



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
"CAMPUS ILHA SOLTEIRA"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO REAPROVEITAMENTO DA AREIA
DE CALDEIRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS**

VITOR FELIPE PAVIN PEDRON

Ilha Solteira- SP
Fevereiro de 2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
"CAMPUS ILHA SOLTEIRA"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA VIABILIDADE DO REAPROVEITAMENTO DA AREIA DE CALDEIRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

VITOR FELIPE PAVIN PEDRON

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki.

Ilha Solteira – SP

Fevereiro de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P372e Pedron, Vitor Felipe.
Estudo da viabilidade do reaproveitamento da areia de caldeira na produção de argamassas / Vitor Felipe Pedron. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
32 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento, 2022

Orientador: Jorge Luís Akasaki
Inclui bibliografia

1. Areia de caldeira. 2. Areia residual. 3. Indústria celulose. 4. Substituição areia.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: VITOR FELIPE PAVIN PEDRON

Título: ESTUDO DA VIABILIDADE DO REAPROVEITAMENTO DA AREIA DE CALDEIRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Eng. Me. Marcelo Bortoletto

UNESP – Campus de Ilha Solteira



Eng. Me. Rodrigo Garozi da Silva

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

07/02/2022

AGRADECIMENTOS

Em especial, deixo meu agradecimento para Maria M. Pavin, minha mãe; James K. Pedron, meu pai; Adelino C. Alves, meu colega; Julia Pavin Alves, minha irmã; Lourdes de Oliveira Pavin, minha avó; Riane O., minha companheira; Prof. Dr. Jorge L. Akasaki, meu orientador; Prof. Dr. Mauro M. Tashima, meu orientador; Gean P. S. Junior, meu colega, pela colaboração e auxílio nesse trabalho de conclusão de curso; além destes citados, gostaria de deixar meu agradecimento à minha família como um todo, aos excelentes professores e funcionários da FEIS, à CNPQ, a todos que auxiliaram de alguma forma nesse trabalho de conclusão de curso, à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira por proporcionar tantas boas experiências acadêmicas e de vida, e pôr fim aos meus colegas e amigos de classe, os quais foram minha segunda família durante o curso e levá-lo-eis para vida.

TÍTULO: ESTUDO DA VIABILIDADE DO REAPROVEITAMENTO DA AREIA DE CALDEIRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS.

RESUMO

A areia é um material finito e amplamente usado em construções, portanto um dia poderá haver escassez, e este trabalho estuda a possibilidade de substituir parcialmente ou totalmente o uso da areia natural, o que seria favorável no sentido de prevenir a extração da areia de ambientes naturais e daria um destino adequado à areia de caldeira que muitas vezes acaba sendo descartada. Esse trabalho apresenta o resultado de experimentos realizados com intenção de analisar a viabilidade de tal substituição dentro da argamassa, a areia de caldeira foi obtida em uma parceria com a empresa Fibria e a análise da areia de caldeira foi feita através dos ensaios de granulometria, massa específica, resistência à compressão e índice de consistência. A areia de caldeira apresentou ganhos nas resistências à compressão em todas as idades de ruptura, apresentou um índice de consistência similar à areia natural, massa específica ligeiramente inferior à areia natural, e granulometria menos bem distribuída que a areia natural. Portanto, os resultados obtidos foram favoráveis à substituição da areia natural pela areia de caldeira, não apresentando nenhum fator expressivamente negativo para a substituição da areia natural.

Palavras-Chave: Areia de Caldeira; Areia Residual; Indústria Celulose; Substituição Areia.

TITLE: VIABILITY STUDY OF THE REUSE OF BOILER SAND IN THE PRODUCTION OF MORTARS.

ABSTRACT

Sand is a finite material and widely used in construction, so one day there may be a shortage, and this work studies the possibility of partially or totally replacing the use of natural sand, which would be favorable to prevent the extraction of sand from natural environments and would also give a suitable destination to the boiler sand that often ends up being discarded. This report presents the results of experiments carried out with the intention of analyzing the viability of such substitution within the mortar, the boiler sand was obtained in a partnership with the company Fibria, and the analysis of the boiler sand was made through the tests of granulometry, specific mass, compression resistance and flow table. The boiler sand presented gains in compressive strength at all ages of rupture, presented a consistency index similar to natural sand, specific mass slightly lower than natural sand, and granulometry less well distributed than natural sand. Therefore, the results obtained were favorable to the replacement of natural sand by boiler sand, not showing any significant negative factor for the replacement of natural sand.

Keywords: Boiler sand; Residual sand; Pulp Industry; Sand replacement.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROCESSO DE DRAGAGEM.....	3
FIGURA 2 – PROCESSO DE DESMONTE MECÂNICO.....	4
FIGURA 3 – PROCESSO DE DESMONTE HIDRÁULICO.....	4
FIGURA 4 – CALDEIRA DE BIOMASSA.....	6
FIGURA 5 – AREIA DE CALDEIRA.....	8
FIGURA 6 - AREIA NATURAL.....	9
FIGURA 7 - AREIA DE CALDEIRA.....	9
FIGURA 8 – CONJUNTO DE PENEIRAS.....	10
FIGURA 9 – ARGAMASSADEIRA.....	10
FIGURA 10 – FRASCO DE CHAPMAN.....	11
FIGURA 11 – MESA CADENTE E MOLDE TRONCO CÔNICO.....	11
FIGURA 12 – MOLDES CÚBICOS.....	12
FIGURA 13 – MESA VIBRATÓRIA.....	12
FIGURA 14 – PRENSA UNIVERSAL.....	13
FIGURA 15 – BALANÇA.....	13
FIGURA 16 - CURVA GRANULOMÉTRICA DE AMBAS AS AREIAS.....	16
FIGURA 17 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA X TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL PARA A IDADE DE 7 DIAS.....	18
FIGURA 18 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA X TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL PARA A IDADE DE 28 DIAS.....	19
FIGURA 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA X TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL PARA A IDADE DE 28 DIAS NO BANHO TÉRMICO.....	20
FIGURA 20 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA X TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL PARA A IDADE DE 50 DIAS NO BANHO TÉRMICO.....	20

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: MÓDULO DE FINURA E DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA.....	16
TABELA 2: MASSA ESPECÍFICA DOS MATERIAIS.....	17
TABELA 3: ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA CONFORME O TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL.....	17

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Areia natural.....	2
3.2 A indústria de celulose e seus resíduos.....	5
3.3 A areia de caldeira	7
4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	8
4.1 Materiais.....	8
4.2 Equipamentos	10
4.3 Metodologia.....	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5.1 Ensaio Granulométrico.....	16
5.2 Ensaio de massa específica.....	17
5.3 Ensaio de índice de consistência	17
5.4 Ensaio de resistência à compressão.....	18
6. CONCLUSÃO.....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo (CARVALHO, 2008), e, para a obtenção deste produto é necessário o uso de areia, que é um material finito encontrado na natureza podendo se tornar escasso devido ao grande uso. Do ponto de vista ambiental, essa areia normalmente é retirada do leito e das baixadas de rios, segundo Kuck (2003) a retirada de areia de um rio agride sua calha natural levando a um aumento da vazão de água, acelerando o processo de erosão das margens.

Além da areia natural existe também a areia residual que é produzida por vários tipos de indústrias, como por exemplo a indústria de celulose, que produz a areia de caldeira como resíduo do processo de queima. Essa queima é realizada em uma Caldeira Biomassa, que é um equipamento industrial que possui a função de complementar a geração de vapor destinada à produção de celulose e de energia elétrica de uma fábrica. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (21--), têm-se como fontes de combustível para a queima, a palha e o bagaço de cana-de-açúcar, a casca de arroz, as cascas de castanhas, coco da Bahia, coco de babaçu, laranja, além de cavacos de diversos tipos de madeira. A areia residual também pode gerar impacto ao meio ambiente, pois essa areia é descartada em aterros, tornando a área ocupada e limitando a mesma para outros usos.

Do ponto de vista econômico temos que, em São Paulo a areia natural em sua grande maioria viaja distâncias superiores à 100km (JOHN, 2008), o que gera um custo elevado de transporte, e analisando a areia de caldeira, possivelmente poderia ser comercializada invés de descartada.

Segundo a Associação Brasileira de Celulose e Papel (2011), no Brasil foram produzidos mais de 14 milhões de toneladas de celulose em 2010, e aproximadamente 163 kg de resíduos sólidos são gerados por tonelada de celulose seca (CENIBRA, 2020), e segundo a Associação Brasileira de Celulose e Papel (2011), em 2010 o Brasil faturou cerca de 33 bilhões de reais na indústria de celulose, o que indica que é um setor que pode rentabilizar ainda mais.

Com base nas vantagens e desvantagens citadas acima, o uso da areia de caldeira seria favorável tanto para as empresas que produzem esse resíduo, pois gerariam um valor do mesmo além de evitar gastos ao descartá-lo, quanto para as construtoras pois provavelmente obteriam o agregado com um menor custo, além de

existir o fator ambiental no qual as empresas são mais bem vistas ao mostrarem que tomam atitudes que amenizam o impacto no meio ambiente, afinal a humanidade depende do mesmo para manter uma boa qualidade de vida.

Essas questões geram interesse em obter um destino mais adequado para a areia de caldeira, e por conta disso, pretende-se estudar a viabilidade da substituição da areia natural pela areia de caldeira.

As aplicações potenciais para esta areia são: agregado miúdo na produção de argamassas, utilização em blocos de concreto, pavimento de estradas etc (Foelkel, 2011).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é estudar a viabilidade da substituição da areia natural usada na construção civil pela areia de caldeira para a produção de argamassas. Esta avaliação será feita através da caracterização física da areia, pelos ensaios de granulometria e massa específica, e pelos ensaios que analisam a argamassa em seu estado fresco, e estado endurecido, sendo estes o ensaio de índice de consistência e resistência à compressão, respectivamente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Areia natural

As areias são sedimentos gerados pela fragmentação de rochas, constituídas basicamente de partículas de quartzo (Gianinni, 2011), e elas podem ser transportadas pelo meio líquido ou eólico, sendo que o tipo de transporte e a distância percorrida define as características físicas do grão, como o diâmetro por exemplo. Essa areia pode ser encontrada em uma forma mais coesa, de rocha, ou uma forma sem coesão, que é normalmente encontrada em leitos de rios (transporte pelo meio líquido) ou dunas litorâneas (transporte pelo meio eólico).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2009), no Brasil, 70% da areia é produzida em leitos de rios, e a extração de areia vem crescendo a cada ano, indo de 250 milhões de toneladas em 2007 para uma estimativa de produção de 524 milhões de toneladas em 2030 num cenário “frágil”.

Apesar dessa alta extração e da areia ser um material finito, o Ministério de Minas e Energia (2009) diz que a exaustão da areia para o uso na construção civil é

improvável, pois a areia é um material abundante, o que pode ocorrer é a escassez desse recurso regionalmente, sendo necessário realizar um transporte mais distante do material. Para a região Metropolitana de São Paulo, por exemplo, a distância média percorrida pela areia é cerca de 100km (JOHN, 2008), o que encarece bastante o produto, já que o transporte da areia normalmente é responsável por 2/3 do seu valor final (Ministério de Minas e Energia, 2009).

Segundo Silva (2011), a retirada da areia da natureza pode ser feita de três formas, dragagem, desmonte hidráulico ou desmonte mecânico. Para retirar a areia dos leitos dos rios é utilizada a dragagem (Figura 1), que é basicamente o bombeamento da areia do leito do rio utilizando uma embarcação chamada draga.

Figura 1 - Processo de dragagem.



Fonte: Conexos, consultoria e sistemas, 2017.

Já para a retirada da areia em dunas litorâneas, ou a areia em forma coesa, a extração é feita através do desmonte mecânico (Figura 2), que é uma escavação mecânica utilizando escavadeiras, pás-carregadeiras ou tratores.

Figura 2 – Processo de desmonte mecânico.



Fonte: Ministério Público de Goiás, 2019.

E uma terceira opção utilizada para a retirada da areia de planícies ou terraços aluviais é o desmonte hidráulico (Figura 3), que é o desmoronamento de forma controlada do talude através de um jato d'água.

Figura 3 – Processo de desmonte hidráulico.



Fonte: CETEM, [21--].

A extração dessa areia do seu ambiente natural é uma interferência antrópica, que pode causar alterações na natureza, e ao ser realizada a extração devem ser

tomadas medidas mitigadoras e/ou compensadoras. Um dos efeitos observados por Kuck (2003), da extração da areia dos leitos do rio é que altera a calha do rio, aumentando a profundidade do mesmo e conseqüentemente a velocidade, podendo acelerar o processo de erosão. Além desse efeito, Bruschi (2002) cita que a extração da areia pode causar impactos como: supressão da vegetação, degradação do solo, assoreamento de cursos d'água, comprometimento da qualidade d'água, alteração na fauna e flora, poluição visual e sonora.

3.2 A indústria de celulose e seus resíduos

A celulose é utilizada como matéria prima nas indústrias de papel, embalagens, tecidos, dentre outros, e para essa matéria prima ser utilizada, é necessário extraí-la de árvores como o Eucalipto. O processo mais utilizado no mundo para a produção de celulose é processo de Kraft (Marques, 2014).

Segundo CLB (2020), o processo de Kraft ocorre resumidamente em 4 passos: Primeiro é realizado o preparo da madeira, após a recepção da mesma, essa é transformada em cavacos com a utilização de um picador, sendo que as cascas retiradas da madeira são armazenadas para a posterior queima na Caldeira Biomassa (Figura 4) a fim de proporcionar geração de energia elétrica. Após o primeiro passo inicia-se o processo de cozimento, que em resumo é a adição dos cavacos de madeira juntamente ao hidróxido e sulfeto de sódio, fazendo com que a lignina (estrutura que une as fibras de celulose) reaja, sendo dissolvida e a celulose seja liberada como uma massa marrom. Após isso, é feita uma lavagem retirando as impurezas sólidas. A próxima etapa do processo é o branqueamento da polpa de celulose, que ocorre com a adição de peróxido de hidrogênio, dióxido de cloro, oxigênio e hidróxido de sódio, e por fim ocorre a secagem da celulose e formação dos fardos. Para isso, a folha de celulose passa por rolos de prensagem e fica exposta a uma secagem com ar quente, gerando o produto pronto para ser entregue.

Durante todo esse processo, a produção do papel deixa três tipos de resíduos, os sólidos orgânicos, que são o lodo industrial e casca suja, os resíduos perigosos, que são óleos e graxas, que são substâncias tóxicas e altamente corrosivas, e por fim existe também o resíduo sólido inorgânico, que seriam cinzas, "dregs", "grits", lama de cal, cal virgem, areia de caldeira etc, sendo que esses últimos resíduos são classificados como não perigosos e não inertes (Foelkel, 2011).

Dentre esses três tipos de resíduos, já existem diversos estudos que analisam utilização dos resíduos sólidos inorgânicos, por exemplo, o uso das “dregs” em base e sub-base de construções rodoviárias apresentaram valores de resistência de compressão acima dos limites mínimos (Molina, 2004). Também foi estudado a adição de “dregs”+“grits” em argamassas, sendo que a adição de até 30% desses resíduos gerou resultados de resistência à compressão semelhantes ao de referência (Bandeira, 1996). Além disso, Foelkel (2011) aponta um possível uso da areia de caldeira como agregado miúdo na produção de argamassas.

Figura 4 – Caldeira de biomassa.



Fonte: CBC SA, [21--].

A empresa do ramo de celulose, Suzano, em 2020, gerou 1.418.016 toneladas de resíduos, sendo que apenas 342.354 toneladas foram destinadas à aterros (Suzano, 2020). A empresa ainda mostra em seu relatório uma pretensão de transformar 70% desses resíduos destinados ao aterro em subprodutos, ou seja, a empresa Suzano já vê uma possível monetização dos resíduos gerados pela indústria de celulose.

Além da questão da monetização do resíduo, existe outro fator econômico que irá beneficiar a empresa produtora do resíduo, que é a redução dos gastos com transporte para os aterros, pois segundo Foelkel (2011), os custos de estocagem e manuseio de cada resíduo podem variar entre U\$50/m³ e U\$100/m³. Além disso, também gera um benefício financeiro para o comprador do resíduo, pois certamente pagará um valor inferior ao valor da areia natural, além de também existir o fator do transporte, possivelmente diminuindo a distância percorrida pela areia para chegar ao destino.

Nos dias de hoje a questão ambiental vem tendo um papel importante, pois além dos órgãos reguladores, os cidadãos também acabam influenciando a empresa a acatar certas medidas que mitigam ou compensam o impacto ambiental gerado pelo descarte dos resíduos, pois esse descarte pode acabar sendo feito de maneira irresponsável gerando impactos ao meio ambiente, e quando não, eles são descartados em aterros, impedindo que aquela área seja utilizada e possivelmente alterando a fauna e flora local. Portanto encontrar novas aplicações para esses resíduos que vêm se mostrando promissores é essencial.

3.3 A areia de caldeira

A areia de caldeira (Figura 5) é um dos resíduos da queima de biomassa. Essa queima é realizada com a intenção de gerar energia elétrica, que é utilizada no processo de produção da celulose, e assim que o resíduo é gerado a caldeira precisa ser abastecida com mais biomassa, gerando mais areia residual (Modolo, 2006).

Essa areia se caracteriza como um material refratário, que é uma característica essencial para que seu uso na construção civil seja possível. Segundo Foelkel (2011), aproximadamente de 1 a 4 kg de areia por tonelada de celulose são gerados no processo de queima. Apesar de parecer um valor pequeno, levando em consideração conforme supracitado que em 2010, 14 milhões de toneladas de celulose foram produzidas, isso resulta em cerca de 14 mil toneladas a 56 mil toneladas de areia residual gerada, que é uma quantia expressiva para se descartar.

Figura 5 – Areia de caldeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

4.1 Materiais

Para a realização do ensaio de granulometria foram utilizadas ambas as areias, natural e de caldeira, para o ensaio de massa específica foram utilizados água, querosene, cimento e ambas as areias, para os ensaios da argamassa em seu estado fresco e endurecido, foram utilizadas as argamassas em seus cinco teores de substituição da areia natural, 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. As argamassas foram produzidas utilizando água, cimento CP V ARI, areia natural (Figura 6) e areia de caldeira (Figura 7), dependendo do teor de substituição. A areia de caldeira foi obtida em Três Lagoas através de uma parceria com a empresa Fibria, e a areia natural foi disponibilizada pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS).

Figura 6 - Areia Natural.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 7 - Areia de caldeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios foram: conjunto de peneiras (Figura 8), argamassadeira (Figura 9), frasco de Chapman (Figura 10), mesa cadente para o ensaio de consistência (Figura 11), molde tronco cônico (Figura 11), moldes cúbicos 5x5x5cm³ (Figura 12), mesa vibratória para adensamento dos corpos de prova (Figura 13), prensa universal (Figura 14) e balança (Figura 15).

Figura 8 – Conjunto de peneiras.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 9 – Argamassadeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 10 – Frasco de Chapman.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 11 – Mesa cadente e molde tronco cônico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 12 – Moldes cúbicos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 13 – Mesa vibratória.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 14 – Prensa Universal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 15 – Balança.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.3 Metodologia

Esse estudo de viabilidade foi realizado nos laboratórios da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). Os ensaios que envolvem a argamassa (índice de consistência e resistência à compressão) foram realizados para 5 teores de substituição da areia natural: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, utilizando um traço de 1:3 (1 parte de cimento para 3 partes de areia), e o fator água/cimento 0,48.

O ensaio de granulometria foi realizado para a areia natural e para a areia de caldeira, e para a realização deste ensaio foi utilizado o conjunto de peneiras seguindo a ABNT - NM 248/2003.

O procedimento realizado nesse ensaio foi: secagem das amostras, agitação mecânica nas peneiras de diâmetro inferior a 4,75mm, em seguida realiza-se a agitação manual. Após as realizar as agitações, deve-se passar o pincel nas peneiras, considerando o material passante na peneira de diâmetro inferior, e o material retido na própria peneira. Por fim, determinar a massa retida em cada peneira.

O resultado deve ser apresentado em um gráfico de porcentagem retida acumulada x diâmetro das partículas, além de ser recomendado o cálculo da dimensão máxima característica e do módulo de finura. A dimensão máxima característica é a abertura da peneira na qual apresenta porcentagem retida acumulada em massa igual ou imediatamente inferior a 5%, e o módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas dividida por 100.

O ensaio de massa específica foi realizado para a areia natural, para a areia de caldeira e para o cimento, e foi utilizado o frasco de Chapman, o ensaio foi feito de acordo com a ABNT – NM 52/2009.

O procedimento realizado nesse ensaio foi: Colocar água no frasco até a marca de 200mls, em seguida inserir 500g do material no frasco com a utilização de um funil e com cuidado para não grudar material nas paredes do frasco, após isso, deve-se mover o frasco com o objetivo de eliminar bolhas de ar. Com o frasco estabilizado, realiza-se a medida do volume final no frasco. A massa específica é calculada pela seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{500}{L-200} \quad (I)$$

O ensaio do índice de consistência foi realizado para as argamassas em seus 5 teores de substituição previstos (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), e foi utilizado a

argamassadeira para a produção das argamassas, mesa cadente e molde tronco cônico para a realização do ensaio, esse ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 13276:2016.

O procedimento realizado nesse ensaio foi: Preparação da argamassa, em seguida deve-se limpar e secar a mesa cadente. Após isso, colocar a argamassa dentro do molde tronco cônico em 3 camadas de iguais alturas, aplicando 15, 10 e 5 golpes em cada camada respectivamente com a utilização do soquete, após isso rasar o topo do molde. Retirar o molde e aplicar 30 golpes em 30 segundos com a manivela, após os 30 segundos, efetivar 3 medidas de espalhamento da argamassa, em 3 direções diferentes.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para as argamassas utilizando a argamassadeira para a produção das argamassas, moldes cúbicos com dimensões $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$, mesa vibratória para adensamento dos corpos de prova e a prensa universal, esse ensaio foi realizado para as idades de 7, 28, 28 (banho térmico) e 50 (banho térmico) dias para cada teor de substituição (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), vale ressaltar que o banho térmico foi realizado a uma temperatura de 65°C .

Produzindo 3 corpos de prova para cada teor de substituição e 4 idades de ruptura, resulta numa produção de 60 corpos de prova. O ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7215:2019.

O procedimento realizado nesse ensaio foi: Preparação da argamassa, em seguida coloca-se a argamassa nos moldes cúbicos. Após isso, deve-se realizar o adensamento dos corpos de prova com o uso da mesa vibratória. Após o corpo de prova ser adensado, deve ser colocado para cura em câmara úmida ou banho térmico, conforme necessidade. Por fim, quando o corpo de prova atingir idade de ruptura, realiza-se a ruptura na prensa universal.

O preparo da argamassa citado nos ensaios de índice de consistência e resistência à compressão é realizado da seguinte maneira: Adiciona-se toda a água dentro da cuba, e em seguida adiciona-se o cimento. Realizar a mistura desses materiais na velocidade baixa durante 30s, após esse tempo, adicionar a areia gradualmente durante 30s. Após o término da colocação da areia, alterar a velocidade do misturador para alta durante 30s. Após isso, desligar o misturador por 90s, nos primeiros 30s deve-se retirar a argamassa aderida à cuba com a utilização de uma espátula, colocando-a novamente na cuba, os 60s restantes devem ser usados para

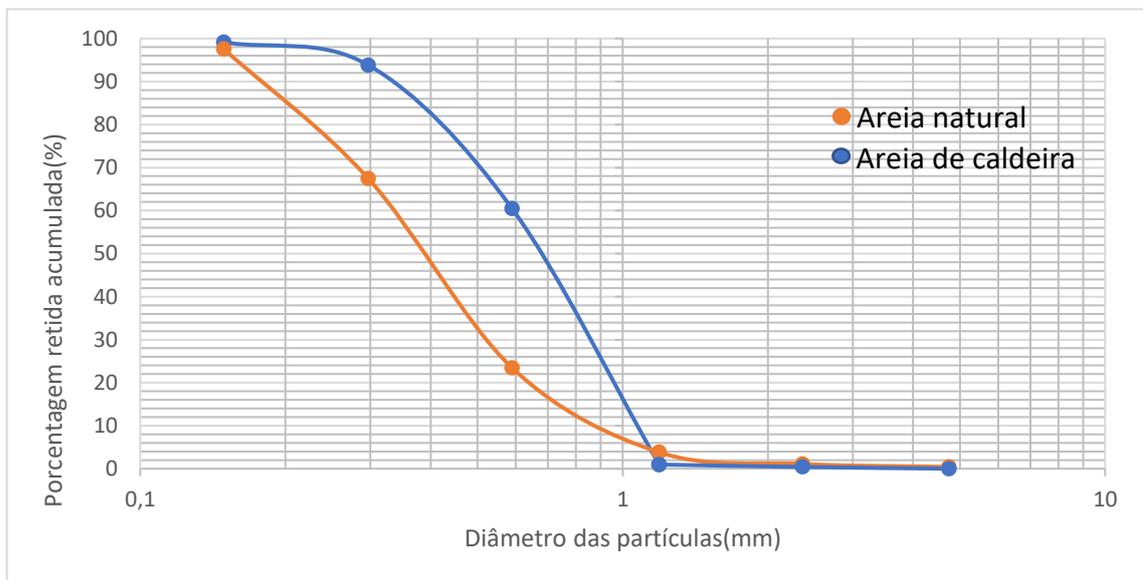
deixar a argamassa em repouso. Com os 90s finalizados, liga-se o misturador na velocidade alta por 60s, finalizando o preparo da argamassa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio Granulométrico

Foram feitas as curvas granulométricas para a areia natural e para a areia de caldeira, as curvas e resultados obtidos serão apresentados a seguir. A Figura 16 apresenta as curvas granulométrica de ambas as areias para uma melhor visão comparativa.

Figura 16 - Curva granulométrica de ambas as areias.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Analisando os resultados apresentados na Figura 16, podemos concluir que a areia de caldeira apresenta maior quantidade de grãos de mesmo diâmetro, tendo uma granulometria menos bem distribuída comparada a areia natural.

Foram determinados também o Módulo de finura e a Dimensão máxima característica para ambas as areias, conforme apresentado na Tabela 01.

Tabela 1: Módulo de finura e Dimensão máxima característica.

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica
Areia de caldeira	2,548	1,19
Areia natural	1,938	1,19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 01, temos que a areia de caldeira apresenta um módulo de finura na zona ótima (entre 2,2 e 2,9), enquanto a areia natural apresenta um módulo de finura na zona utilizável inferior (entre 1,55 e 2,2).

5.2 Ensaio de massa específica.

O ensaio de massa específica foi realizado para a areia natural, areia de caldeira e para o cimento, e os resultados são apresentados na Tabela 02.

Tabela 2: Massa específica dos materiais.

Material	$\rho(\text{g/cm}^3)$
Cimento	3,13
Areia Natural	2,646
Areia de caldeira	2,564

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Realizando a comparação entre as areias, podemos ver que a areia natural tem maior massa específica que a areia de caldeira.

5.3 Ensaio de índice de consistência

O ensaio de índice de consistência foi realizado para a argamassa em seus cinco teores de substituição da areia natural: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 03.

Tabela 3: Índice de consistência conforme o teor de substituição da areia natural

Teor de substituição	Valor médio índice de consistência(mm)
0%	210
25%	230
50%	225
75%	220
100%	220

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

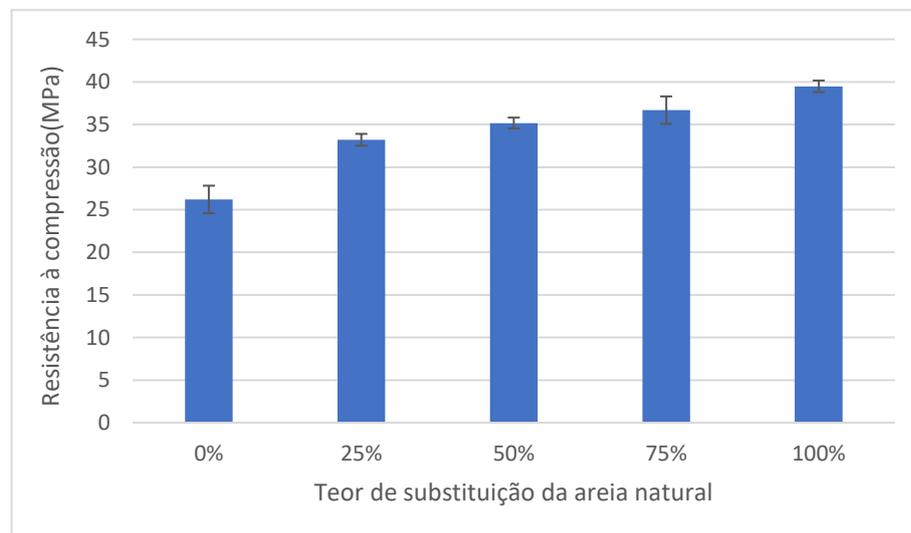
Os resultados obtidos no ensaio do índice de consistência demonstram que a diferença na deformabilidade da argamassa conforme a substituição da areia natural pela areia de caldeira é irrelevante.

5.4 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para os corpos de prova em com os cinco teores de substituição da areia natural: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão serão apresentados a seguir.

Da Figura 17 até a Figura 20, são apresentadas a resistência à compressão da argamassa x teor de substituição da areia natural de acordo com as respectivas idades de ruptura.

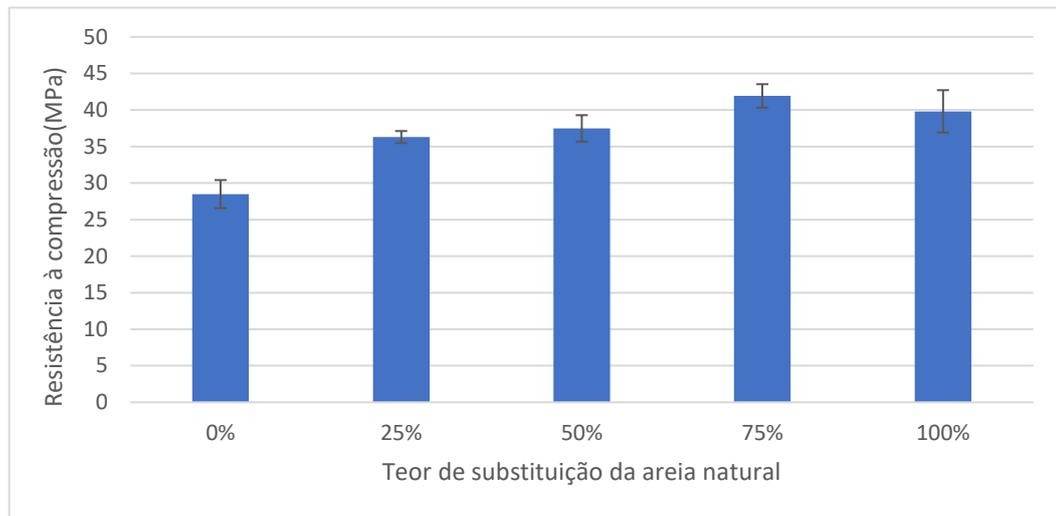
Figura 17 - Resistência à compressão da argamassa x teor de substituição da areia natural para a idade de 7 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os resultados obtidos para a idade de ruptura do corpo de prova de 7 dias foram satisfatórios, quanto maior o teor de substituição da areia natural pela areia de caldeira maior é o ganho de resistência à compressão do corpo de prova. Vale ressaltar que o ganho de resistência à compressão para a argamassa com 100% de areia de caldeira, comparada com a argamassa com 100% de areia natural foi de 50,63%.

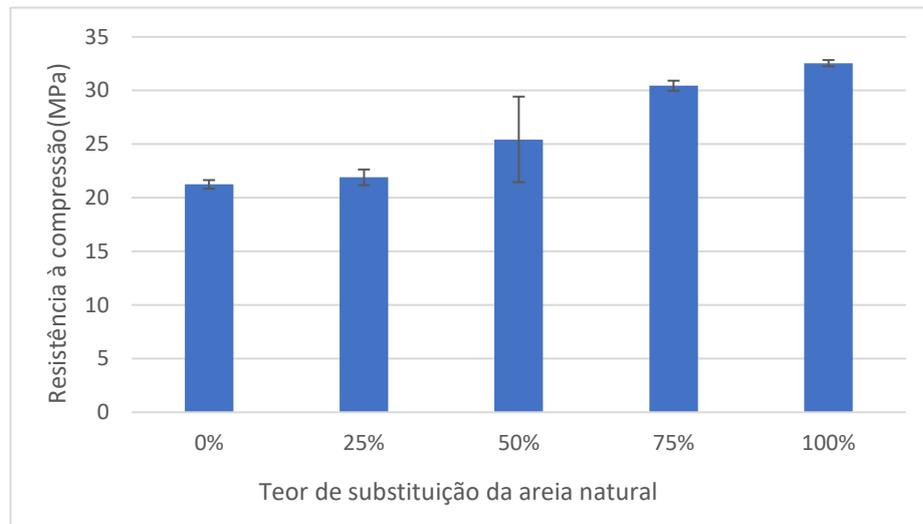
Figura 18 - Resistência à compressão da argamassa x teor de substituição da areia natural para a idade de 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O ganho de resistência à compressão comparando a argamassa com 100% de areia de caldeira com a argamassa com 100% de areia natural foi de 39,73%, e, para a idade de ruptura do corpo de prova de 28 dias os resultados obtidos foram crescentes de 0% a 75% do teor de substituição da areia natural, enquanto para o teor de substituição da areia natural de 100% houve um decréscimo em relação ao teor de substituição de 75%. Isso pode ter ocorrido devido a algum um corpo de prova com teor de substituição de 100% ter ficado com maior índice de vazios, normalmente seriam moldados uma maior quantidade de corpos de prova a fim de descartar corpos de provas que não ficassem tão homogêneos, porém a pandemia do COVID-19 modificou o cronograma da pesquisa, e, afim de ganhar tempo foram moldados apenas o número mínimo definido por normas de corpos de prova, tornando inviável o descarte de possíveis corpos de prova com defeitos.

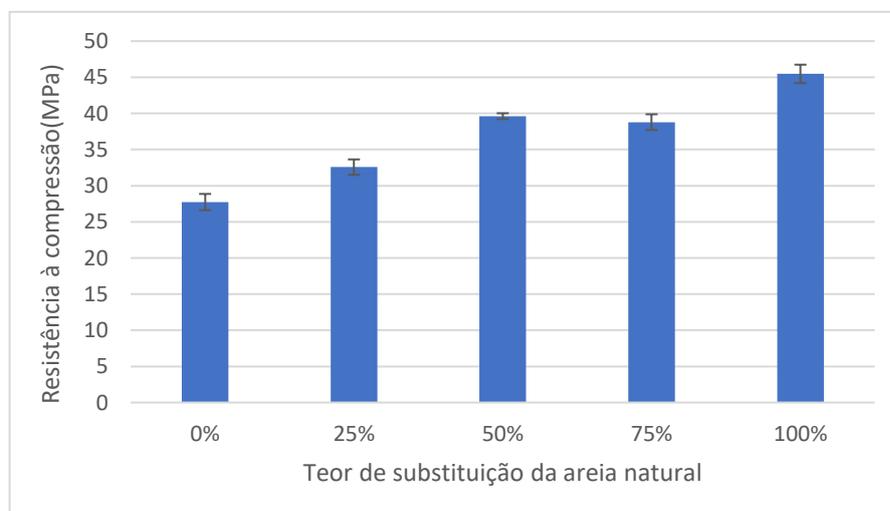
Figura 19 - Resistência à compressão da argamassa x teor de substituição da areia natural para a idade de 28 dias no banho térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O ganho de resistência à compressão comparando a argamassa com 100% de areia de caldeira com a argamassa com 100% de areia natural foi de 53,18%, e, para a idade de 28 dias no banho térmico os resultados obtidos foram crescentes de 0% até 100% do teor de substituição da areia natural, sendo um resultado bem satisfatório, com observação para o teor de substituição de 50% que apresentou desvio padrão elevado, podendo ser justificado pelo mesmo fator da falta de corpos de prova extra para descarte de algum resultado incoerente.

Figura 20 - Resistência à compressão da argamassa x teor de substituição da areia natural para a idade de 50 dias no banho térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O ganho de resistência à compressão comparando a argamassa com 100% de areia de caldeira com a argamassa com 100% de areia natural foi de 63,91%, e, para a idade de 50 dias no banho térmico os resultados obtidos foram crescentes de 0% até 50% de teor de substituição, seguido de um valor decrescente para 75% e voltando a crescer em 100%, esse valor irregular apresentado para o teor de substituição de 75% pode também ser justificado pelos fatores já citados anteriormente.

Fazendo uma análise geral dos resultados citados acima, têm-se que a tendência é de que a resistência à compressão cresça conforme o teor de substituição da areia natural pela areia de caldeira aumente. Vale ressaltar que o ganho de resistência apresentado pelas argamassas colocadas em cura no banho térmico foi maior que as argamassas colocadas em cura na câmara úmida.

A justificativa para os resultados de resistência crescente conforme a substituição da areia natural não pôde ser definida apenas com a análise desses ensaios realizados, sendo necessário a realização de mais ensaios para definir uma justificativa.

6. CONCLUSÃO

O ensaio de granulometria caracterizou a areia de caldeira como uma areia média, e com maior quantidade de grãos de mesmo diâmetro, resultando numa granulometria menos bem distribuída comparada com a areia natural. O ensaio de massa específica mostrou que a massa específica da areia de caldeira é ligeiramente inferior à areia natural. O ensaio do índice de consistência apresentou deformabilidades semelhantes para quaisquer teores de substituição da areia natural. O ensaio de resistência à compressão, fazendo uma análise geral para todas as idades, foi satisfatório, apresentando geralmente uma maior resistência à compressão da argamassa conforme aumenta o teor de substituição da areia natural pela areia de caldeira.

Vale ressaltar que é recomendado a realização de outros ensaios de caracterização da areia de caldeira, com o objetivo de encontrar a justificativa para os ganhos de resistência à compressão obtidos com o aumento do teor da areia de caldeira nas argamassas.

Portanto, baseando-se nos resultados citados acima, a substituição da areia natural pela areia de caldeira para a produção de argamassas de rejuntamento de placa cerâmica, na qual é necessária obter resistência à compressão maior que 8 MPa mostra-se viável, e argamassa de alta resistência mecânica para pisos, na qual necessita de resistência à compressão maior que 40MPa, mostra-se viável (para os casos em que a argamassa atinja a resistência à compressão citada), não apresentando fatores expressivamente negativos para a argamassa que utiliza areia de caldeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 - **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS — ABNT. NBR 13276: **Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS — ABNT. NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS — ABNT. NBR 7211: **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BRACELPA, Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Relatório estatístico**. 2011. Disponível em:
http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7742/Bracelpa-Relatorio_Estatistico-2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso: 06 de janeiro de 2022.
- BRUSCHI, D, M; RIBEIRO, M, A; PEIXOTO, M, C, D; SANTOS, R, C, S; FRANCO, R, M. Município e Meio Ambiente. **Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios**. Belo Horizonte, 2002. Disponível em:
https://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/pdf/manual_20de_20saneamento_municipios_feam_2002.pdf. Acesso em: 14 de janeiro de 2022.
- CARVALHO, J. D. N. DE. Sobre as origens e desenvolvimento de concreto. **Revista Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 95-112, 6 jan. 2010.
- CENIBRA, Celulose Nipo-Brasileira. **Relatório de sustentabilidade**. 2020. Disponível em: https://www.cenibra.com.br/wp-content/uploads/2021/06/RS_2020_PORT-3.pdf. Acesso em: 09 de janeiro de 2022.

- CLB. O que é celulose? Da extração à produção de papel. **CropLifeBrasil**, 06 ago. 2020. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/noticias/da-celulose-ao-papel-como-funciona-essa-cadeia-produtiva/>. Acesso em: 10 de janeiro de 2022.
- FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto. Parte 05: Resíduos Minerais. **Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel**. p. 1-173, 2011. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25_ResiduosMinerais.pdf. Acesso em: 05 de janeiro de 2022.
- JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. PCC USP, São Paulo. 2008.
- KUCK, D.W. **Areia artificial reduz impacto ambiental de construção civil**. Instituto Ciência Hoje, 2003. Disponível em: <https://cienciahoje.org.br/areia-artificial-reduz-impacto-ambiental-de-construcao-civil/>. Acesso em: 14 de janeiro de 2022.
- MARQUES, M, L; SILVA, E, J; VELASCO, F, G; JUNIOR, C, M, F. Potencialidades do uso de resíduos de celulose (dregs/grits) como agregado em argamassas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.16, n.4, p.423-431, 2014.
- MODOLO, R, C, E. **Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil**. n. 119. Tese (Mestrado em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos) – Curso de Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.
- Quintal 22. Suzano. **Relatório Anual Suzano**. 2020. Disponível em: <<https://r2020.suzano.com.br/wp-content/uploads/2021/05/RelatorioSuzano2020.pdf>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2022.
- ROLIM, N, D. **SUSTENTABILIDADE: Uma Análise da Extração de Areia em Cursos de Água em Minas Gerais**. Tese (Mestrado em Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável) – Curso de Direito – Escola Superior Dom Helder Câmara, Belo Horizonte, 2016.
- SANTOS, D, N. **Análise da extração de areia no trecho livre do canal do alto curso do Rio Paraná, entre os municípios de Guaíra e Marilena (PR): impactos ambientais e aplicabilidade**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

SEQUEIRA, P; LABRINCHA, J, A; FERREIRA, V, M; MODOLO, R; SILVA, L.

Utilização e Valorização de resíduos de Areias de Leito Fluidizado e de Lamas de Corte de Pedra em Argamassas: Exemplos de Aplicação. p. 1-9 {21--}.

Disponível em:

https://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2062_2010.pdf. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

ARAÚJO, T. **Como se forma a areia da praia?**, 2011. Disponível em:

<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-se-formou-a-areia-da-praia/>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2022.

SILVA, H, V. **Uma proposta de indicadores de desempenho ambiental para extrações de areia, pelo método de dragagem, em leito de rio.** Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Curso de Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SILVA, L, M, S. **Utilização de areia descartada de fundição e resíduos inorgânicos de indústria de papel e celulose – grits e lama de cal – na produção de materiais vitrocerâmicos.** Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração de processamento, caracterização e aplicação de materiais) – Curso de Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.

Suzano. Geração de resíduos não perigosos nas operações industriais. **Relatório Anual**, 2020. Disponível em: <https://centraldeindicadores.suzano.com.br/gri/306-3/?ind=geracao-de-residuos-nao-perigosos-nas-operacoes-industriais>. Acesso em: 16 de janeiro de 2022.