 12 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de compressão das 4 famílias de concretos que foram estudadas.

Figura 8 - resultados comparativos de resistência à compressão dos resultados dos testes após 28 dias.



Fonte: o autor

Tabela 12 – Resumo dos Resultados dos ensaios de compressão

Famílias de concreto	Proporção vidro/areia	Resistência Média 7 dias (MPa)	Resistência Média 28 dias (MPa)	Densidade (Kg/m ³)
Família 1	90-10	14,92	21,88	2.222,79
Família 2	75-25	16,76	25,80	2.165,50
Família 3	90-10	17,28	27,29	2.054,74
Família 4	75-25	16,41	26,08	2.260,98

Fonte: o autor

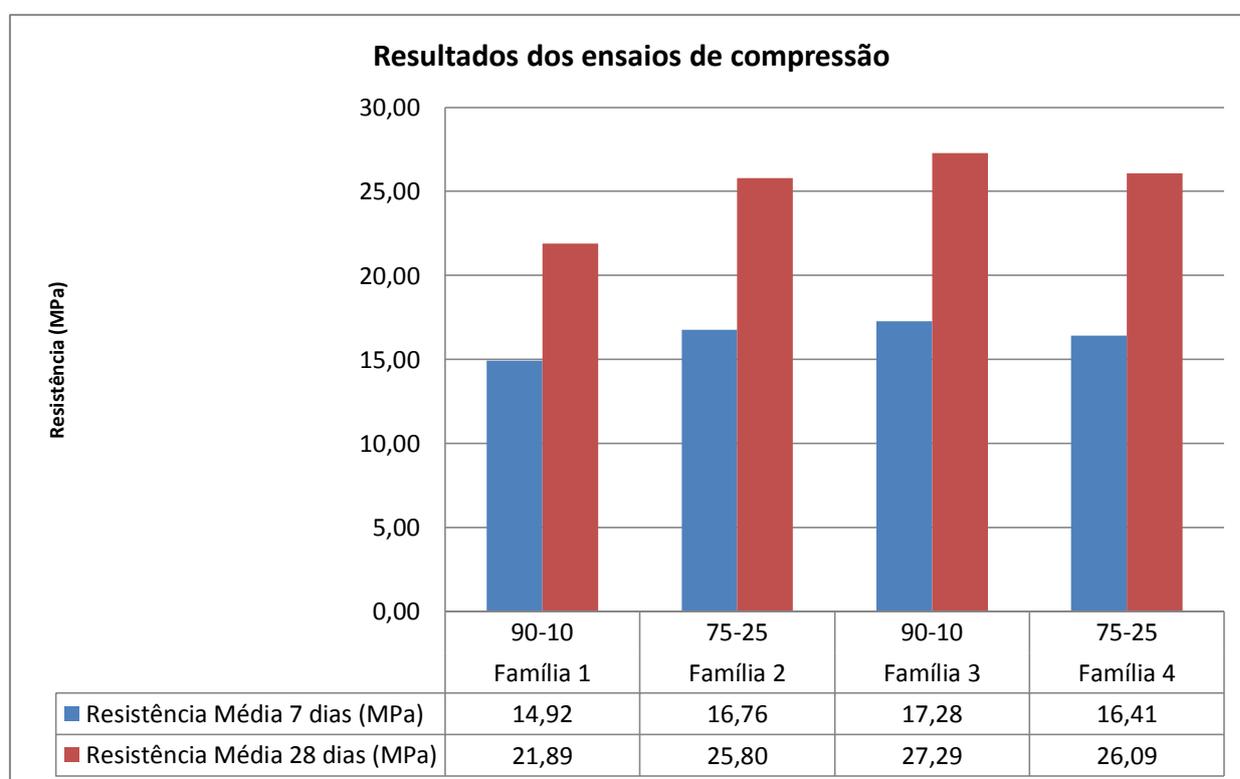
A figura 9 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão para cada uma das famílias estudadas. Os resultados demonstraram que o melhor desempenho foi obtido para a família 1, onde o percentual de pó de vidro na mistura foi de 10% e o de areia natural foi de 90% e <10>30Mesh (Mais grossa).

Contudo, as avaliações realizadas também indicam desempenhos satisfatórios para a utilização do pó de vidro em substituição à areia natural, principalmente para as famílias 2 e 4 onde os teores empregados foram de 25%-75%.

Notou-se que as resistências a compressão desses dois grupos tiveram pouca variância dos resultados embora possuam granulometria distintas.

Foi observado também que a Família 1 apresentou os menores resultados onde foi o grupo que se utilizou a mesma quantidade de vidro dos CP's de melhores resultados, porém com a granulometria mais fina.

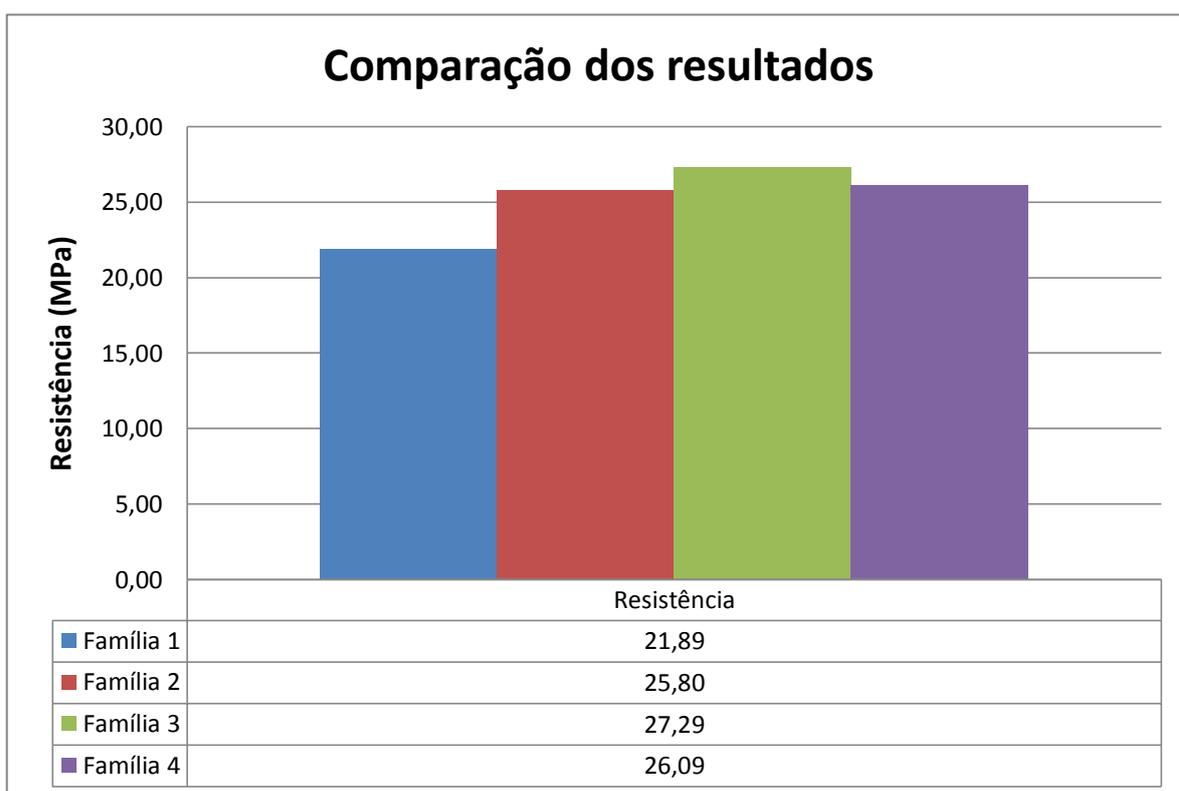
Figura 9 - resultados dos ensaios de resistência à compressão para cada uma das famílias estudadas.



Fonte: o autor

Portanto os teores de vidro, diante dos resultados, indicaram que não foi o item que desqualificou a qualidade do concreto. Deve-se considerar que os valores obtidos para todas as famílias já indicaram a possibilidade de utilização da mistura para a produção de concretos estruturais, tendo em vista a pequena variação dos resultados dos diversos corpos-de-prova feitos para esse traço, caracterizando a uniformidade da mistura. A figura 10 apresenta a comparação dos resultados de resistência à compressão para cada uma das famílias estudadas.

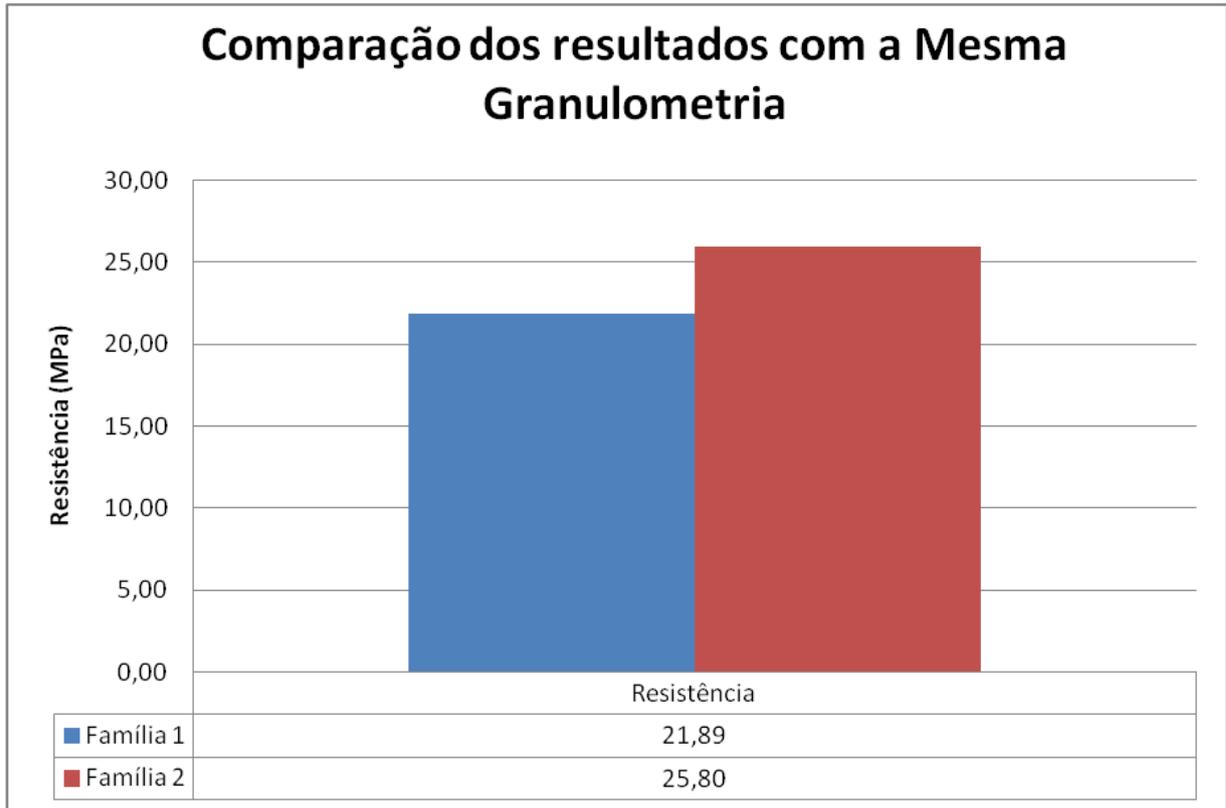
Figura 10 – Comparação dos resultados de resistência à compressão para cada uma das famílias estudadas.



Fonte: o autor.

Em caso onde restarem dúvidas em relação ao processo de produção do pó de vidro, ou seja, da possibilidade de melhorar a granulometria do material para garantir um desempenho satisfatório da mistura, verificou-se a possibilidade de utilização deste material na produção de concretos, massa ou concretos não estruturais. A figura 11 apresenta a comparação dos resultados de resistência à compressão nas famílias de concretos onde foram utilizada a mesma granulometria de vidro.

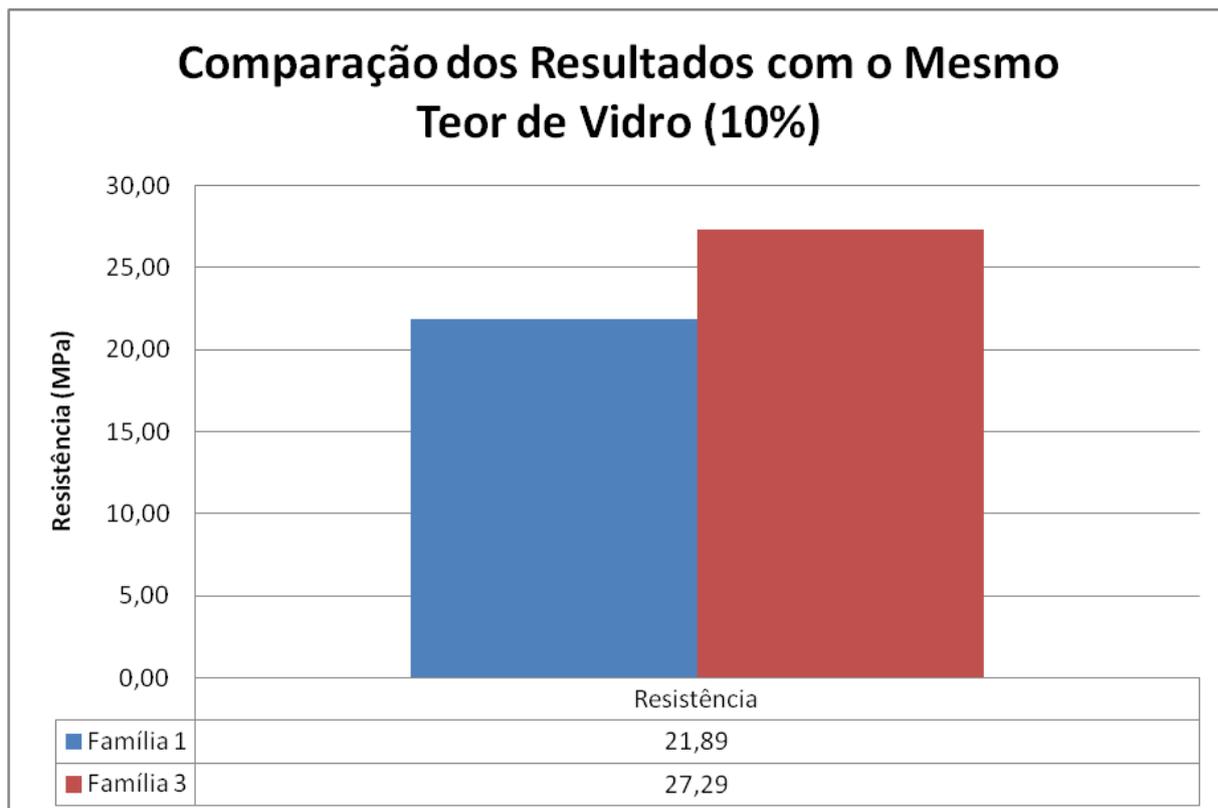
Figura 11 - Comparação dos resultados de resistência à compressão nas famílias de concretos onde foram utilizada a mesma granulometria de vidro.



Fonte: o autor

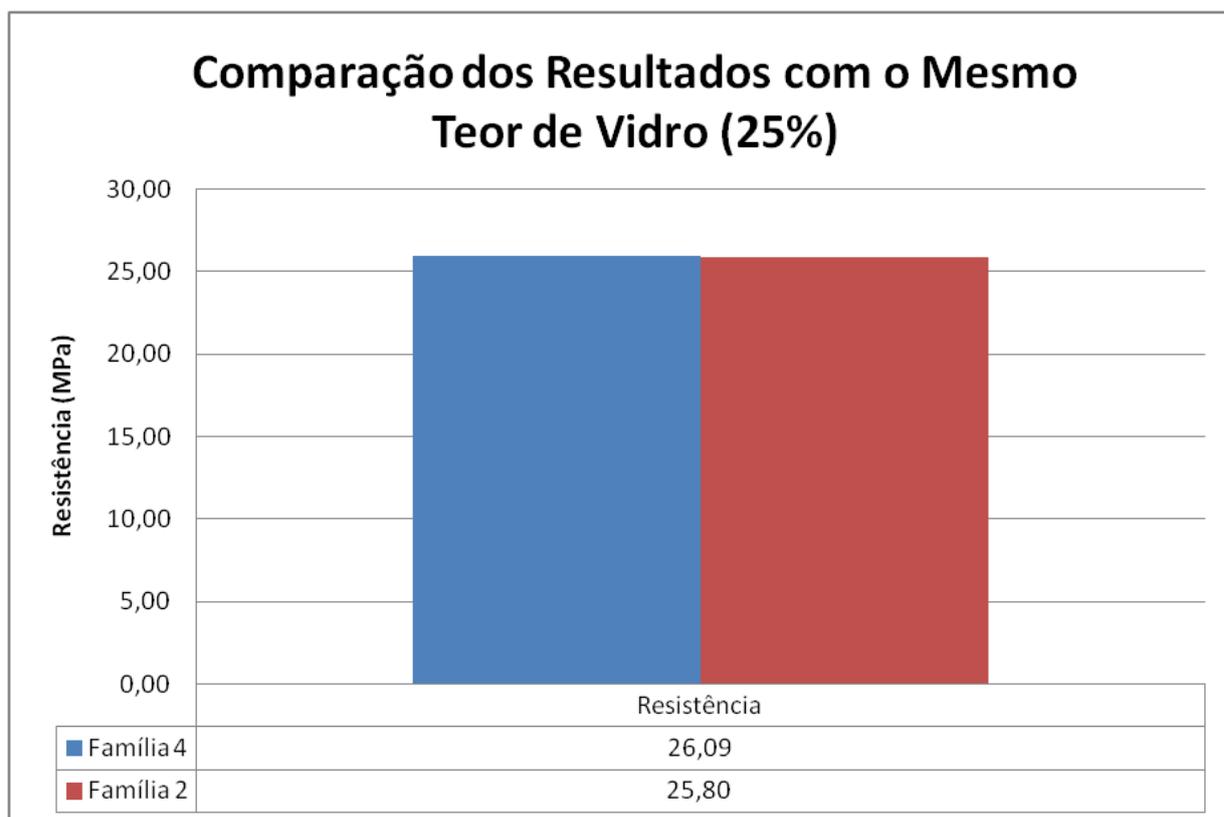
Outras questões precisam ser consideradas, pois a performance mecânica é apenas um dos fatores a serem considerados no estudo comparativo destas misturas (ver figuras 12 e 13), uma vez que a garantia da viabilidade deste procedimento permite, não apenas que seja evitado um acondicionamento inadequado de resíduos, como também uma redução direta de custos operacionais com transporte destes resíduos para o controle gerando custos relacionados com a destinação final. Contudo surgem outros benefícios indiretos, pois a utilização do pó de vidro poderá implicar no desenvolvimento de mão-de-obra para aperfeiçoar os procedimentos de coleta do vidro, bem como o procedimento de fragmentação do vidro, gerando impactos também na economia.

Figura 12 – Comparação dos resultados de resistência à compressão das famílias de concreto 1 e 3, onde foram utilizados um teor de vidro de 10%.



Fonte: o autor

Figura 13 – Comparação dos resultados de resistência à compressão das famílias de concreto 2 e 4, onde foram utilizados um teor de vidro de 25%.



Fonte: o autor

9.1 Análises estatísticas dos resultados

A Figura 14 consiste em gráficos do tipo *boxplot*, que apresentam a distribuição de resultados de resistência à compressão após 7 dias e 28 dias de cura para as diferentes combinações de variáveis. Este tipo de gráfico permite avaliar a existência de *outliers*, dados sabidamente atribuíveis a causas especiais, mas que no presente estudo não foram identificados.

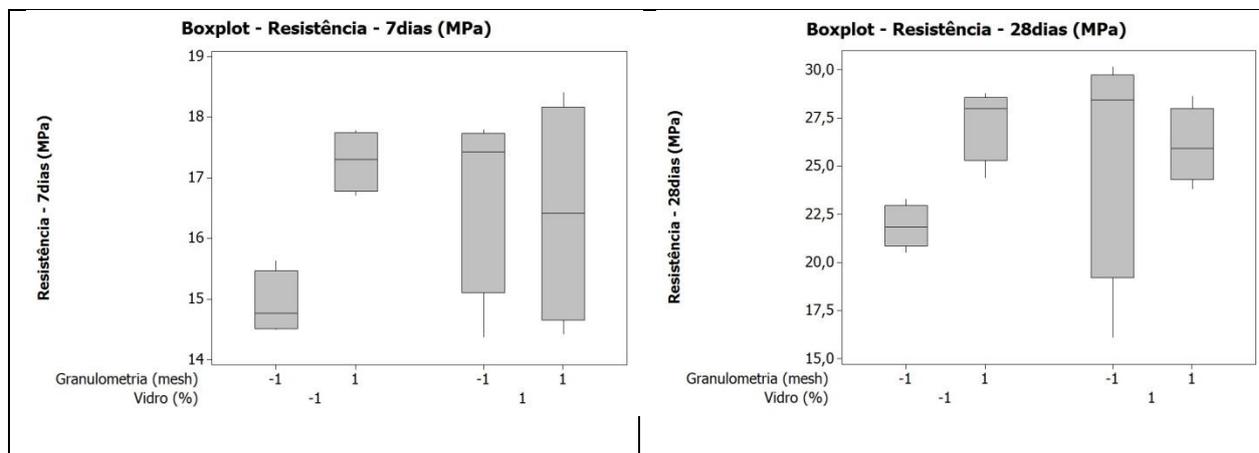
Os gráficos do tipo *boxplot* permitiram, também, evidenciar a dispersão dos resultados de forma mais clara: quanto maior for a amplitude das barras, maior é a dispersão dos resultados, quanto menor sua amplitude, mais convergente são os resultados. Permite-se, também, identificar a posição da mediana através da visualização da linha que aparece no interior das barras.

Analisando, portanto, a Figura 14, pode-se observar que tanto para a condição de teste após 7 dias de cura quanto após 28 dias de cura, para um percentual de incorporação de vidro de 10% (representado na figura como “Vidro(%) -1”), existiu uma diferença que pode ser considerada significativa nos resultados de resistência à compressão quando foi utilizada uma granulometria mais grossa (representado na figura como “Granulometria (mesh) +1”), frente à granulometria mais fina (representado na figura como “Granulometria (mesh) -1”).

Isso indicou que a incorporação de granulometria mais grossa proporcionou um incremento significativo de resistência à compressão ao material para a uma proporção de adição de vidro de 10%. Já ao analisar os resultados tanto após 7 dias de cura quanto 28 dias de cura, para um percentual de incorporação de vidro de 25% (representado na figura como “Vidro (%) +1”), pode-se afirmar que inexistiu diferença dos resultados de resistência à compressão, independente da granulometria utilizada.

Esta afirmação pode ser feita analisando a dispersão dos resultados para as duas situações, podendo ser perceptível que as colunas praticamente se sobrepõem uma a outra. Isso indicou que quando foi incorporado 25% de vidro à constituição do material, independentemente de sua granulometria, os resultados praticamente se mantiveram.

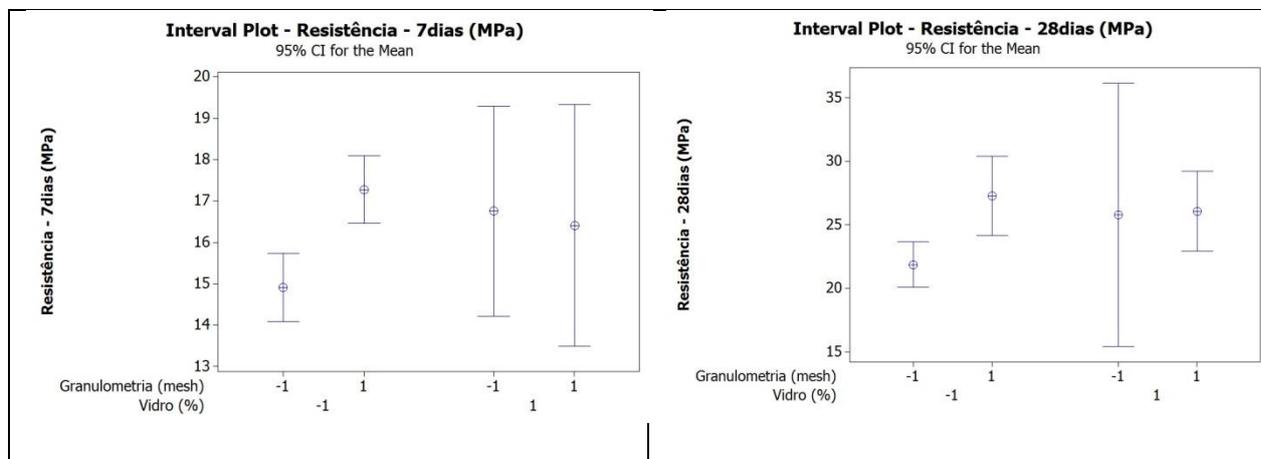
Figura 14 - Gráficos do tipo *Boxplot* evidenciando a resistência mecânica após 7 e 28 dias (Granulometria: Nível -1, fina e Nível +1, grossa; % Vidro: Nível -1, 10% e Nível +1, 25%).



Fonte: o autor

A Figura 15 apresenta gráficos do tipo *interval plot*. Esta forma de apresentação dos dados permitiu evidenciar a amplitude dos resultados (mínimo e máximo) e respectivo valor médio. De forma geral, observou-se que a incorporação de granulometria mais grossa proporcionou um incremento significativo de resistência à compressão ao material para a uma proporção de adição de vidro de 10% (representado na figura como “Vidro (%) -1”). Para um percentual de incorporação de vidro de 25% (representado na figura como “Vidro (%) +1”), pode-se afirmar que inexistiu diferença dos resultados de resistência à compressão, independente da granulometria utilizada, o que pode ser constatado através da dispersão dos resultados para as duas situações – as barras praticamente se sobrepuseram uma a outra. Ou seja, quando foi incorporado 25% de vidro à constituição do material, independentemente de sua granulometria, os resultados praticamente se mantiveram.

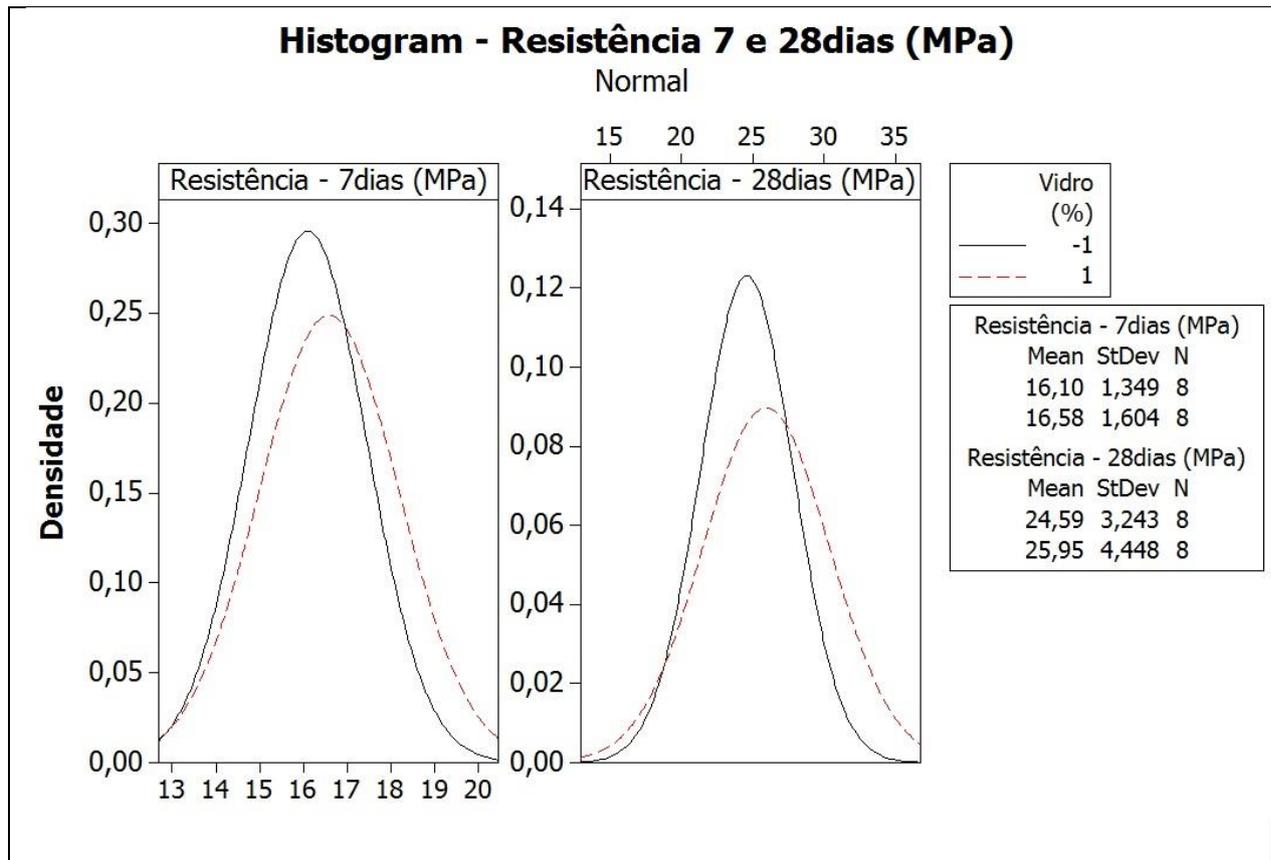
Figura 15 - Gráficos do tipo *Interval Plot* evidenciando a resistência mecânica após 7 e 28 dias (Granulometria: Nível -1, fina e Nível +1, grossa; % Vidro: Nível -1, 10% e Nível +1, 25%).



Fonte: os autores

Analisando os resultados de resistência mecânica em função do percentual de vidro incorporado após 7 e 28 dias para diferentes percentuais de incorporação (10% e 25%), conforme *histogramas* da Figura 16, pode-se observar que para as duas situações os resultados apresentam uma distribuição similar. O valor médio dos resultados de resistência após 7 dias manteve-se muito próximo independente do percentual de vidro incorporado, entre 16,10 e 16,58 MPa, assim como o valor médio dos resultados de resistência após 28 dias, entre 24,59 e 25,95 MPa. Estes resultados indicaram que o aumento do percentual de vidro incorporado, de 10% para 25%, não proporcionou alteração significativa na resistência mecânica do material.

Figura 16 - Histogramas da resistência mecânica em função do % vidro incorporado após 7 e 28 dias (nível -1, 10%; nível +1, 25%).



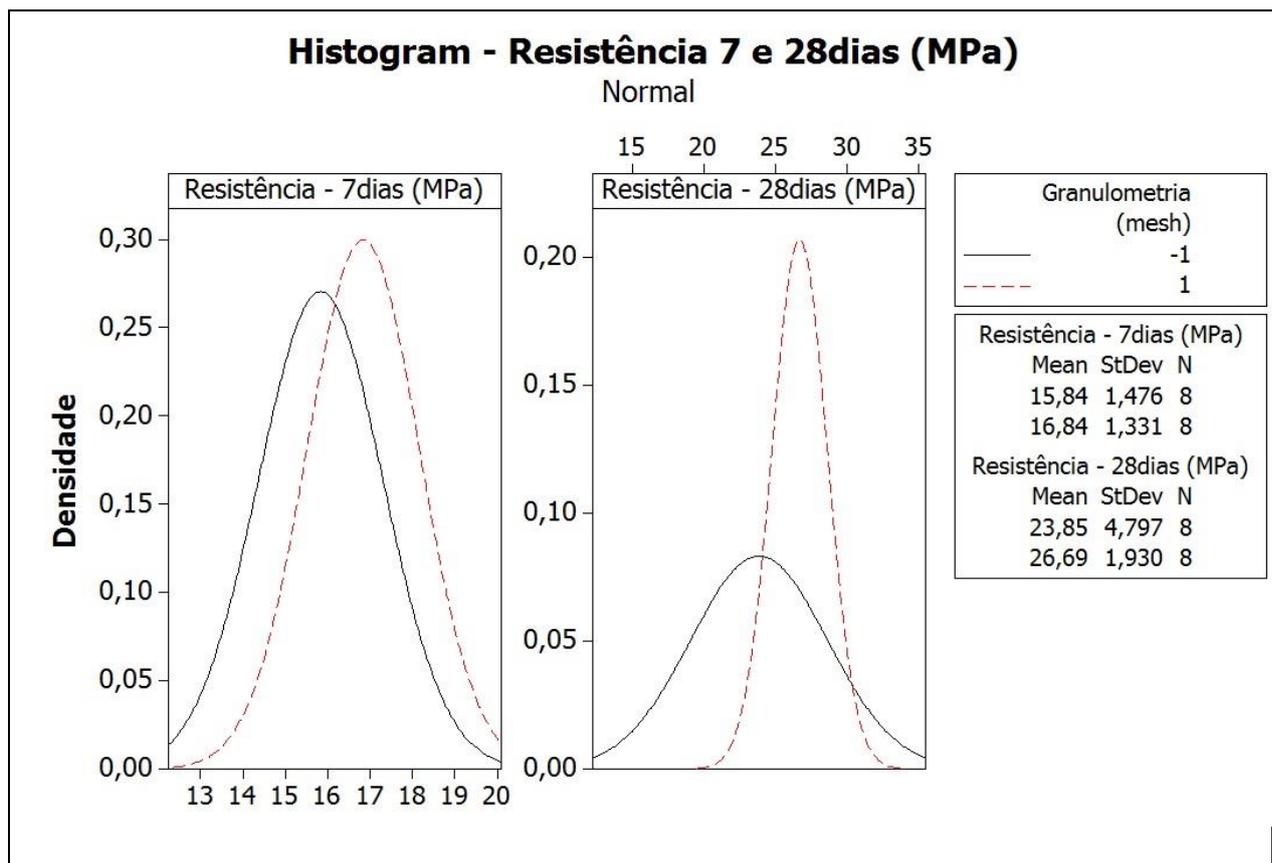
Fonte: o autor

Analisando os resultados de resistência mecânica em função da granulometria do vidro incorporado após 7 dias, conforme *histograma* da Figura 17, pode-se observar que existiu uma tendência da resistência mecânica aumentar com o aumento da granulometria. De forma geral, observou-se a ocorrência um deslocamento lateral do histograma da resistência após 7 dias quando ocorreu o aumento da granulometria (de fina para grossa), com sutil incremento do valor médio da resistência mecânica, saindo de 15,84 MPa (granulometria fina) para 16,84 MPa (granulometria grossa). Observou-se que a dispersão dos resultados foi similar. Os resultados de resistência após 7 dias sugeriram que um aumento da granulometria (de fina para grossa) proporcionou um incremento da resistência mecânica.

Ao serem analisados os resultados de resistência mecânica em função da granulometria do vidro incorporado após 28 dias, conforme *histograma* da Figura 17, observou-se um comportamento semelhante àquele observado para a condição de

teste após 7 dias, ou seja, um aumento da granulometria (de fina para grossa) também proporcionou um incremento do valor médio da resistência mecânica, saindo de 23,85 MPa para 26,69 MPa. Para este caso, no entanto, observou-se que a dispersão dos resultados foi maior para a condição em que foi utilizada uma granulometria fina.

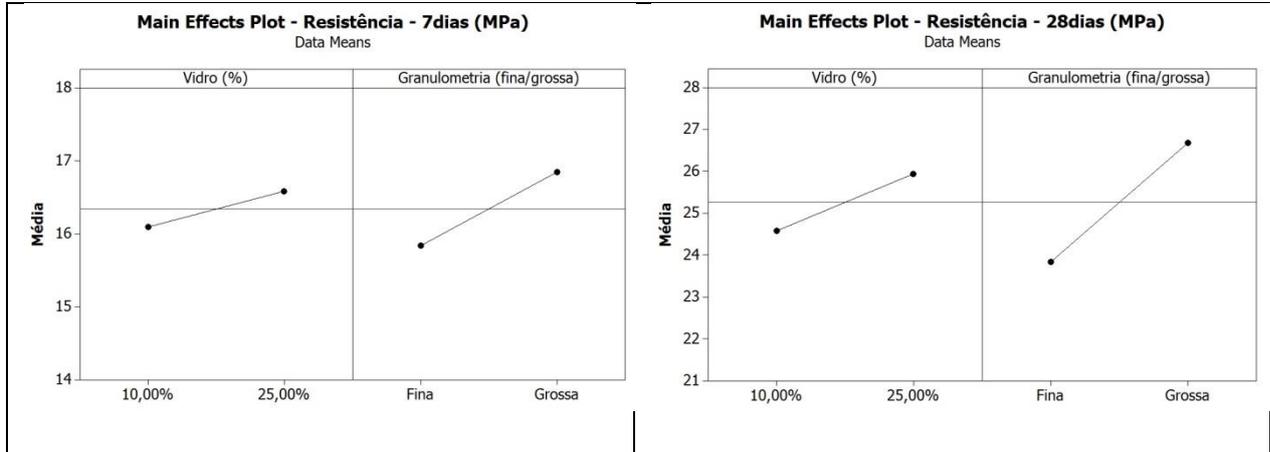
Figura 17 – Histogramas da resistência mecânica em função da granulometria após 7 e 28 dias (nível -1, fina; nível +1, grossa).



Fonte: o autor

Os gráficos da Figura 18 evidenciaram o efeito principal das variáveis investigadas na resistência mecânica em função da incorporação de vidro após 7 e 28 dias. Os resultados apresentados na figura 18 representam o comportamento médio para cada uma das condições de teste. Observou-se que o aumento do percentual de vidro incorporado proporcionou um incremento na resistência mecânica, assim como um aumento da granulometria do vidro.

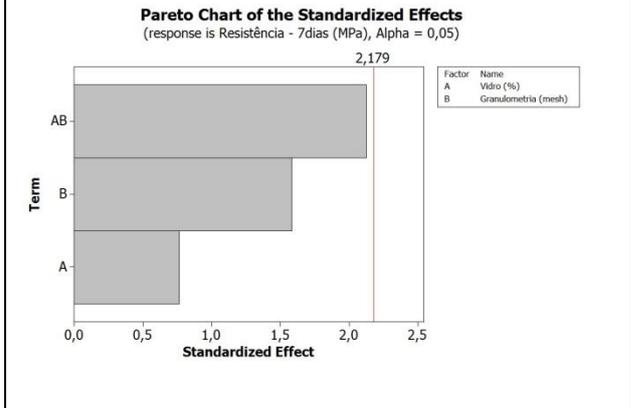
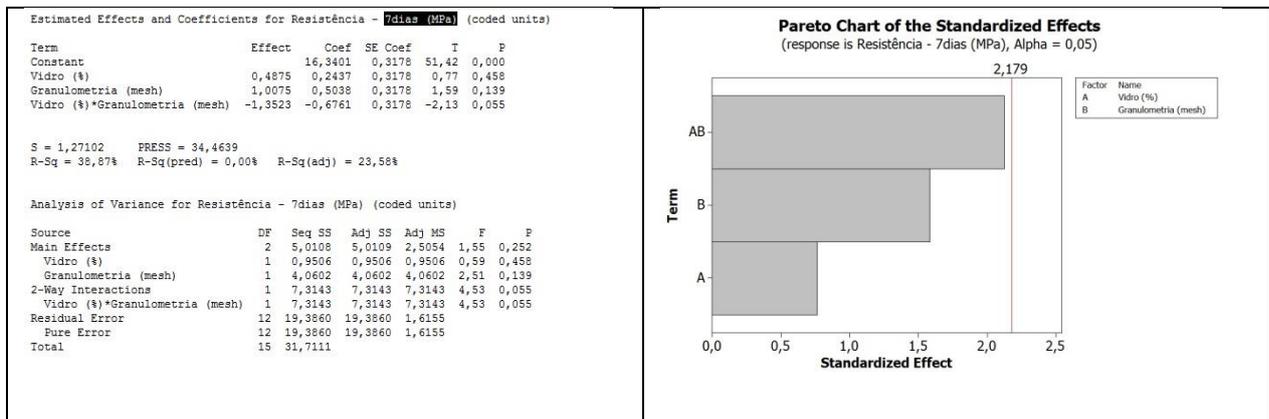
Figura 18 - Gráficos do efeito principal das variáveis investigadas (*Main Effect Plot*) evidenciando a resistência mecânica após 7 e 28 dias em função da granulometria (Nível -1, fina e Nível +1, grossa) e % vidro incorporado (Nível -1, 10% e Nível +1, 25%).



Fonte: o autor

Efetuada-se uma análise da variância dos efeitos individuais e combinados das variáveis investigadas nos resultados de resistência após 7 dias, conforme Figura 19, observou-se através do valor do fator “P” que o percentual de vidro incorporado, representado na figura por “*Vidro(%)*”, e a granulometria do vidro incorporado, representado na figura por “*Granulometria(mesh)*”, apresentaram resultados inferiores a 0,05. Portanto, não podem ser considerados como variáveis que individualmente ou exclusivamente apresentam influência no resultado de resistência mecânica do material. Analisando a interação entre estas variáveis, representada na figura por “*Vidro(%) * Granulometria(mesh)*”, observou-se, também, resultado inferior a 0,05, ou seja, a interação entre as variáveis também não apresentou influência exclusiva e estatisticamente relevante no resultado de resistência mecânica, embora no gráfico de Pareto da figura a interação, representada por “*AB*”, tenha proporcionado a maior contribuição.

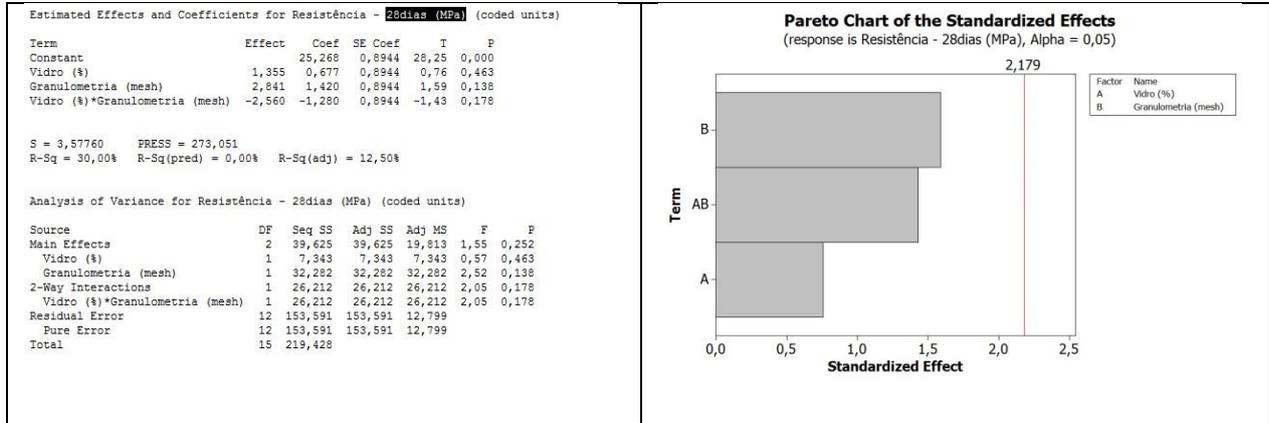
Figura 19 - Análise da variância dos efeitos individuais e combinado das variáveis investigadas nos resultados de resistência mecânica após 7 dias e gráfico do tipo Pareto dos efeitos padronizados evidenciando a contribuição de cada variável investigada e sua interação.



Fonte: o autor

Ao realizar uma análise da variância similar nos resultados de resistência após 28 dias, conforme Figura 20, observou-se através do valor do fator “P” um comportamento similar àquele observado para os resultados após 7 dias, ou seja, resultados inferiores a 0,05, permitindo concluir que as variáveis individualmente ou exclusivamente não poderiam ser considerados como variáveis que apresentam influência no resultado de resistência mecânica do material. De forma similar para a interação entre estas variáveis, observou-se um resultado inferior a 0,05, ou seja, a interação entre as variáveis também não apresentou influência exclusiva e estatisticamente relevante no resultado de resistência mecânica, embora no gráfico de Pareto da figura a interação, representada por “AB”, tenha proporcionado a maior contribuição.

Figura 20 - Análise da variância dos efeitos individuais e combinado das variáveis investigadas nos resultados de resistência mecânica após 28 dias e gráfico do tipo Pareto dos efeitos padronizados evidenciando a contribuição de cada variável investigada e sua interação.



Fonte: o autor

Estas análises, conforme Figuras 19 e 20, possibilitam concluir, de forma estatística, que a incorporação de vidro e o aumento da granulometria do vidro não podem ser considerados relevantes individualmente e como fatores preponderantes exclusivos para o incremento da resistência no presente estudo. No entanto, deve-se lembrar que existe, sim, uma tendência de aumento dos resultados de resistência com o aumento do teor de vidro incorporado e com o aumento da granulometria do vidro.

As Conclusões após as análises estatísticas divergiram da literatura, provavelmente devido à matéria prima ser proveniente de uma unidade fabril onde há um controle de qualidade e beneficiamento de desse material, diferentemente dos anteriormente estudado, que se obteve esse insumo proveniente principalmente de reciclagens de garrafas.

10 CONCLUSÕES

É extraordinário que o vidro conserva a competência de nos propiciar diversos resultados à medida que se desenvolvem análise e produtos que se possam acrescentar à mistura do concreto em substituição às matérias primas tradicionais com a finalidade de buscarmos alternativas conservando nossas jazidas e atribuindo utilização apropriada e de valor à geração de resíduos, esse estudo nos mostra a viabilidade do uso do vidro observando os fatores que trouxeram ganhos não só para o concreto mais para o meio ambiente por sua redução de matérias primas naturais usadas em sua fabricação, reduzindo o consumo de areia e cimento.

Juntamente com os ganhos na qualidade, pelo o aumento da resistência do produto; tem-se também a diminuição de custos na produção do mesmo, pois pode ser reduzidos dois dos mais caros insumos do concreto:

1. Reduzir o consumo de cimento no concreto, esse que é o insumo mais oneroso de todos os seus componentes, devido ao aumento de resistência;
2. Diminuir custos de transportes do concreto e seus insumos, pois sendo o concreto um dos produtos mais consumidos no mundo, torna-se viável ter as fontes de seus insumos em localizações estratégicas e mais próximo dos grandes centros consumidores

Observou-se que o aumento do percentual de vidro incorporado proporcionou um incremento na resistência mecânica, assim como um aumento da granulometria do vidro. Por fim, as análises estatísticas possibilitam concluir, de forma estatística, que a incorporação de vidro e o aumento da granulometria do vidro não podem ser considerados relevantes individualmente e como fatores preponderantes exclusivos para o incremento da resistência no presente estudo. No entanto, deve-se lembrar que existe uma tendência de aumento dos resultados de resistência com o aumento do teor de vidro incorporado e com o aumento da granulometria do vidro.

Dessa forma, mais estudos podem e necessitam ser realizados de forma mais ampla, utilizando teores e proporções diferentes otimizando seus resultados, destacando a importância do mesmo para o meio ambiente, a sociedade e a economia; que são fatores importantes para garantir um crescimento de forma sustentável, inserindo assim o vidro dentre os materiais que podem amenizar

impactos causados pela fabricação desse material de extrema importância para o desenvolvimento da humanidade.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALECRIM, José Duarte (1982). Recursos minerais do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: METAMIG.

Anais Do 53º Congresso Brasileiro Do Concreto - Cbc2011 – 53cbc

Ângelo Just da Costa e Silva (1); Rodrigues Barbosa (2); João Manoel F. Mota (3); João Ribeiro de Carvalho (4)

ANTONY, J. Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner. **Sensor Review**. Vol. 26, n. 3, 227–230, 2006.

ASILTURK, I., AKKUS, H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. **Measurement**, v. 44, p. 1697–1704, 2011.

CHIOSSI, Nivaldo José (1979). Geologia aplicada à Engenharia; 2ª ed.; 1979; págs. 103 – 110.

D. A. R López, C. A. P. de Azevedo, E. Barbosa – Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro moído como agregado fino

Eládio G.R. Petrucci – Materiais de Construção

Elliot Vieira Veras Santiago De Melo; João Roberto Do Nascimento Filho - Estudo De Caso: Utilização Do Vidro Como Agregado

FREITAS, A. P. B. R.; LOURES, L. V. F.; LOURES, C. C. A.; SANTOS, M. A. R.; RICARDO, G. D. R.; MARINS, F. A. S.; SANTOS, H. T. L.; SAMANAMUD, G. L.; AMARAL, M. S.; SILVA, M. B. **Taguchi Method Applied to Environmental Engineering, Design of Experiments - Applications**, Dr. Messias Silva (Ed.), InTech, 2013.

GUNASEGARAM, D. R., FARNSWORTH, D. J., NGUYEN, T. T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments. **Journal of materials processing technology**, v. 209, p. 1209–1219, 2009.

LOPES, A. A. P. **Uma Análise Emparelhada entre Delineamento de Experimentos Clássico e de Taguchi**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção. Itajubá, 2008.

MATTOS, V. L. D. **Identificação de efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MONTGOMERY D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**, 5ª ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2012.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, 5 ed., 699p., 2001.

MONTORO, S. R.; MEDEIROS, S. F.; SANTOS A. M.; SILVA, M. B.; TEBALDI, M. L. **Application of 2^K Experimental Design and Response Surface Methodology in the Optimization of the Molar Mass Reduction of Poly (3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate) (PHBV)**, Design of Experiments - Applications, Dr. Messias Silva (Ed.), InTech, 2013.

NBR 11581 – Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega

NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto,

NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

NBR 7211 – Agregados para Concreto – Especificação

NBR 7214 – Areia Normal para Ensaio de Cimento

NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação de massa unitária

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (2002). Geologia de Engenharia, 1ª ed., 3ª reimpressão. São Paulo, p. 331.

OZBAY, E., OZTAS, A., BAYKASOGLU, A., OZBEBEK, H. Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 694-702, 2009.

PAIVA, E. J. **Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Baseada em Índices de Capacidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 118f., 2008.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**, 2ª Ed. Editora Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, Campinas, 2009.

ROSA, J. L.; ROBIN, A.; SILVA, M.B.; BALDAN, C. A.; PERES, M. P. Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi Experimental Design Approach. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 1181-1188, 2009.

ROSS, P. J. **Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade**. Editora Makron, McGraw-Hill. São Paulo, 1991.

ROY, R. K. **Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement**. New York: John Wiley & Sons, 538p., 2001.

SENTHILKUMAR, R.; VAIDYANATHAN, S.; SIVARAMAN, B. Thermal analysis of heat pipe using Taguchi Method. **International Journal of Engineering Science and Technology**, Vol.2 (4), 2010, 564-569.

SHARMA, P., VERMA, A.; SIDHU, R. K.; PANDEY, O. P. Process parameter selection for strontium ferrite sintered magnets using Taguchi L9 orthogonal design. **Journal of Materials Processing Technology**, p.147-151, 2005.

TAGUCHI, G.; KONISHI, S. **Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs**. American Supplier Institute, 1987.

WERKEMA, M. C. C., AGUIAR, S. **Otimização estatística de processos: Como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria**. Belo Horizonte, MG. Fundação Christiano Ottoni, Escola de engenharia da UFMG, 331p., 1996.

ZHOU, J.; WU, D.; GUO, D. Optimization of the production of thiocarbonylhydrazide using the Taguchi method. **Journal Chemical Technology and Biotechnology**, v. 85, Issue 10, p. 1402–1406, 2010.

METWALLY, IBRAHIM M. **Investigations on the Performance of Concrete Made with Blended Finely Milled Waste Glass**, Article in *Advances in Structural Engineering* 10(1):47-53 . United Kingdom, Brunel University London. January 2007

M. ADAWAY & Y. WANG. **Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength**, School of Engineering, Deakin University, Waurn Ponds, Australia -: *Electronic Journal of Structural Engineering* 14(1) 2015