

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA (CCN)

Luiz Miguel Faria Ramos

**DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO MATEMÁTICA ENTRE RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO EDENSIDADE FÍSICA DE UM CONCRETO ALTERNATIVO  
EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE RESÍDUO DE ARENITO COMO  
AGREGADO MIÚDO**

Buri

[2022]

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Luiz Miguel Faria Ramos

DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO MATEMÁTICA ENTRE RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO E DENSIDADE FÍSICA DE UM CONCRETO ALTERNATIVO EM FUNÇÃO  
DA PORCENTAGEM DE RESÍDUO DE ARENITO COMO AGREGADO MIÚDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como  
exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de  
São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Jonathan Gazzola

Buri

[2022]

Ramos, Luiz Miguel Faria

DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO MATEMÁTICA ENTRE  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DENSIDADE FÍSICA DE  
UM CONCRETO ALTERNATIVO EM FUNÇÃO DA  
PORCENTAGEM DE RESÍDUO DE ARENITO COMO  
AGREGADO MIÚDO / Luiz Miguel Faria Ramos -- 2022.  
32f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,  
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Jonathan Gazzola

Banca Examinadora: Jonathan Gazzola, Silvestre

Rodrigues, Adilson Machado Enes

Bibliografia

1. Mineração. 2. Areia. 3. Materiais alternativos. I.  
Ramos, Luiz Miguel Faria. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

FOLHA DE APROVAÇÃO

**Luiz Miguel Faria Ramos**

DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DENSIDADE FÍSICA DE UM CONCRETO ALTERNATIVO EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE RESÍDUO DE ARENITO COMO AGREGADO MIÚDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de São Carlos. Buri, 18 de março de 2022.

Orientador(a)



---

Dr. (a) Jonathan Gazzola

Universidade Federal de São Carlos

Examinador(a)



---

Dr.(a) Silvestre Rodrigues

Universidade Federal de São João del-Rei

Examinador(a)



---

Dr.(a) Adilson Machado Enes

Universidade Federal de Sergipe

“Foi um projecto de futuro e que, por ter sido um projecto de futuro, deve continuar a ser um sonho inspirador e um ideal para as gerações vindouras.”

Aníbal Cavaco Silva

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde e condições para realização dessa graduação, também agradeço aos amigos que tive o privilégio de conhecer ao longo desses anos, aos profissionais da área que contribuíram com toda sua experiência para o meu aprendizado, a todos os professores que contribuíram de alguma forma na minha trajetória, ao meu orientador do TCC, Jonathan Gazzola, com suas orientações, dicas e ensinamentos para obter um trabalho de excelência, ao amigo de pesquisa Henrique Shiguemitsu Danno e ao meu pai e avó que sempre me apoiaram nesta trajetória.

## RESUMO

RAMOS, Luiz Miguel Faria Ramos. **Título: Determinação da relação entre resistência à compressão e densidade física de um concreto alternativo em função da porcentagem de resíduo de arenito como agregado miúdo.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, Buri, 2022.

Com o atual desenvolvimento da humanidade, especialmente em centros urbanos o consumo de matérias primas destinadas ao setor civil aumentou proporcionalmente, a fim de se propor a utilização de uma matéria prima alternativa e este trabalho de pesquisa buscou analisar a possibilidade de se determinar se há uma relação matemática da resistência de um concreto alternativo em função do teor de substituição de agregado miúdo convencional por arenito. O arenito usado nesse projeto de pesquisa foi da formação geológica Pirambóia e substituiu parte do agregado nas porcentagens de 0%, 15%, 30%, e 50% em relação ao volume total de areia. Foram realizados ensaios para determinação de densidade física e compressão axial, segundo a NBR 5739. Com os resultados dos ensaios, foi possível determinar três equações de predição do comportamento de resistência do concreto sustentável de acordo com a porcentagem de arenito usada como agregado miúdo, sendo estas, duas equações de grau 1 e 2. Também foram observadas relações matemáticas entre a densidade física e a resistência à compressão. A importância desse trabalho se deve na otimização do uso de arenito na mistura de concreto de acordo com a sua empregabilidade.

Palavras-Chave: Mineração; Areia ; Materiais alternativos; Desenvolvimento Civil; Mitigação de Danos.

## ABSTRACT

RAMOS, Luiz Miguel Faria Ramos. **Title: Determination of the relationship between compressive strength and physical density of an alternative concrete as a function of the percentage of sandstone residue as fine aggregate.** 2022. Course Completion Work. Federal University of São Carlos, Lagoa do Sino campus, Buri, 2022.

This research work sought to analyze the possibility of determining if there is a mathematical relationship of the strength of an alternative concrete as a function of the replacement content of fine aggregate by sandstone, based on the replacement of part of the conventional fine aggregate (sand) by sandstone. The sandstone used in this research project was from the Pirambóia geological formation and substituted part of the aggregate in percentages of 0%, 15%, 30%, and 50% in relation to the total volume of sand. The percentages of 10%, 20% and 40% could not be made due to the UFSCar laboratories being paralyzed by the COVID-19 pandemic. Tests were performed to determine physical density and axial compression, according to NBR 5739. With the test results, it was possible to determine three prediction equations for the strength behavior of sustainable concrete according to the percentage of sandstone used as fine aggregate, being these two equations of grade 1 and 2. Mathematical relationships between physical density and compressive strength were also observed. The importance of this work is due to the optimization of the use of sandstone in the concrete mixture according to its employability.

Key words: Mining; Sand; Non-Conventional Materials; Civil Development; Damage Mitigation

## Lista de Gráficos

Gráfico 1- Variação da Densidade e Resistência Característica dos Corpos de Prova. ....	19
Gráfico 2- Resistência em função da porcentagem de resíduo.....	20
Gráfico 3- Resistência em função da massa aparente dos corpos de prova. ....	21
Gráfico 4 - Resistência em função da massa aparente dos corpos de prova para Curva de Ajuste de Grau 2 .....	22
Gráfico 5- Massa aparente em função da porcentagem de resíduo .....	23
Gráfico 6 - Massa aparente em função da porcentagem de resíduo .....	24

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3. METODOLOGIA .....	14
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	18
5. CONCLUSÕES.....	24
6. PROJETOS FUTUROS .....	25
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	26

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a destinação e o reaproveitamento de resíduos é cada vez maior em todos os setores da sociedade. No que diz respeito aos setores das engenharias civil e ambiental, há uma constante busca por processos sustentáveis que não gerem resíduos ou, na impossibilidade disto, que os reaproveitem em outros processos. Dentre eles destaca-se a mineração voltada para a engenharia civil com seu alto índice de produção de resíduos e, dependendo de sua natureza, há a necessidade de estudos acerca da empregabilidade do mesmo na área (CORREIA et al, 2011).

As cidades são o principal ponto de partida e de maior impacto ambiental e, de acordo com a instituição *Global Urban Development* (2010) mais da metade da humanidade vive nas cidades, sendo responsável pela produção de 85% do Produto Interno Bruto mundial (PIB), do consumo de mais de 75% dos recursos naturais do planeta e da geração de aproximadamente 75% dos resíduos mundiais (BAPTISTA JUNIOR; ROMANEL, 2013). No Brasil, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), 84,36% da população do país vive nas cidades. Como consequência de um crescente desenvolvimento econômico, o Brasil tem se caracterizado por uma alta demanda habitacional, podendo assim alcançar até 50% dos recursos naturais que são destinados a setores da construção civil (BRASILEIRO; MATOS, 2015). De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) o consumo de areia para a construção no ano de 2013 foi da ordem de aproximadamente 378 milhões de toneladas (DNPM, 2015). Os principais impactos ambientais dessa atividade de extração de areia são a geração de resíduos como particulados nos rios, cavas inundadas com mudança do nível freático, alteração paisagística, desmatamento, emissão de particulados atmosféricos resultantes do movimento de caminhões fora de estrada, ruído das máquinas etc. (Luz & Almeida, 2012).

Assim se faz necessário buscar fontes alternativas de matéria prima a serem utilizadas pelas indústrias de construção substituindo os materiais convencionais. Tais pesquisas visam diminuir o impacto ambiental em termos de energia, consumo, poluição, disposição de resíduos e intensificação do aquecimento global (BEHERA et al., 2014). Para haver um equilíbrio nessa relação de oferta-demanda, busca-se encontrar resíduos capazes de substituir de forma eficaz e segura os materiais tradicionalmente usados no concreto e argamassa. Atuando dessa forma, segundo Rocha e Cheriaf (2003), possibilita-se o desenvolvimento de materiais alternativos de baixo custo a partir de subprodutos disponíveis localmente, através da análise das suas potencialidades. O emprego desses

materiais descartados na indústria da construção civil é dado sob duas perspectivas: reutilização (reuso de componentes) e reciclagem (processamento de material descartado na produção de materiais de construção) (DACHOWSKI; KOSTRZEWA, 2016).

Essa busca pela eficiência, para diminuir o consumo de recursos naturais e o consequente impacto ambiental, vem proporcionando ao mercado uma crescente e cada vez mais competitiva busca por produtos sustentáveis, abrindo espaço para organizações criarem um sistema de certificação baseado em selos de qualidade para padronizar e quantificar os níveis de sustentabilidade de uma edificação. A obtenção de um grau elevado nessa certificação, que reflete diretamente os processos e conceitos de sustentabilidade empregados na elaboração do produto, ajuda também o empreendedor a obter maiores taxas de retorno financeiro no empreendimento. Diversas empresas certificadoras patrocinam esses selos, derivados do pioneiro método de avaliação da qualidade da construção civil, o *Research Establishment Environmental Assessment Method* — BREEAM (BALDWIN, 1990), criado no Reino Unido. Depois dele, vários outros selos surgiram, como o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações — PROCEL Edifica (PROCEL, 2003), no Brasil; e o *Leadership in Energy & Environmental Design* — LEED (USGBC, 2008), nos Estados Unidos, sendo este o mais utilizado atualmente no mercado brasileiro.

Essas metodologias de certificação basicamente avaliam a interferência do empreendimento com o entorno, a gestão eficiente da água, a economia e fontes alternativas de energia, materiais e recursos naturais, geração e gestão de resíduos e a qualidade ambiental no interior da edificação, durante as fases de execução e uso. A introdução de edificações certificadas no mercado imobiliário, por incrementarem e difundirem atitudes socioambientais corretas, por diretamente reduzirem a demanda de recursos naturais no empreendimento e, indiretamente, por influenciarem os demais fornecedores de produtos e serviços em relação a critérios e conceitos de sustentabilidade promove no setor uma nova percepção da construção civil, reinventando-a (BAPTISTA JUNIOR; ROMANEL, 2013).

Segundo um estudo realizado por CORDEIRO (2019), o qual se deu pela substituição de agregado miúdo por resíduos cerâmicos, após 28 dias de cura dos corpos de prova de 0%, 10%, 20% e 30% os resultados acurados foram 24,73 MPa, 20,83 MPa, 19,93 MPa e 21,40 MPa, respectivamente, assim, a aglomeração dos grãos pode ter sido interferido pela forma angular do agregado reciclado.

Silva *et al.* (2021) em um estudo também de substituição de agregado miúdo ,

identificou que para o arenito botucatu quando substitui 30% do agregado convencional temos um cumprimento da NBR 12655/2006 , ou seja , assim como o arenito pirambóia , estudado neste trabalho o arenito proveniente da formação Botucatu certamente também pode ser aplicado como agregado miúdo em concretos convencionais.

Este trabalho de conclusão de curso busca analisar a utilização do resíduo de arenito proveniente da formação Pirambóia como agregado miúdo em argamassas (ARAÚJO *et al*, 2004). As propriedades foram avaliadas e interpretadas com objetivo de se prever o comportamento do material de acordo com o índice de agregado miúdo incorporado a partir de um modelamento matemático. Segundo Calmon (2007), as propriedades do material com resíduos devem ser testadas conforme as normas e requisitos exigidos para um concreto convencional, assim, para as diferentes porcentagens de substituição analisadas, o grau de cada uma é uma decisão do autor do estudo em questão, uma vez que não ha normatização regulamentadora que regule esta técnica, assim diferentes dosagens podem ser estabelecidas (NEVILLE, 2016).

Dessa forma, essa relação permite potencializar ao máximo a substituição de um agregado convencional por um agregado alternativo, de forma a se atingir a resistência adequada ou a densidade física para o qual o concreto se destine. De acordo com a NBR 15575/2013, qualquer variação nos seus componentes deve ser estudada para garantir segurança a ser oferecida por um concreto e não apresentar posteriormente patologias, afinal a resistência do concreto é afetada pela sua composição (ROSA e LOPES, 2016). Assim, após os testes realizados pode-se determinar uma relação matemática entre resistência mecânica e densidade física (massa aparente) de um concreto alternativo em função da substituição parcial e gradual de areia por arenito, provenientes de resíduos de indústria mineradora.

Tal projeto se justifica como forma dese fomentar o uso industrial desse resíduo mineral na construção civil, podendo diminuir os impactos ambientais desse material disposto na natureza, bem como, diminuir o volume e os impactos da extração da areia virgem do meio natural.

## **2. OBJETIVOS**

A presente pesquisa buscou analisar a possibilidade de se estabelecer uma relação matemática da resistência mecânica, bem como da massa aparente de um concreto alternativo em função do material residual de arenito ao qual será composto, permitindo

uma otimização do uso de agregado miúdo alternativo em compósitos cimentícios sustentáveis de acordo com sua aplicação.

## 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, alguns objetivos específicos foram obtidos, dentre os quais, tem-se:

- a) Confecção de corpos de provas em formato cilíndrico, substituindo parte da areia por resíduo de arenito nas porcentagens de 0% (corpo de controle), 15%, 30%, e 50% em relação ao volume total de agregado miúdo da mistura.
- b) Determinação da massa aparente de acordo com a porcentagem de arenito na mistura;
- c) Determinação da resistência mecânica característica para cada ponto de estudo através de ensaios de compressão axial;
- d) Obtenção dos gráficos de resistência característica e massa aparente em função da porcentagem de agregado alternativo presente na mistura;
- e) Obtenção de uma relação matemática a fim de se predizer o comportamento do material;
- f) Analisar a relação existente entre massa aparente e resistência mecânica do concreto alternativo para cada porcentagem analisada;

## 3. METODOLOGIA

Os ensaios foram divididos em sete etapas, sendo: 1 – formação do compósito cimentício; 2 - moldagem dos corpos de prova; 3- cura do material; 4 - determinação de massa aparente; 5 - ensaio de compressão axial; 6 - determinação de resistência mecânica a compressão axial; 7 - análises estatísticas. As etapas 1, 2, 3 e 4 foram realizadas no laboratório de solos e a etapa cinco (5) foi realizada no Laboratório de Ensaio e Caracterização de Materiais, ambos localizados na Universidade Federal de São Carlos, nos campi Lagoa do Sino e Sorocaba, respectivamente.

Para a primeira etapa, onde foi realizada a mistura dos materiais. Para tal, utilizou-se os seguintes equipamentos e materiais: cimento *Portland* CP II-F-32, argamassadeira, areia, brita nº 1, resíduo de arenito, estufa, trolha e recipiente graduado. Nesse trabalho de pesquisa, o traço a ser adotado seguiu o que foi recomendado por Barboza *et al.*, (2013), sendo um traço rico de mistura para concreto para obras de pequeno porte, com uma proporção de 1,0 litro de cimento para 1,0 litro de areia/resíduo de arenito (substituição de arenito na mistura nas porcentagens de 0%, 15%, 30%, e 50% em relação ao volume total de agregado miúdo, além do corpo de prova de controle ), 1,16 litros de brita e 0,40 litros de água. O procedimento de mistura foi iniciado com a secagem da areia,

brita e resíduo de arenito. Para tal, esses materiais foram secados em estufa por 24 horas à 110 °C para assim garantir um material totalmente livre de umidade, evitando desta maneira a adição de uma quantidade de água na mistura que não respeitasse o traço determinado. Tendo-se as quantidades de materiais necessários para o compósito, os mesmos foram misturados dentro da argamassadeira com auxílio de uma trolha e, após a inserção de todo o volume de material, sua consistência e proporção foram averiguadas por meio de ensaios qualitativos, conforme proposto por Helene e Terzian (1992).

A segunda etapa, referente à moldagem dos corpos de prova, foi realizada sob as recomendações da NBR 5738/2015 e empregou os seguintes materiais: 12 moldadores cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, trolha e soquete de metal. Para cada porcentagem de mistura, foram confeccionados seis corpos de prova para ensaio de compressão axial e ensaio de densidade física, sendo que de acordo com o planejamento da condução desta pesquisa duas porcentagens diferentes foram confeccionadas por vez, logo as etapas de moldagem e mistura foram realizadas em três momentos distintos. O preenchimento dos moldadores foi feito colocando a mistura em seu interior com uma trolha até seu 1/3 de altura e em seguida, foi aplicado 12 golpes com o soquete de metal para adensar o material no interior do moldador. Esse processo de preenchimento foi repetido para as outras duas partes e, na extremidade superior, usou-se a trolha para linearizar sua superfície.

Na terceira etapa, foi realizado o processo de cura, seguindo as diretrizes da NBR 5738/2015. Os materiais utilizados nesta etapa foram filme de PVC e uma câmara úmida. Com o compósito previamente moldado, os corpos-de-prova, ainda nos moldes, foram armazenados em uma bancada livre de agitações, com filme PVC cobrindo sua superfície, por 24 horas, a fim de se evitar a perda de água por adensamento. Após esse período, o filme PVC foi removido e os moldes foram deixados por mais 24 horas para cura sobre a mesma bancada. Os corpos foram então desmoldados, identificados e armazenados em uma câmara úmida com temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C e umidade relativa do ar superior a 95% pelo período de 26 dias, evitando assim que a evaporação de água ocorra de maneira abrupta e conseqüentemente canais no interior do corpo de prova fossem criados, o que prejudicaria os resultados de resistência mecânica.

No que se refere à quarta etapa, ensaio de determinação da massa aparente, os corpos de prova foram pesados em uma balança analítica do tipo S22002H e suas medidas de altura e diâmetro medidos com o uso de uma régua, e assim pode-se aplicar

tais valores na equação (01), com auxílio de *software* (Microsoft Excel, 2019). O valor característico da massa aparente foi dado pela média das repetições realizadas para cada porcentagem analisada.

$$Y_m = \frac{\sum\left(\frac{m}{V}\right)}{n} \quad (01)$$

Onde:

$Y_m$ : Densidade média para dosagem de concreto [kg/m<sup>3</sup>];

$m$ : Massa do corpo de prova [kg];

$V$ : Volume do corpo de prova cilíndrico [m<sup>3</sup>];

$n$ : Número de exemplares da amostra.

Na quinta etapa, seguindo a norma NBR 5739/2018, foram realizados os ensaios de compressão axial. Para tal utilizaram-se dois discos de Neoprene de dureza 70 SH juntamente com dois discos metálicos, tendo-se assim os “pratos de carga”. A compressão do corpo de prova foi realizado por uma máquina universal de ensaios EMIC 30000 DL, com sensores de medição de força aplicada no corpo de prova e deslocamento da célula de carga. Tendo-se os pratos de carga limpos e secos os corpos de prova foram individualmente posicionados nas extremidades superior e inferior da máquina universal em seguida pode-se ter um ajuste fino de posição conferidos pelos discos de Neoprene. Antes de iniciar o ensaio de compressão, uma carga de 100 N foi aplicada para estabilizar o prato de carga na superfície do corpo de prova. Os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e levados para ensaios de compressão. Uma carga foi aplicada gradualmente a uma taxa de deformação de 0,036 mm/s (0,45 ± 0,15 MPa/s) e de maneira contínua, sendo interrompida, no momento de ruptura do corpo de prova, quando houve queda de força indicando a ruptura. Com a ruptura do corpo de prova, a força aplicada e indicada pelos sensores da máquina universal de ensaio foi anotado.

Para a sexta etapa, foram aplicadas as equações a seguir apresentadas, juntamente com o auxílio de *software* (Microsoft Excel, 2019), salientando-se que a resistência característica do concreto foi realizada através de uma média, para cada dosagem, de forma que se tenha a garantia de um material mais eficiente e confiável (dachowski, 2014).

A resistência à compressão para cada corpo de prova foi obtida pela equação (02), recomendada pela NBR 5739/2018

$$f_{ck} = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (02)$$

Onde:

$f_{ck}$ : Resistência de Compressão do Concreto [MPa];

F: Força máxima alcançada [N];

D: Diâmetro do corpo de prova cilíndrico [mm].

A resistência característica prevista para cada dosagem do concreto ( $f_{cd}$ ) foi calculada pela equação (03), recomendada pela NBR 12655/2015.

$$f_{cd} = \frac{\sum f_{ck}}{n} + 1,65 \times S_d \quad (03)$$

Onde:

$S_d$ : Desvio Padrão da dosagem [MPa];

$f_{cd}$ : Resistência média para dosagem de concreto [MPa].

n: Número de exemplares da amostra

O desvio-padrão da dosagem ( $S_d$ ) foi obtido de acordo com o recomendado por dachowski (2014) e pela NBR 12655/2015, através da equação 04.

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (f_{cm} - f_{ck})^2}{(n - 1)}} \quad (04)$$

Onde:

$S_d$ : Desvio Padrão [MPa]

$f_{cm}$ : Média de resistência dos corpos-de-prova [MPa]

Para a sétima etapa, análises estatísticas, foram utilizados os *softwares* R<sup>®</sup> e Excel<sup>®</sup>. Ao se obter os valores de resistência média para cada dosagem de concreto previamente ajustados com 5% de significância pode-se comparar tais valores com as diferentes porcentagens de arenito a serem utilizadas. Os dados foram armazenados em uma tabela do excel para que se pudesse, estatisticamente, analisá-los com auxílio da plataforma R. Para tal se realizou-se um teste de correlação de dados, a fim de se averiguar se existe uma correlação entre as quantidades de arenito empregadas nas misturas e as resistências a compressão axial, por fim, neste ponto, se analisou a significância dos valores referentes as variáveis de resistência. No que se diz respeito a se obter a equação para calcular a resistência a compressão determinada por diferentes percentuais de resíduo, foi implementado um modelo de ajuste, com o qual pode-se obter os dados necessários para plotar a curva que descreve a tendência que os valores

de resistência apresentam, gerando um gráfico de dispersão juntamente com as curvas estimadas das regressões lineares e polinomiais.

Além disso, com os valores, de resistência mecânica e densidade para cada porcentagem de incorporação de arenito obtidos, foi gerada uma correlação entre massa específica e resistência mecânica a compressão, podendo assim se analisar a variação de tais variáveis em função do teor de resíduo de arenito agregado.

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Com a aplicação do arenito em um concreto convencional como agregado miúdo, notou-se que o mesmo apresenta uma quantidade de material fino, assim a absorção de água no mesmo é muito maior quando comparada com a da areia natural. Estes dois fatores provocaram o aumento da demanda de água nas porcentagens analisadas.

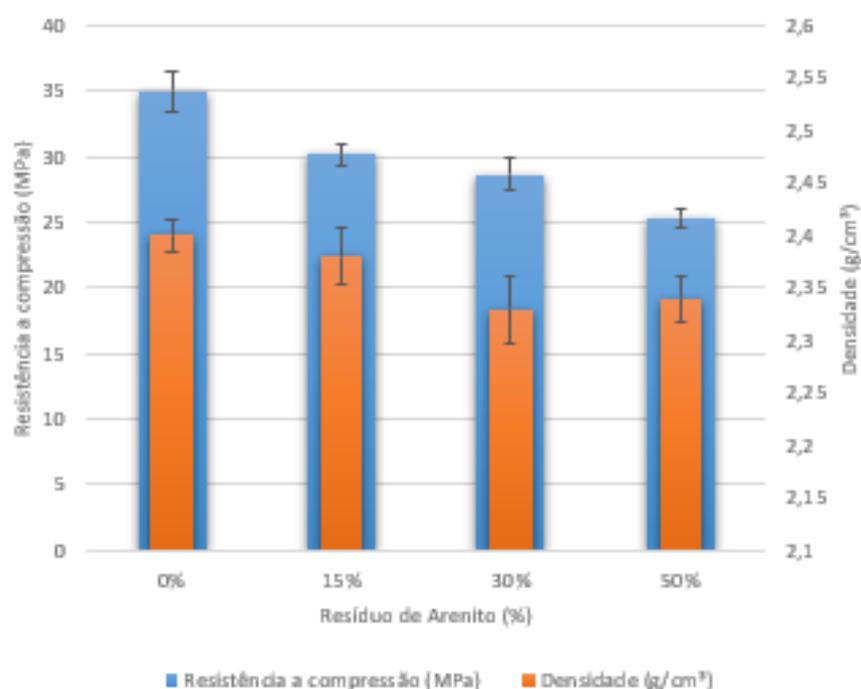
No Quadro 01 são apresentados os dados de densidade e de resistência característica à compressão obtidos em ensaio laboratorial. O Gráfico 01 mostra o comportamento da resistência e da massa aparente média dos corpos de prova analisados.

Quadro 1 - Dados de massa aparente (g/cm<sup>3</sup>) e Resistência Característica dos Corpos de Prova

Amostra	Porcentagem do resíduo de arenito							
	0%		15%		30%		50%	
	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Fck (MPa)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Fck (MPa)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Fck (MPa)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Fck (MPa)
C1	2,39	22,71	2,45	27,68	2,34	26,28	2,36	20,16
C2	2,4	31,12	2,45	29,09	2,35	24,63	2,38	22,9
C3	2,42	30,13	2,33	24,6	2,43	22,88	2,32	22,64
C4	2,43	30,2	2,32	27,06	2,32	19,98	2,4	24,33
C5	2,41	31,84	2,36	29,19	2,22	27,83	2,31	23,66
C6	2,34	32,15	2,35	28,27	2,32	25,34	2,28	24,4
Média	2,4	29,69	2,38	27,65	2,33	24,49	2,34	23,02
F <sub>cd</sub>	-	34,99	-	30,21	-	28,65	-	25,39
Desvio-padrão	0,029	3,21	0,052	1,55	0,063	2,52	0,042	1,44

Fonte: Próprio Autor (2022).

Gráfico 1- Variação da Densidade e Resistência Característica dos Corpos de Prova.



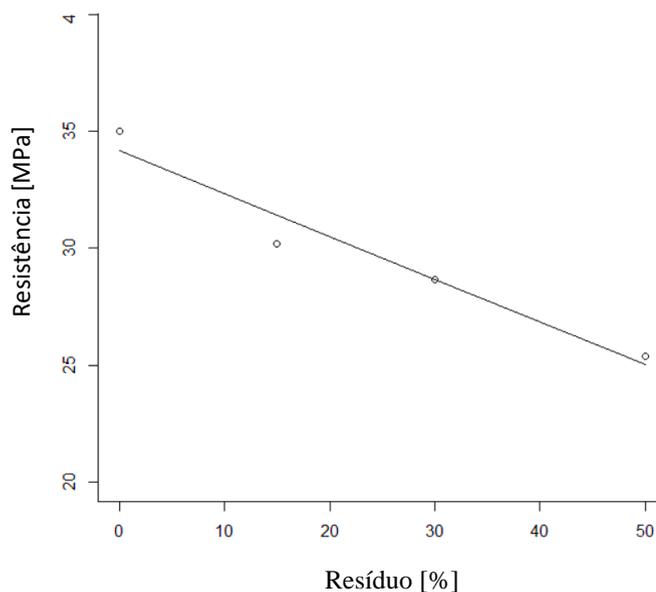
Fonte. Próprio Autor (2022).

Analisando o gráfico 1, se observa a variação do comportamento da característica física dos corpos de prova, sendo a densidade e mecânica de resistência à compressão. Pelos resultados obtidos, nota-se que houve uma diminuição da resistência média à compressão à medida que a porcentagem de arenito é incorporada na massa. Isso pode ser explicado pelo fato do arenito ser um tipo de agregado miúdo com valor de resistência mecânica menor que a areia. Porém, para o índice de massa específica, a densidade apresenta o menor índice para 30% e depois voltando a crescer. Mas, salienta-se que, se analisarmos o desvio-padrão, essa diminuição não apresentou uma diferença estatística relevante que possa afirmar tal comportamento, uma vez que para 30% e 50%, a massa específica pode ser a mesma, ou seja, a partir desse ponto possa haver uma estabilização da massa aparente para as porcentagens acima de 30%. De certo modo, em comparação com o concreto convencional, o concreto de arenito pode ser considerado um concreto leve.

O Gráfico 02, gerado pelo software estatístico R, apresenta o comportamento da curva da resistência em relação a porcentagem de resíduo. Analisando a disposição dos

dados juntamente com o formato de curva obtido, nota-se que há uma relação linear e inversamente proporcional de grau 1 entre o índice de resíduos incorporado na mistura e a resistência mecânica.

Gráfico 2- Resistência em função da porcentagem de resíduo.



Fonte. Próprio Autor (2022).

Utilizando-se dos valores de resistência média ( $F_{cd}$ ) apresentados pelo Quadro 01, foram obtidos os valores de intercepto e do coeficiente angular, os quais permitiram a determinação da equação de predição da resistência mecânica do concreto alternativo estudado, em função do gráfico 2.

$$R_m = 34,1511 - 18,27 \cdot QRES \quad (05)$$

$$R^2 = 0,928$$

Onde:

$R_m$ : Resistência média [MPa];

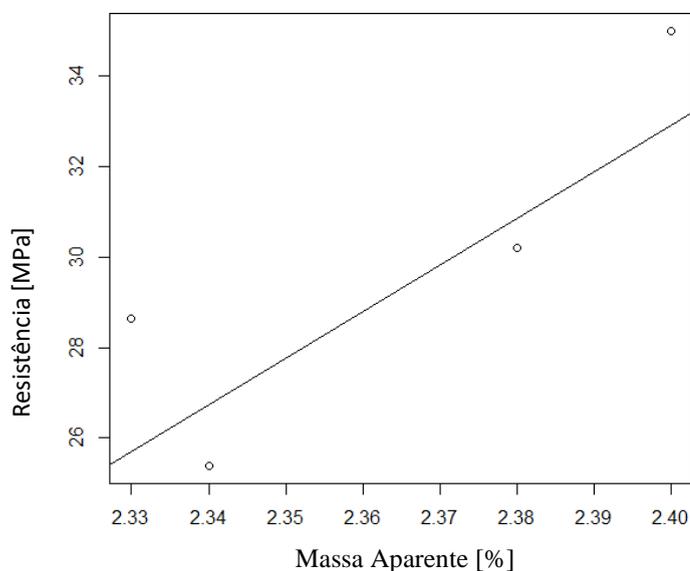
$QRES$ : Quantidade de resíduo[%];

$R^2$ : Coeficiente de Determinação ajustado.

A partir do modelo linear foi possível obter o valor de correlação dos dados a fim de verificar a significância, onde este se apresentou com um valor de 0,024288. Ou seja, a chance de não haver uma relação entre os valores de resistência a compressão e o percentual de resíduo é de apenas 2,43%, garantindo uma segurança nos dados obtidos.

Para a determinação de correlação entre resistência e massa aparente, foi realizado um processo semelhante ao realizado para a correlação entre resistência e porcentagem de resíduo. O Gráfico 03 apresenta o comportamento da curva da resistência em relação a massa aparente (densidade física) média dos corpos de prova para cada índice de resíduo incorporado no corpo de prova.

Gráfico 3- Resistência em função da massa aparente dos corpos de prova.



Fonte. Próprio Autor (2022).

Abaixo, na equação 06, é apresentado o valor de resistência média que possa ser obtido de acordo com a massa aparente do material.

$$Rm = 214,3 - 103,33 \cdot P \quad (06)$$

$$R^2 = 0,730$$

Onde:

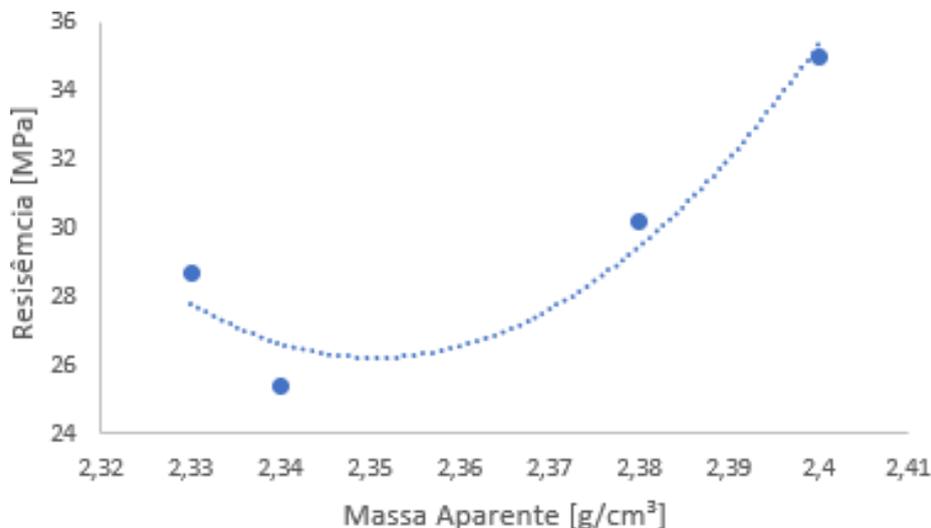
P: Massa Aparente [g/cm<sup>3</sup>];

Neste caso, o valor da significância foi de 0,1454, obtido através do método de Pearson, pelo software R, da mesma forma como tal valor foi obtido para a equação 1, assim, existe uma chance de 14,54% de os valores de resistência e densidade não apresentarem correlação. Portanto, usar essa equação para determinar a relação da resistência de acordo com a densidade de compósito não apresenta uma segurança satisfatória. Logo, ajustou-se a curva para graus mais elevados da equação. Os Gráficos

04 e 05 mostram as curvas de ajuste para graus 02 e 03, com suas respectivas equações e

Gráfico 4 - Resistência em função da massa aparente dos corpos de prova para Curva de Ajuste de Grau 2.

R<sup>2</sup>.



Fonte: Próprio Autor (2022)

$$R_m = 3727,1 P^2 - 17521 P + 20618 \quad (07)$$

$$R^2 = 0,9379$$

Onde:

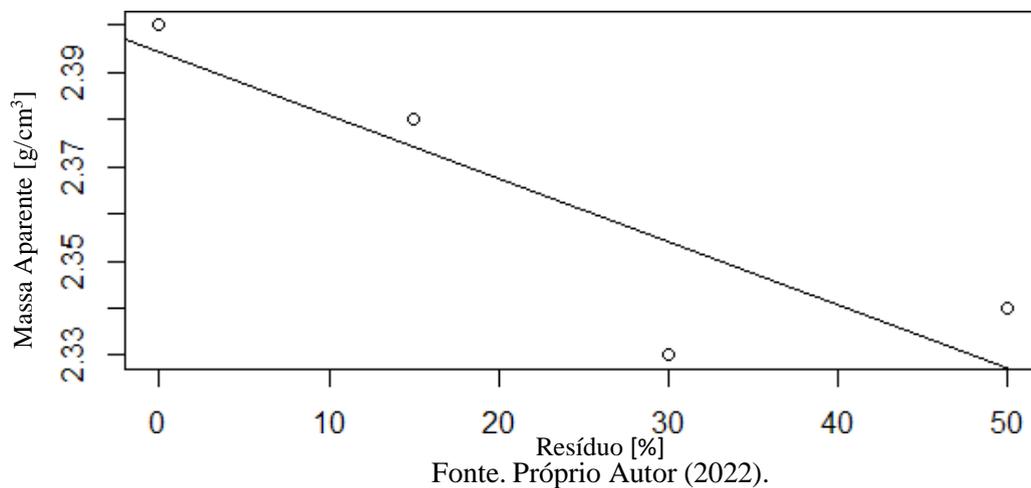
R<sub>m</sub> = Resistência média;

P = Massa Aparente [g/cm³];

Analisando-se os gráficos apresentados, juntamente com o R<sup>2</sup>, nota-se que a relação entre massa aparente como função para determinar a resistência física do compósito alternativo se tornou mais confiável. O grau 2 apresentou uma significância de 93,8%, observando o comportamento dos gráficos 3 e 4 ficou claro que a resistência mecânica a compressão do material alternativo tende a diminuir conforme a massa aparente do mesmo também diminui, por sua vez a massa aparente, segundo o gráfico 07 a seguir tende a diminuir conforme maior for a quantidade de resíduo de arenito substituinte, assim, podemos inferir que quanto maior for a porcentagem de agregado convencional substituído menor será a resistência do material alternativo, comportamento o qual está diretamente explícito no gráfico 2, onde a resistência a compressão apresenta um comportamento inversamente proporcional a porcentagem de agregado miúdo alternativo presente no concreto.

a porcentagem de agregado miúdo substituído e a massa aparente do concreto alternativo estudado. A relação entre tais dados se deu de maneira semelhante aos resultados obtidos nos gráficos 2 a 5, assim, tivemos um comportamento inversamente proporcional da massa aparente do material quando analisada em função da porcentagem de agregado miúdo. A chance de não haver correlação entre tais variáveis é de 13,21% quando analisada a função de grau 1, porém para a função de grau 2 a chance de não correlação de dados aumenta para 34,83%.

Gráfico 5- Massa aparente em função da porcentagem de resíduo



Com a equação apresentada abaixo podemos calcular a massa aparente do material em função da porcentagem de arenito

$$MA = 2,394 - 0,001342 \cdot QRES \quad (09)$$

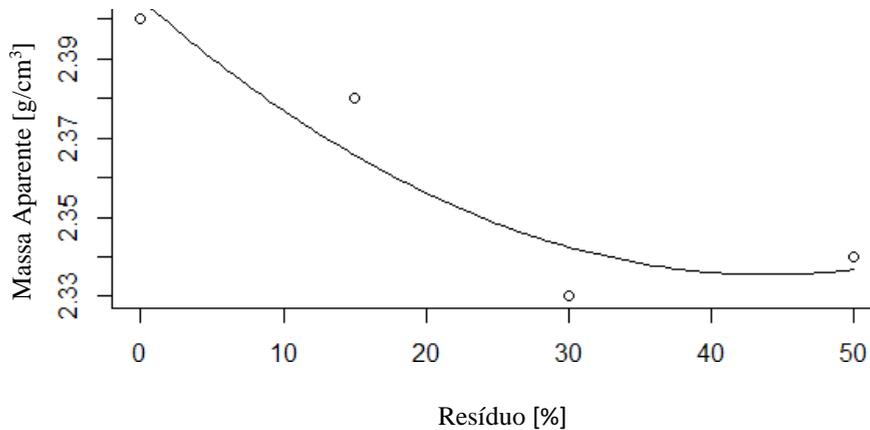
$$R^2 = 0,7532$$

Onde:

MA: Massa Aparente [g/cm³];

QRES: Quantidade de resíduo[%].

Gráfico 6 - Massa aparente em função da porcentagem de resíduo



Fonte. Próprio Autor (2022).

Onde:

$$MA = 2,405 - 0,00316QRES + (0,00003591QRES)^2 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,8787$$

Onde:

QRES: Quantidade de resíduo[%];

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos acima, pode-se concluir que há uma correlação matemática direta entre a resistência mecânica do compósito alternativo com seu índice de resíduo incorporado, com a qual podemos predizer o comportamento do material. Também é possível afirmar que há uma relação entre resistência mecânica e densidade física (massa aparente), sendo de grau 2. Ambas relações são provenientes de análises estatísticas onde a predição do comportamento do material frente a resistência mecânica é passível de se calcular.

Em geral, a utilização do agregado miúdo de resíduo de arenito em concretos de cimento mostrou-se viável tecnicamente. Os traços de concreto de 0%, 15%, 30% e 50% contemplam a NBR 12655/2006, apresentando a resistência acima da mínima exigida de 20 MPa. Este concreto é passível de produção de tijolos, blocos, revestimentos a nível de solo e acabamentos. Do ponto de vista civil e ambiental é viável e passível de utilização.

## **6. PROJETOS FUTUROS**

Com os dados aqui obtidos e apresentados podemos tomar conclusões confiáveis, porém, acredita-se que se mais dados relativos aos parâmetros analisados forem levantados e incorporados aos dados neste trabalho apresentado, poderá então se ter uma maior confiabilidade de resultados. Desta forma uma excelente maneira de se dar continuidade ao presente trabalho é não somente realizar mais ensaios para se agregar um maior grau de confiabilidade nas curvas, como também promover ensaios de testes a flexão, torção, higroscopicidade, resistência a corrosão natural e resistência a corrosão química.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Carlos César de; YAMAMOTO, Jorge Kazuo; ROSTIROLLA, Sidnei Pires. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DOS ARENITOS ASFÁLTICOS DA BORDA LESTE DA BACIA DO PARANÁ NO ESTADO DE SÃO PAULO. **Revista Brasileira de Geociências**, Sao Paulo, v.34, n. 1, p. 187-200, 09 jul. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.

BARBOZA, M., R.; BASTOS, P., S. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **FEB-UNESP**, [S.L.], 2013. Disponível em: <[http://www.feb.unesp.br/pbastos/site\\_paulo/Artigo%20Tracos%20Concreto-Paulo%20Bastos.pdf](http://www.feb.unesp.br/pbastos/site_paulo/Artigo%20Tracos%20Concreto-Paulo%20Bastos.pdf)>. Acesso em: 22 mar. 2021.

BAPTISTA JUNIOR, Joel Vieira; ROMANEL, Celso. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. **Revista Brasileira de Gestão Urbana: SEÇÃO ESPECIAL: ENGENHARIA URBANA**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 27-37, 08 dez. 2013. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2175-33692013000200004&l](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692013000200004&l). Acesso em: 02 abr. 2021.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S.K.; MINOCHA, A.K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**. P. 501-516, v. 68, 2014.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 178-189, jun. 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S03669132015000200178&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S03669132015000200178&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em 16 jan. 2021.

BALDWIN, R.; LEACH, S.J.; DOGGART, J. V.; ATTENBOROUGH, M. P. BREEAM 1/90: an environmental assessment for new office designs. BRE Report. Garston, CRC. 1990.

CALMON, J. L. Resíduos Industriais e Agrícolas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1591 – 1627. v. 2.

CORDEIRO, A.S.S., “Análise de resistência mecânica de concreto com agregado de origem cerâmica”, *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, ed. 18, pp. 1-19, abr. 2019

CORREIA, João R. et al. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures: journal of cleaner production. : *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, Lisboa, v. 1, n. 1, p. 1745-1753, 06 jun. 2011. Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production>. Acesso em: 07 abr. 2020.

DACHOWSKI, R.; KOSTRZEWA, P. The Use of Waste Materials in the Construction Industry. ***Procedia Engineering***. P. 754-758, v.161, 2016. FREITAS, J., A. Dosagem de concretos: Universidade Federal do Paraná. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Areia Construção – Sumário Mineral 2014*. Brasília, 2015.

GLOBAL URBAN DEVELOPMENT. *Urban Development*. 2010. Disponível em:

<<http://www.globalurban.org/publications.html>>. Acesso em: 28 mar. 2021.

GIORDANI, C. Viabilidade Técnica do Uso de Resíduo do Beneficiamento de Arenito como Substituição do Agregado Miúdo em Argamassas. 2014. 124 p. Trabalho

(Diplomação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto, São Paulo, SP, Ed. Pini. 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA — IBGE. Censo Demográfico 2010: sinopse do censo e resultados preliminares do universo.

2011. Disponível em:

<[www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000402.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000402.pdf)> Acesso em: 28 mar. 2022.

Luz, A.B. da, & Almeida, S.L.M. de (2012). Operações de lavra de areia. In S.L.M., & A.B. Luz (Eds.). Manual de agregados para a construção civil (2a.ed., cap. 10, pp. 183-193). Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 3

MEDEIROS, Edgardo Ramos; PEDRON, Fabrício de Araújo; REINERT, Dalvan José; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato. Filiação entre arenitos da formação Guará e sua cobertura pedológica no Rio Grande Do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 37, n. 3, p. 555-564, jun. 2013. FapUNIFESP (SciELO).

NEVILLE, A.M., Propriedades do concreto, 5ª. ed., Porto Alegre, RS, Bookman, 2016.

Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica Disponível em:

<<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm>> Acesso em: 28 mar. 2022.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V.M. (Ed.). Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. 1. Ed. Porto Alegre: ANTAC, 2003. p. 72-93. v. 4. V

ROSA, F. A.; LOPES, A. A. Análise de resistência à compressão e características do concreto produzido em obras de pequeno porte na região norte da cidade de Maringá-PR.

**Uningá Review**, Maringá, v. 28, n. 3, 2016.

SILVA, Sergio Edir Hilario da *et al.* Estudo do comportamento físico da substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de arenito Botucatu em concreto estrutural. **Revista Matéria**. Novo Hamburgo, p. 1-11. jul. 2021.

US GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC). LEED (Leadership and Energy & Environmental Design: green building rating system – version 3. 2008. 83

