



Fundação Oswaldo Aranha
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
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

Aluno: Cristiano Augusto Manhães Silveira
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

MOTIVAÇÃO E PROPOSTA DO TRABALHO

- ➔ O Brasil produz em média 800 mil toneladas de vidro por ano;
- ➔ Desse total 220.000 t/ano são recicladas, o que corresponde a 27,6% do total gerado;
- ➔ A quantidade de vidro descartado no lixo corresponde a 3% do total;

MOTIVAÇÃO E PROPOSTA DO TRABALHO

- ➔ O principal mercado para a sucata de vidro 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 limitantes como impurezas, custos de transporte proibitivos e mistura de sucatas de cores diferentes que são difíceis de serem separadas;

MOTIVAÇÃO E PROPOSTA DO TRABALHO

- ➔ O uso de outros materiais no concreto, na forma de agregados fino ou grosseiro já foi estudado por vários pesquisadores. Alguns desses materiais são adicionados com o intuito de melhorar as características mecânicas dos concretos como a sílica, misturas de materiais pozolânicos, cinzas, pó de basalto, escórias, etc;
- ➔ Outros simplesmente são adicionados para utilizar a capacidade de encapsulamento do concreto, que por sua vez pode estar destinada à diminuição da periculosidade do material agregado ou diminuição da quantidade de material destinado ao aterro;

MOTIVAÇÃO E PROPOSTA DO TRABALHO

- ➔ O uso de vidro já foi estudado e atualmente existem países utilizando este material como agregado fino no concreto. A Austrália, por exemplo, já utiliza o vidro moído proveniente do lixo em concretos para construção;
- ➔ Foram apresentadas recomendações para o uso deste material em concretos no estado de Nova York. No Brasil, esta forma de valorização desse recurso é pouco utilizada, uma vez que o aterro é uma opção muito barata e a disponibilidade de matéria-prima para materiais de construção é abundante.

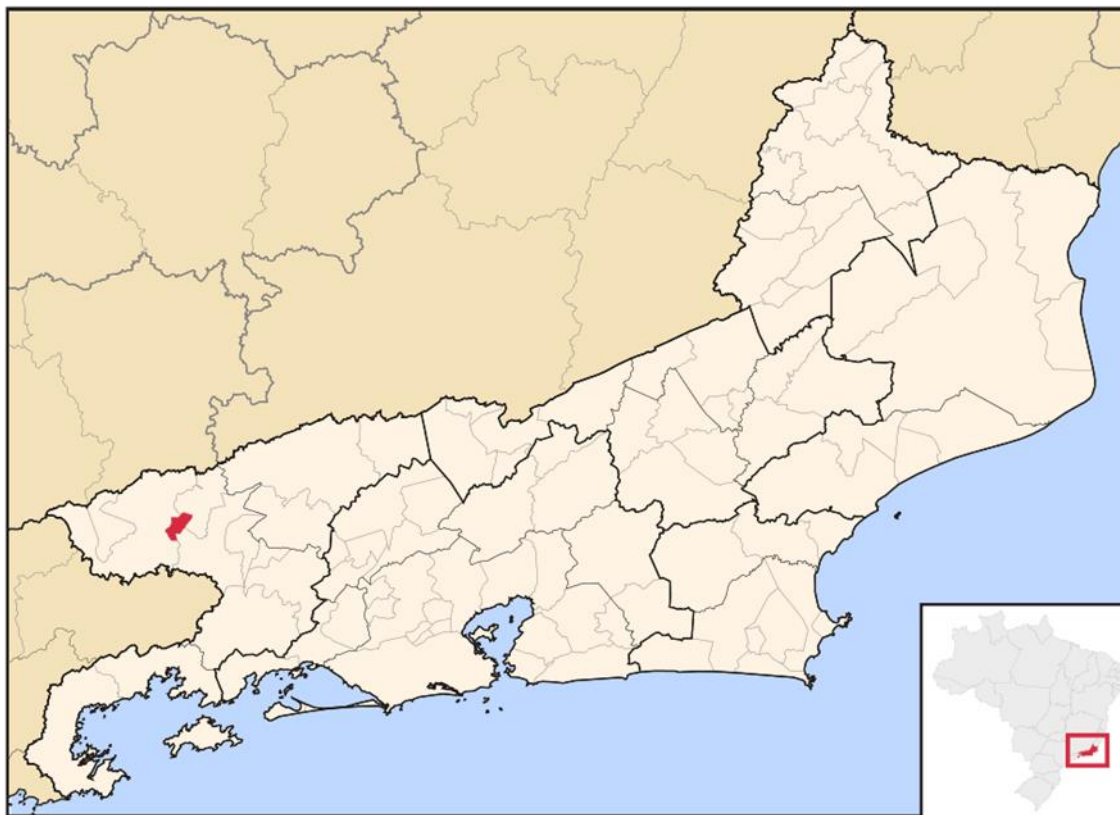
OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta dissertação de mestrado envolve o estudo 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 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.

OBJETIVO ESPECÍFICO

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 substitucional, porém regionalmente, devido logística favorecida e abundância do material estudado e grande potencial de consumo, pois estamos localizados no meio do eixo Rio-São Paulo e em crescente desenvolvimento industrial, populacional e humano

OBJETIVO ESPECÍFICO



Localização do município de Porto Real em relação ao Estado do Rio e
São Paulo

REVISÃO DA LITERATURA

- Segundo Dyer e Dhir (2001), sendo o vidro um material amorfo e contendo uma grande quantidade de silício e cálcio, torna o material, em teoria, pozolânico.
- Polley et al. (1998), por exemplo, pesquisaram o uso de vidro reciclado como substituto do agregado fino (areia) no concreto. Os resultados dessa pesquisa indicaram que o vidro é um substituto satisfatório para agregados naturais finos em níveis de até 20% do agregado total em granulometrias variando entre 0,075 e 1,5 mm, com resistências à compressão compatíveis com concretos do mesmo traço sem adição de vidro;

REVISÃO DA LITERATURA

- Shao et al. (2000) 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 0,15 mm.
- Esses autores verificaram que o concreto produzido com a adição de vidro finamente moído ($<75 \mu\text{m}$) tinha suas propriedades mecânicas melhoradas em função de reações pozolânicas. Para faixas mais grosseiras, o concreto produzido apresentava problemas de aumento de volume gerados pela reação álcali/sílica.

REVISÃO DA LITERATURA

⇒ Dyer e Dhir (2001) também verificaram a influência destes 2 parâmetros. Eles afirmam que o elevado conteúdo de sódio e silício do vidro implica na possibilidade de que o concreto sofra uma reação álcali/sílica, o que faz com que o concreto se expanda durante a mesma;

REVISÃO DA LITERATURA

- ➔ Babu e Prakash (1995) constataram que o vidro pode influenciar a qualidade do concreto por outros efeitos que não o pozolânico e o da reação álcali/sílica. Eles constataram que os efeitos benéficos da adição do vidro estavam relacionados ao preenchimento de vazios entre os grãos do agregado fino (melhora do empacotamento das partículas).

REVISÃO DA LITERATURA

- ➔ Segundo outros trabalhos encontrados na literatura, o efeito pozolânico aconteceria com vidros de granulometria fina ($<75 \mu\text{m}$), uma vez que as partículas finas favorecem uma rápida e benéfica reação pozolânica;
- ➔ Para vidros com granulometria grosseira ($> 0,75 \text{ mm}$), a reação álcali/sílica aconteceria preferencialmente.

REVISÃO DA LITERATURA

➔ Planejamento de experimentos

- ☒ Necessidade da otimização de produtos e processos;
- ☒ DOE (*Design of Experiments*);
- ☒ Taguchi (arranjo ortogonal, ANOVA, MSR)

➔ Vantagens:

- ☒ Redução do número de experiências ou repetições;
- ☒ Os fatores podem ser analisados simultaneamente;
- ☒ É possível otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo;
- ☒ Cálculo e avaliação do erro experimental (confiança estatística).

MATERIAIS

⇒ Cimento

- ☒ CP III-40 RS da Votorantim;
- ☒ Foi doado gentilmente pela UniFOA.

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%

MATERIAIS

➔ Cimento

- ☒ CP III-40 RS da Votorantim;
- ☒ Foi doado gentilmente pela UniFOA.

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

MATERIAIS

⇒ 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.
- ☒ Foi doado pela empresa Guardian Vidros Planos S.A., localizada na cidade de Porto Real- RJ;

MATERIAIS

➔ Resíduo de vidro



MATERIAIS

⇒ Resíduo de vidro

Características da areia artificial – pó de vidro

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

MATERIAIS

➔ Demais insumos utilizados

Areia;

Brita;

Todos esses insumos foram gentilmente fornecidos pela UniFOA, por intermédio do curso de Engenharia Civil.

MATERIAIS

⇒ Demais insumos utilizados

Características da areia natural e brita 1

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

ARRANJO EXPERIMENTAL

⇒ **Matriz Ortogonal de Taguchi L_4**

- ☒ 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 a seguir.

ARRANJO EXPERIMENTAL

⇒ **Matriz Ortogonal de Taguchi L_4** ☒ Matriz Ortogonal L_4 **Matriz ortogonal de experimentos de Taguchi L_4 .**

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

A: Granulometria do vidro (Mesh)**B:** Teor de Vidro (%)

ARRANJO EXPERIMENTAL

⇒ Matriz Ortogonal de Taguchi L₄

☒ Parâmetros estudados

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

ARRANJO EXPERIMENTAL

⇒ **Famílias de concretos produzidas**

- ☒ A tabela a seguir apresenta as quatro famílias de concretos que foram produzidas neste estudo.

ARRANJO EXPERIMENTAL

⇒ Famílias de concretos produzidas

Características das famílias de concretos 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)

ARRANJO EXPERIMENTAL

➔ Família de concretos produzida

- ☒ 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;

ARRANJO EXPERIMENTAL

⇒ Família de concretos produzida

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

ARRANJO EXPERIMENTAL

➔ Família de concretos produzida

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	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de resistência do concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

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

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

➔ **Determinação da 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.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

⇒ Determinação da Resistência à Compressão



Fundação Oswaldo Aranha
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Experimento de Resistência com 7 dias

Porcent. 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		

Fundação Oswaldo Aranha
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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	16,14		
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		

Fundação Oswaldo Aranha
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

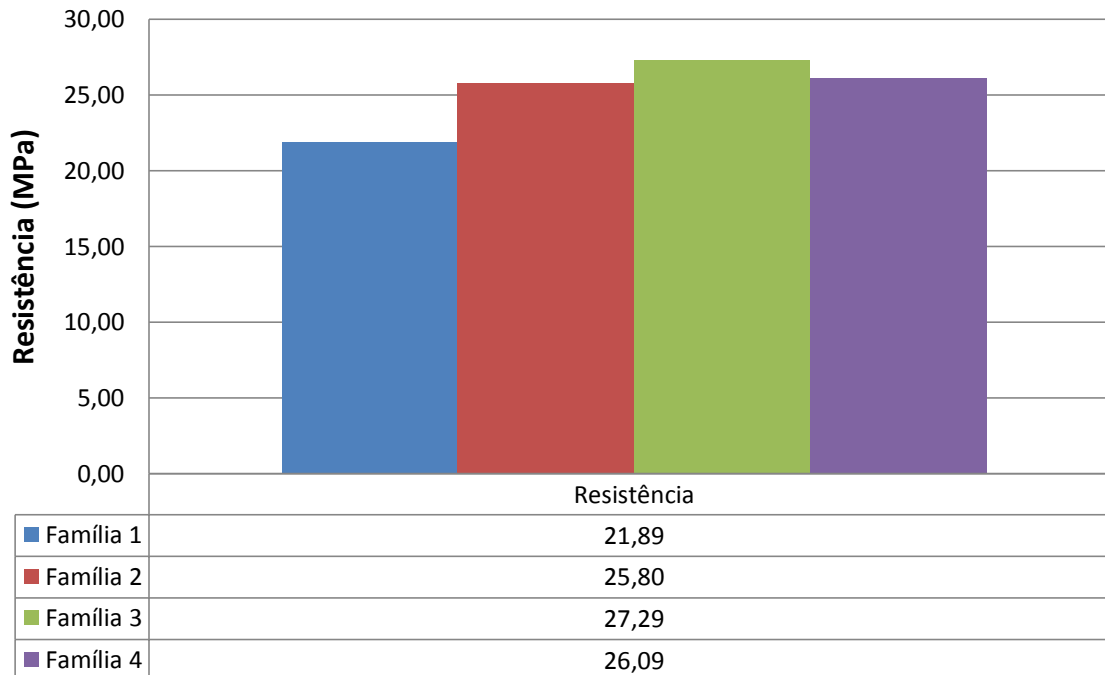
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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

Fundação Oswaldo Aranha
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Comparação dos resultados



DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

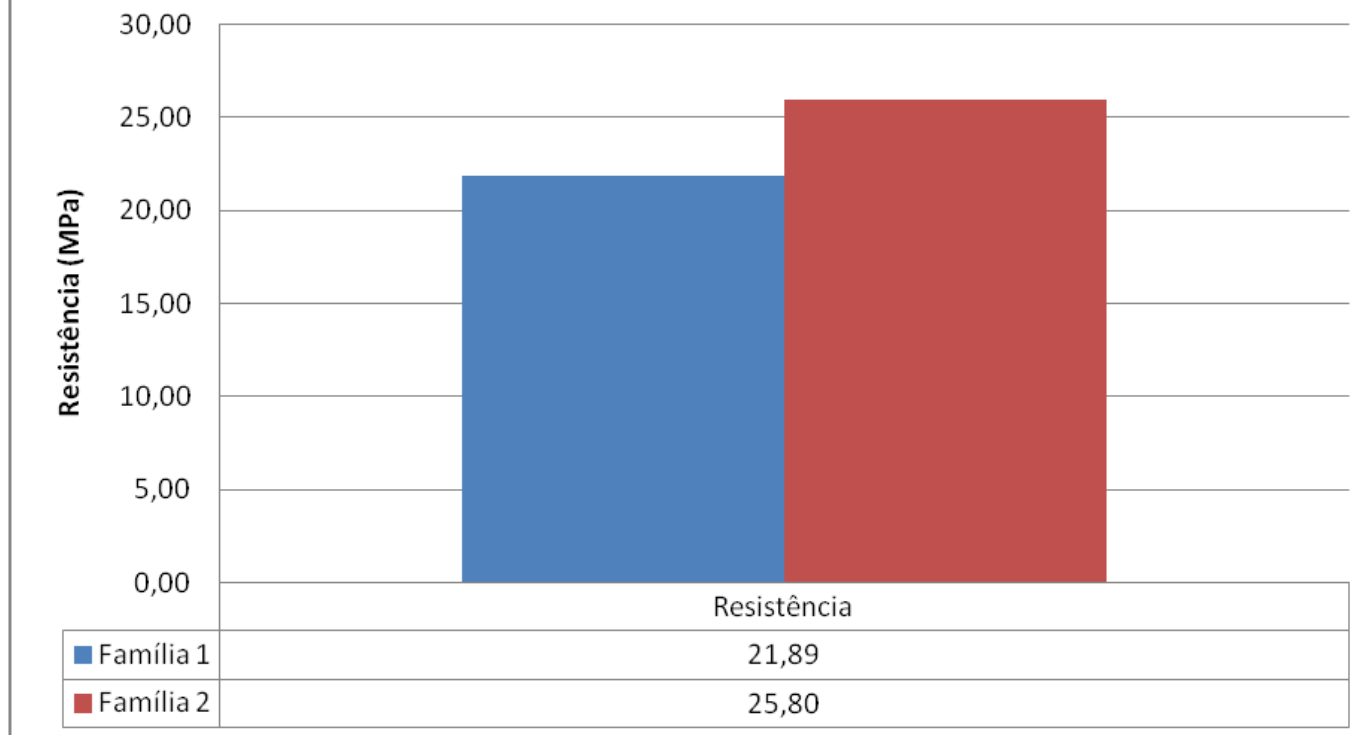
- ☒ Os resultados demonstram que o melhor desempenho foi obtido para a família 3 onde o percentual de pó de vidro na mistura é de 10% e o de areia natural é de 90% e $841\mu\text{m} >30 >40$ Mesh (Mais Grossa);
- ☒ Contudo, as avaliações realizadas também indicam desempenhos satisfatórios para a utilização do pó de vidro em substituição à areia natural, principalmente para a família 2 e 4 onde os teores empregados foram de 25%-75%;

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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

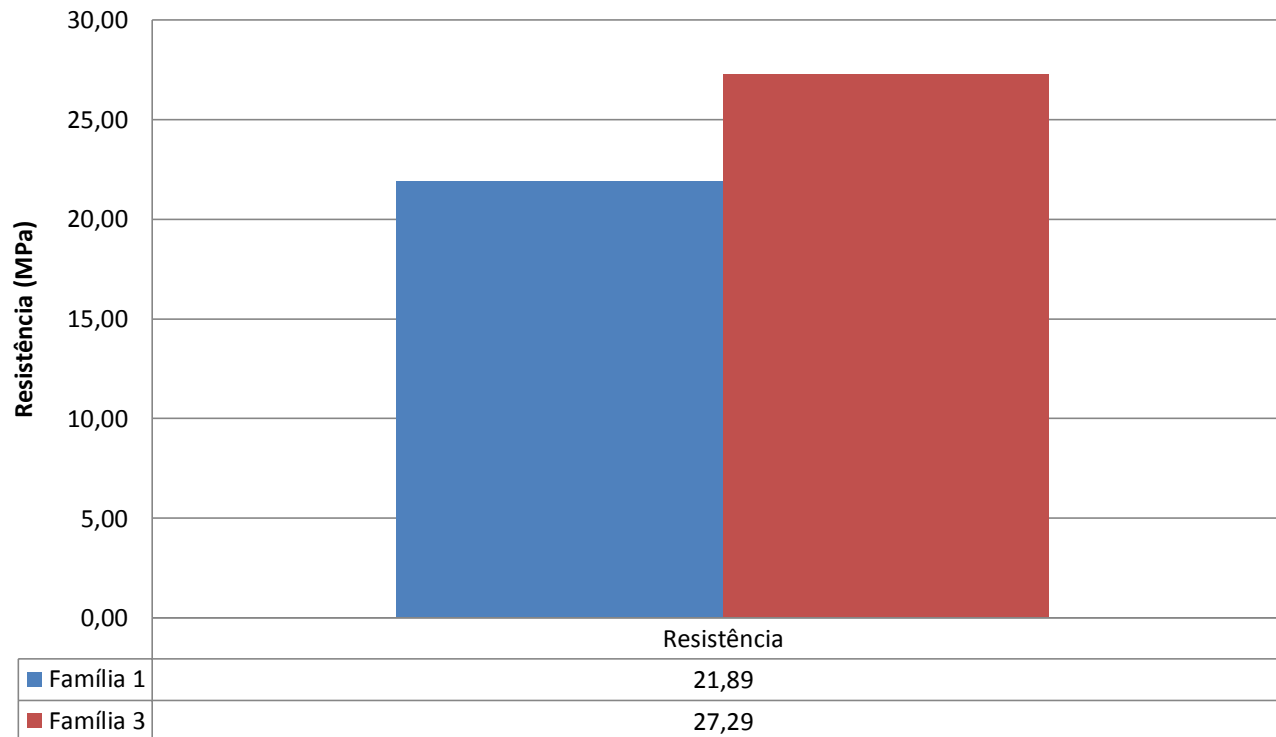
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Comparação dos resultados com a Mesma Granulometria



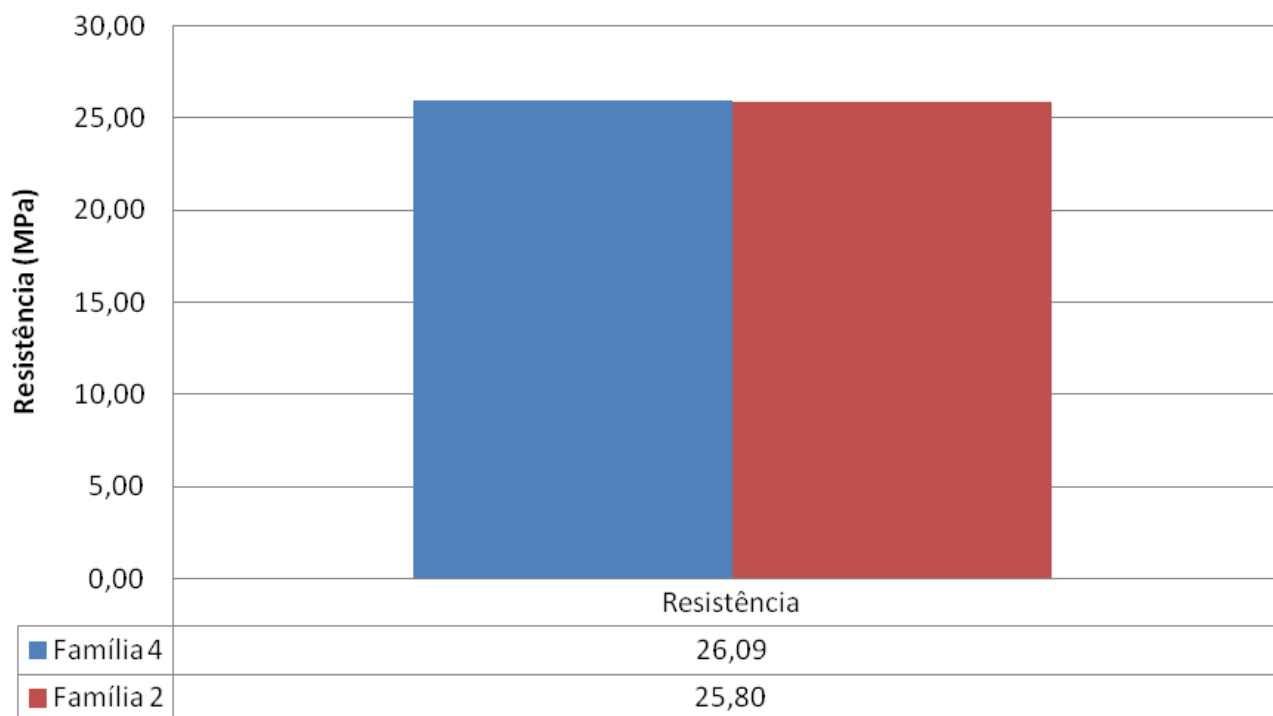
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Comparação dos Resultados com o Mesmo Teor de Vidro (10%)



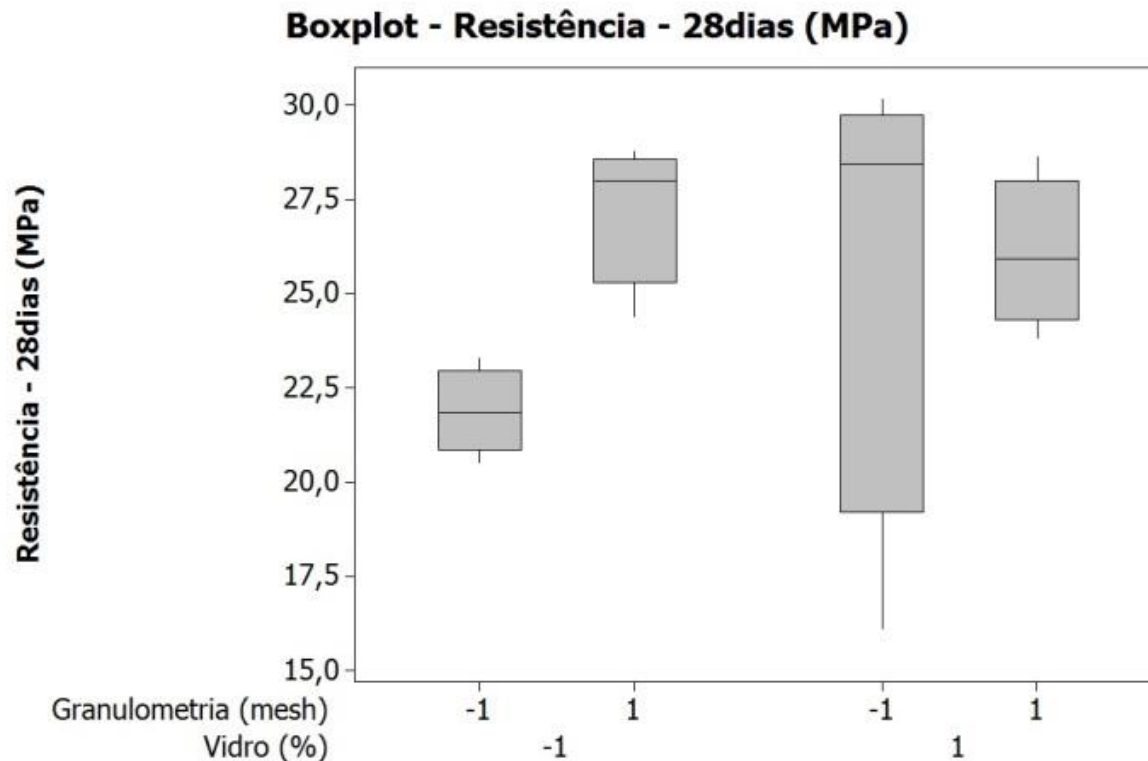
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Comparação dos Resultados com o Mesmo Teor de Vidro (25%)



ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

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

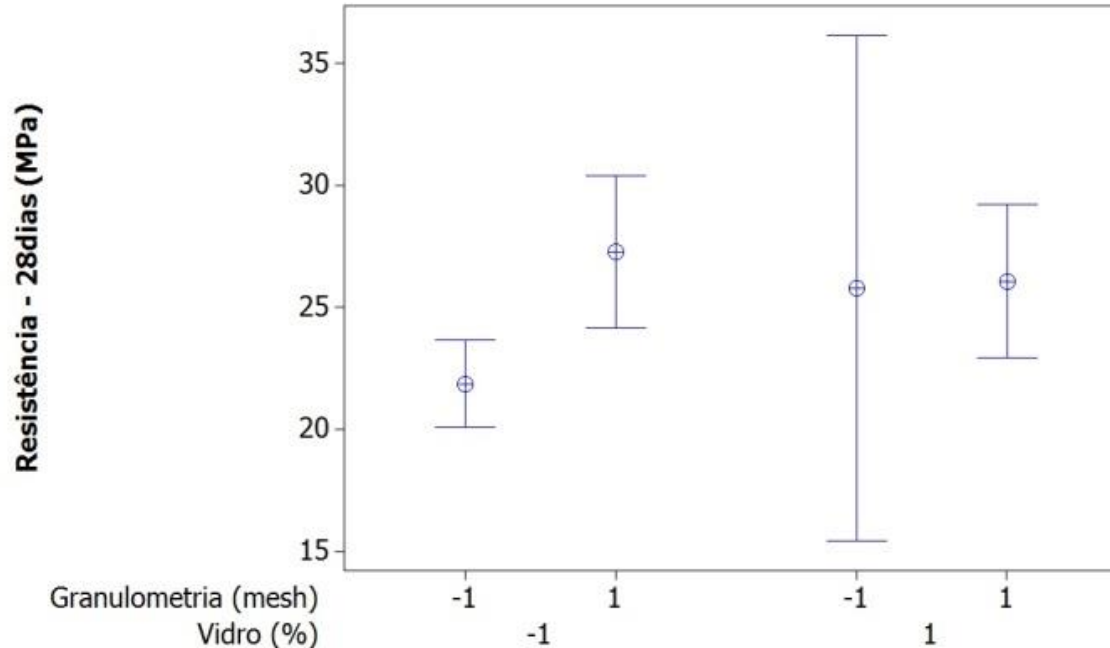


ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

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

Interval Plot - Resistência - 28dias (MPa)

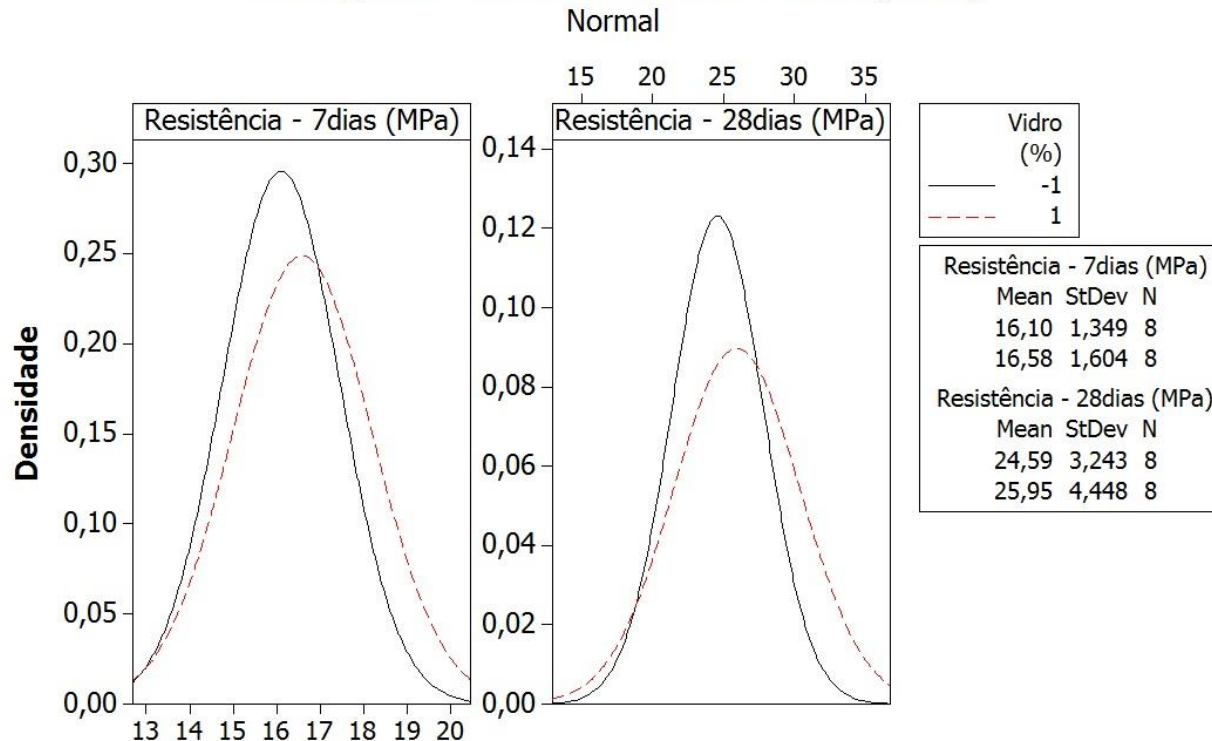
95% CI for the Mean



ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

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

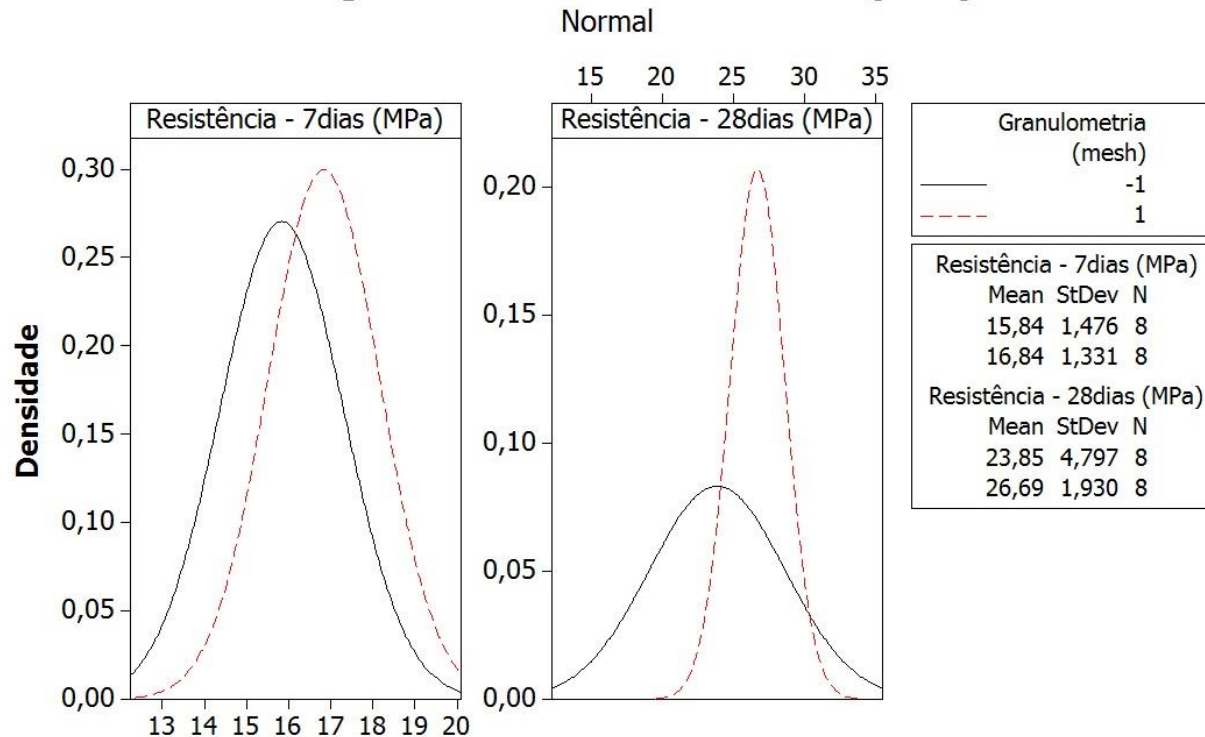
Histogram - Resistência 7 e 28dias (MPa)



ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

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

Histogram - Resistência 7 e 28 dias (MPa)

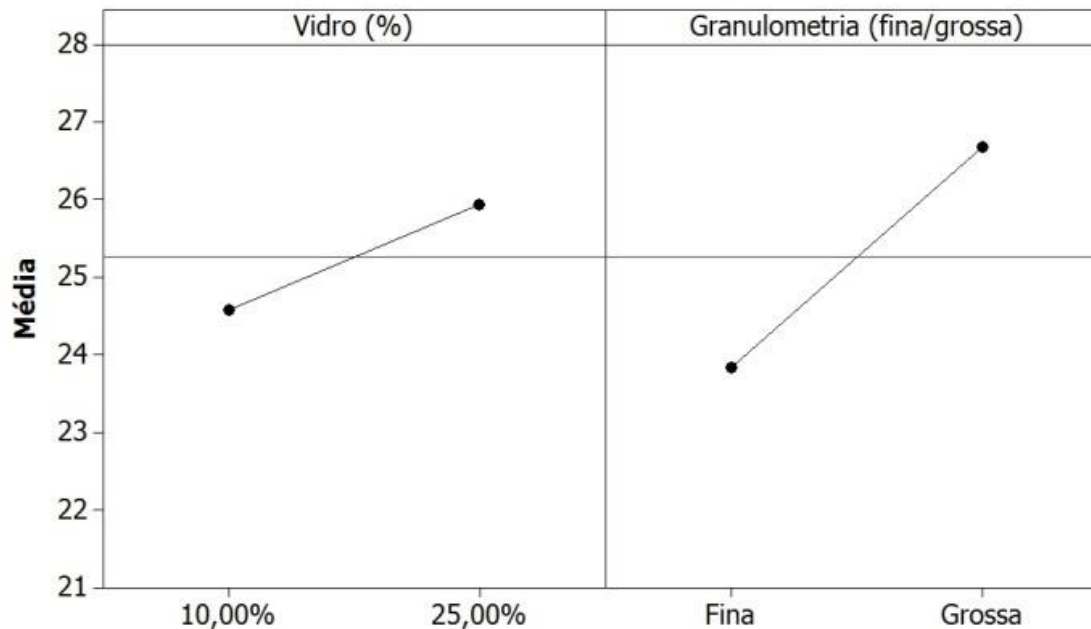


ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

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

Main Effects Plot - Resistência - 28dias (MPa)

Data Means



ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

-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.

Estimated Effects and Coefficients for Resistência - 28dias (MPa) (coded units)

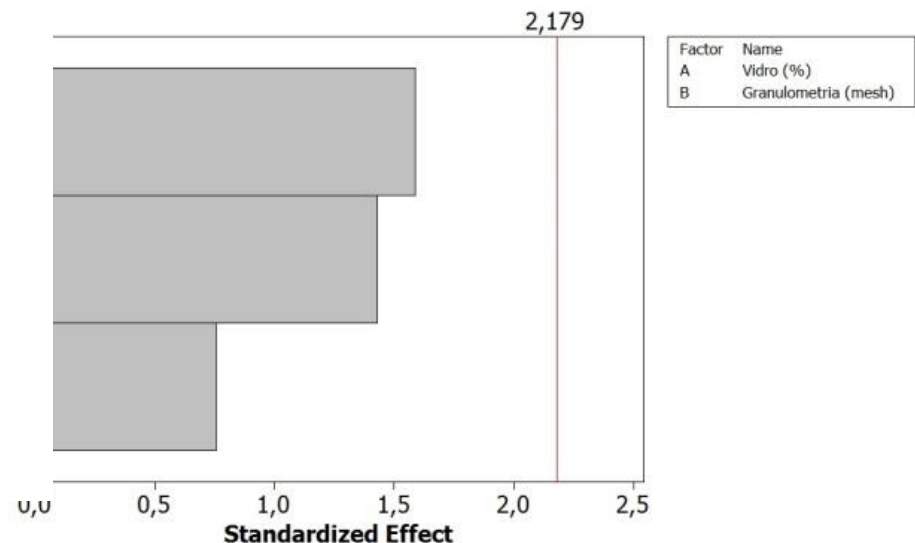
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		25,268	0,8944	28,25	0,000
Vidro (%)	1,355	0,677	0,8944	0,76	0,463
Granulometria (mesh)	2,841	1,420	0,8944	1,59	0,138
Vidro (%)*Granulometria (mesh)	-2,560	-1,280	0,8944	-1,43	0,178

S = 3,57760 PRESS = 273,051
R-Sq = 30,00% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 12,50%

Analysis of Variance for Resistência - 28dias (MPa) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	39,625	39,625	19,813	1,55	0,252
Vidro (%)	1	7,343	7,343	7,343	0,57	0,463
Granulometria (mesh)	1	32,282	32,282	32,282	2,52	0,138
2-Way Interactions	1	26,212	26,212	26,212	2,05	0,178
Vidro (%)*Granulometria (mesh)	1	26,212	26,212	26,212	2,05	0,178
Residual Error	12	153,591	153,591	12,799		
Pure Error	12	153,591	153,591	12,799		
Total	15	219,428				

Pareto Chart of the Standardized Effects
(response is Resistência - 28dias (MPa), Alpha = 0,05)



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;

CONCLUSÕES

- ✓ 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;

CONCLUSÕES

- ✓ Por fim, as análises estatísticas possibilitam concluir, 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.

CONCLUSÕES

- ✓ Se estabelece que 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.

Fundação Oswaldo Aranha
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

OBRIGADO

