

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

BRUNA LETÍCIA TAVARES

DENSIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE PLACAS
CIMENTÍCIAS APLICADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Joinville

2020

BRUNA LETÍCIA TAVARES

DENSIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE PLACAS
CIMENTÍCIAS APLICADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mikowski.

Joinville

2020

BRUNA LETÍCIA TAVARES

DENSIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE PLACAS
CIMENTÍCIAS APLICADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 19 de novembro de 2020.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Mikowski
Orientador/ Presidente da banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Membro titular
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Wagner Maurício Pachekoski
Membro titular
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Á Deus, criador de todas as coisas, por sempre me proporcionar conhecimento, discernimento e saúde para viver todos os momentos até aqui. Principalmente, por me abençoar na escolha desta profissão e hoje, através deste trabalho, dar um passo para mais perto da realização do meu sonho.

Agradeço aos meus pais, Lourenço e Terezinha, minha base, apoio e suporte não só neste tempo de vida acadêmica, mas por toda vida. À vocês, minha eterna gratidão por, muitas vezes, renunciarem aos seus sonhos para viverem o meu, me ajudarem nas minhas dificuldades e por, comemorarem comigo minhas conquistas.

À minha irmã Camila, por estar sempre presente em cada momento, incentivar e demonstrar sempre seu apoio, e nos momentos difíceis me fazer rir e tornar tudo mais leve e divertido.

Ao meu orientador, por esses quase quatro anos de trabalho, onde sempre trabalhou junto comigo no desenvolvimento deste tema, disposto a aprender coisas novas e a compartilhar comigo experiências e seu conhecimento, agregando muito na minha formação acadêmica.

Gostaria de agradecer também a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por ter sido minha segunda casa durante todos esses anos, e aos professores que me lecionaram com tanta maestria, fazendo com que eu me apaixonasse cada dia mais pela profissão que eu escolhi.

Gostaria de agradecer em especial, ao meu professor Wagner Mauricio Pachekoski, o qual foi responsável por me inserir neste tema, me incentivar nas pesquisas e por, principalmente, ter sido um grande amigo, me ouvindo e aconselhando nos momentos difíceis da graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa no Programa Institucional de Iniciação Científica durante a realização das atividades referentes a este tema, a qual foi de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Laboratório de Modelagem e Análise de Dados (LabMAD) e aos colegas que conviveram comigo durante o tempo da pesquisa.

Ao longo deste projeto, muitos me ajudaram a alcançar meus objetivos, e eu não poderia deixar de registrar aqui meus agradecimentos a eles. Agradeço ao Prof. Dr. Stephan

Paul, que inicialmente me presenteou com este tema e muito me ajudou, ao Prof. Dr Thiago Antônio Fiorentin pelo auxílio na realização de ensaios vibroacústico e ao técnico Adilson Schackow do laboratório de Engenharia Civil da UDESC pela ajuda no corte das amostras.

Aos meus amigos, os de longa data e os que a universidade me proporcionou, muito obrigada por compartilharem comigo os momentos mais sinceros e alegres da vida.

Por último e não menos importante, agradeço ao meu noivo Leonardo Turco, que demonstrou seu apoio, ajuda, entendeu minhas ausências e esteve ao meu lado em todos os momentos, desde o início da elaboração deste trabalho.

RESUMO

As placas cimentícias são materiais leves e resistentes, resultado da combinação de seus componentes. Entretanto, é necessário não só conhecer os seus constituintes, como também suas propriedades físicas, pois são essas as responsáveis pelo seu comportamento mecânico. Este trabalho teve por objetivo conhecer as propriedades físicas de densidade e módulo de elasticidade de placas cimentícias, bem como correlacioná-las. Dois tipos de placas cimentícia comerciais foram avaliadas: Placas Cimentícias com Fibras Curtas Descontínuas e Aleatórias (PCFCDA) e as Placas Cimentícias com Fibras Longas Ordenadas em Malha (PCFLOM). A densidade foi determinada pelo método matemático conhecido na literatura (razão entre a massa pelo volume), onde foram determinados os parâmetros geométricos e a massa das amostras. O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido pelo ensaio mecânico de excitação por impulso, o qual tem como resposta a frequência flexional de vibração. O cálculo dos erros envolvidos no processo também foi considerado através do desvio padrão amostral, considerando uma amostragem com cinco corpos de prova para cada espessura nominal de placa cimentícia. As PCFLOM apresentaram valores de densidade e módulo de elasticidade dinâmico inferiores às PCFCDA, estando relacionados com o peso do material e sua estrutura interna. Os dois tipos de placas apresentaram valores de espessuras medidos diferentes dos valores de espessuras nominais indicados pelos fabricantes. Este erro está totalmente relacionado com o processo de fabricação, ressaltando a importância de se conhecer com exatidão o valor destes parâmetros. Já os valores de largura e comprimento também apresentaram erros, mas este erro está relacionado com o processo de corte dos corpos de prova.

Palavras-chave: Placa cimentícia. Densidade. Módulo de Elasticidade.

ABSTRACT

Cements boards are light and resistant materials, the result of the combination of their components. However, it is necessary not only to know its constituents, but also their physical properties, as these are responsible for their mechanical behavior. This work aimed to know the physical properties density and elastic modulus of cements boards, as well as to correlate them. Two types of commercial cements boards were evaluated: Cements Boards with Short Discontinuous and Random Fibers (PCFCDA) and Cements Boards with Long Ordered Mesh Fibers (PCFLOM). The density was determined by the mathematical method known in the literature (ratio of mass to volume), where the geometric parameters and the mass of the samples were determined. The dynamic modulus of elasticity was obtained by the mechanical impulse excitation test, which responds to the flexural frequency of vibration. The calculation of the errors involved in the process was also considered through the sample standard deviation, considering a sample with five specimens for each nominal thickness of cements boards. The PCFLOM showed values of density and dynamic modulus lower than the PCFCDA, being related to the weight of the material and its internal structure. The two types of boards had measured thickness values different from the nominal thickness values indicated by the manufacturers. This error is totally related to the manufacturing process, emphasizing the importance of knowing the value of these parameters exactly. The width and length values also showed errors, but this error is related to the cutting process of the specimens.

Keywords: Cement boards. Density. Elastic modulus.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. OBJETIVOS	9
1.1.1. Objetivo Geral	9
1.1.2. Objetivos Específicos	10
2. DENSIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PLACAS CIMENTÍCIAS	11
2.1. PLACA CIMENTÍCIA	11
2.2 DENSIDADE	13
2.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE	15
2.4. RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE E DENSIDADE	18
2.5 ESTUDOS RELACIONADOS ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE E DENSIDADE DE PLACAS CIMENTÍCIAS	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. CORPOS DE PROVA DE PLACAS CIMENTÍCIAS	25
3.2 METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	28
3.3. METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E MASSA	34
4.2 DENSIDADE	42
4.3 FREQUÊNCIA FLEXIONAL	43
4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	46
4.5 DIRETRIZES PARA PROJETOS DE MASSA MÍNIMA	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1 CONCLUSÕES	51
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICE A	57

1. INTRODUÇÃO

A estrutura dos painéis utilizados nas construções industrializadas feitas em aço, também conhecidas como construções a seco, é constituída de placas cimentícias ou fibrocimento, onde cada aplicação tem uma espessura e área superficial apropriada (LOPES, 2019). A escolha do dimensional da placa cimentícia empregada deve ser feita de maneira correta na fase de projeto, pois uma seleção indevida pode comprometer o desempenho mecânico da estrutura, a partir do uso incorreto do dimensional empregado e material escolhido (PROENÇA, 2018).

Para que a escolha seja eficiente, é necessário que se leve em consideração tanto os detalhes construtivos, quanto à capacidade de desempenho térmico e acústico dos painéis, bem como a resistência ao ambiente que será exposto e capacidade de suportar os esforços mecânicos submetidos (BAUER, 1994).

As placas cimentícias são componentes produzidas industrialmente, com ampla versatilidade de uso, sejam para ambientes internos ou externos. A alta resistência mecânica e a menor massa (sob ação da gravidade, peso) garantem a esse tipo de material uma função estrutural como o revestimento básico da estrutura, assim também como uso de materiais de acabamento de fachadas expostas (PROFORT, 2016).

Para que essa correlação entre os valores de alta resistência mecânica e menor peso permaneçam, torna-se necessário conhecer, antes de tudo, a estrutura interna do material e as condições de carregamento às quais este será submetido, uma vez que ditarão as propriedades mecânicas requeridas do material. Para este fim, são realizados os ensaios mecânicos para compreender e analisar essas propriedades (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000).

Neste contexto, a alta resistência mecânica e menor peso estão relacionados com a estrutura do material, de maneira microscópica, ou seja, com átomos e moléculas, em que compõem a estrutura cristalina do material. Ashby (2012) afirma que, a densidade, se torna ponto de partida, em muitos casos, para a seleção correta do material, uma vez que o módulo de elasticidade varia de acordo com a estrutura cristalina e composição química do mesmo.

A densidade, por se tratar de uma propriedade física que consiste matematicamente na razão entre a massa e o volume ocupado pelo material, torna simples o cálculo de seu valor, bastando mensurar a massa e os parâmetros geométricos do corpo de prova utilizado. O ensaio mecânico vibroacústico pela técnica de excitação por impulso, caracterizado como um ensaio não destrutivo apresenta como principais respostas o módulo de elasticidade dinâmico,

módulo de cisalhamento, como também o amortecimento do material (ASTM E1876, 2000). É de suma importância para o engenheiro civil que atua na área estrutural conseguir estimar o mais próximo possível o módulo de elasticidade dos materiais que irão compor a estrutura (QUINDELER, 2017).

Neste trabalho apresenta-se um estudo das propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade dinâmico de corpos de prova de placas cimentícias. Para o cálculo da densidade, medições dos parâmetros geométricos (espessura, largura e comprimento) foram realizadas com a utilização de um paquímetro, bem como a mensuração da massa, com a utilização de uma balança de precisão. Para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, o ensaio de excitação por impulso foi empregado para a determinação da frequência flexional de vibração.

Foram avaliados dois materiais (produtos comerciais) utilizados na construção civil, um com fibras longas ordenadas em malha e outro, com fibras curtas descontínuas e aleatórias, o que torna possível avaliar a influência das fibras na rigidez elástica destes materiais compósitos de matriz de materiais cimentícios.

Com os valores calculados de densidade e módulo de elasticidade dinâmico, de forma indireta, isto é, por meio de medições de outras grandezas físicas já mencionadas, foi possível obter a relação entre a densidade com o módulo de elasticidade para as placas cimentícias. Com este estudo, é possível perceber também a importância de se conhecer os valores das propriedades físicas e então realizar a seleção correta do material em projetos estruturais, por exemplo.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática a respeito do comportamento de materiais, propõem-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar as propriedades físicas de densidade e módulo de elasticidade dinâmico de corpos de prova de placas cimentícias utilizadas na construção civil.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Confeccionar corpos de prova para realização de medições experimentais de grandezas físicas a partir de dois tipos de placas cimentícias, sendo uma com as fibras longas e ordenadas numa matriz bidimensional e a outra, com as fibras desordenadas e distribuídas aleatoriamente;
- Obter experimentalmente os parâmetros geométricos (espessura, largura e comprimento) e a massa de corpos de prova de placas cimentícias para a determinação de propriedades físicas;
- Calcular o valor da propriedade física densidade a partir das medições dos parâmetros geométricos e da massa;
- Realizar ensaios mecânicos vibroacústicos pela técnica de excitação por impulso para a determinação da frequência flexional de vibração em corpos de prova de placas cimentícias;
- Calcular o valor da propriedade física módulo de elasticidade dinâmico de corpos de prova de placas cimentícias a partir das medições dos parâmetros geométricos, da massa e da frequência flexional de vibração;
- Realizar tratamento estatístico de dados para as grandezas físicas espessura, largura, comprimento, massa e frequência flexional, determinados experimentalmente, a partir de corpos de prova de placas cimentícias;
- Realizar tratamento estatístico de dados para as propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade dinâmico, calculados a partir de grandezas físicas determinadas experimentalmente;
- Determinar constantes que relacionam o módulo de elasticidade e densidade.

2. DENSIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PLACAS CIMENTÍCIAS

Os conceitos teóricos acerca de placas cimentícias, densidade, módulo de elasticidade e relação entre módulo de elasticidade e densidade serão apresentados para o entendimento deste trabalho. E por fim, alguns estudos de avanços recentes serão apresentados, assim como o delineamento da proposta de pesquisa.

2.1. PLACA CIMENTÍCIA

Os materiais compósitos são formados pela união de diferentes materiais, com o objetivo de reforçar uma dada propriedade do material (NETO E PARDINI, 2006). As placas cimentícias são classificadas como materiais compósitos, sendo constituídas por uma matriz cerâmica com a adição de fibras e particulados para o reforço da estrutura (ZOLLO, 1997).

O Quadro 1 apresenta um descritivo com as características dos materiais que constituem as placas cimentícias.

Quadro 1 – Características dos materiais das placas cimentícias.

Materiais	Características
Perlita	Constituída por rocha sílica. A perlita expandida tem a presença de 2% a 6% de água combinada na rocha perlítica bruta. Possui cor branca.
Cimento Portland	Composto por silicatos de tricálcio ($(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$) e dicálcio ($(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$).
Agregados naturais	Os agregados miúdos são definidos pelas areias e os agregados graúdos são definidos por pedregulhos ou britas, advindos dos processos de britagem de rochas.
Elementos de reforço estrutural	Fibras de vidro, fibras sintéticas de materiais poliméricos ou fibras naturais.

Fonte: Perlite.info (2020), Callister (2013) e Bauer (1994).

Conforme Quadro 1, os principais constituintes das placas cimentícias são a perlita, a liga cimentícia ou o cimento Portland, os agregados naturais e outros elementos de reforço estrutural.

A composição química predominante da matriz cerâmica varia de acordo com o fabricante, mas de modo geral, constituem materiais comuns à construção civil, como o

cimento Portland, por exemplo (PILZ et al, 2020). Já os elementos de reforço estrutural que compõem a estrutura das placas cimentícias, fornecem um acréscimo adicional no comportamento mecânico (TABATABAIEFAR et al, 2015).

A função das fibras está diretamente relacionada com a influência significativa sobre a resistência mecânica (SIMATUPANG e LANGE, 1987). De maneira similar à composição da matriz cerâmica, a orientação dessas fibras também varia com o fabricante, podendo estas ser: i) contínuas e alinhadas; ii) descontínuas e alinhadas; iii) descontínuas e orientadas aleatoriamente. Segundo Neto e Pardini (2006), as propriedades mecânicas destes tipos de compósitos são significativamente influenciadas tanto pela orientação (ângulo de direcionamento) das fibras, quanto pelas frações volumétricas de seus constituintes individuais. De forma geral, as placas cimentícias são comercialmente encontradas de dois tipos: 1º) forma bidimensional e contínua na estrutura; 2º) fibras curtas e distribuição aleatória.

A Figura 1 apresenta fotografias com exemplos de aplicações de placas cimentícias em obras de construção civil.

Figura 1 – Exemplos de aplicações de placas cimentícias na construção civil.



Fonte: Autora (a), Portal AECWeb (b), F3 Construções (c), (2019).

Conforme afirma Zenerato et al (2019), esses exemplos de aplicações justificam o fato de a construção a seco ser cada vez mais considerada como uma alternativa tecnológica aos sistemas construtivos convencionais.

As placas cimentícias possuem propriedades de resistência ao fogo, à umidade, à maresia, às variações de temperaturas e não deformam mecanicamente em condições quentes, secas e úmidas. A maior produtividade e qualidade, facilidade no recorte e menor dilatação devido à assistência das fibras formam a lista das inúmeras vantagens apresentadas por essas placas (PROFORT, 2014).

Uma vantagem a ser ressaltada do sistema construtivo, em que se utilizam as placas cimentícias, é a redução de perdas na produção desses painéis pré-fabricados. O emprego de sistemas construtivos industrializados é uma alternativa, por exemplo, para habitações de baixa renda, ou seja, para aplicação da customização em massa. A padronização dos componentes feitos na construção a seco pode levar à redução de perdas, desde os desperdícios até o manuseio das peças para corte, tornando-o acessível e viável (NOGUEIRA; SAFFARO; GUADANHIM, 2018).

Os materiais que constituem as placas cimentícias possuem características próprias. Neste contexto, é possível afirmar que possuem densidade e módulo de elasticidade característicos para cada um dos constituintes, que corroboram para os valores finais dessas propriedades físicas da placa cimentícia.

2.2 DENSIDADE

A densidade (ρ) é definida pela razão entre a massa (m) de um material com o volume (V) ocupado pelo mesmo, sendo representada matematicamente por:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Com a definição dada pela Equação 1, quanto menor o volume ocupado por determinada massa, maior será a densidade. Esta grandeza permite diferenciar um material do outro, pois mesmo que possuam massas iguais, dois materiais distintos podem apresentar volumes diferentes e conseqüentemente, possuir densidades distintas. Muitas aplicações requerem baixo peso e isso depende em partes da densidade dos materiais de que são feitos (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2014).

A densidade de um sólido depende do peso atômico de seus átomos ou íons, de seus tamanhos, e do modo como estão empacotados. A dispersão da densidade vem principalmente da dispersão do peso, ou seja, metais são densos porque são feitos de átomos pesados, empacotados compactamente; polímeros têm baixas densidades porque são feitos, em grande parte, de carbono (peso atômico: 12) e hidrogênio (peso atômico: 1) em empacotamentos amorfos ou cristalinos mais abertos. A maioria das cerâmicas tem densidades mais baixas do que metais porque contêm átomos leves de O, N ou C (ASHBY, 2012).

Nas cerâmicas, quando a ligação é predominantemente iônica, as estruturas cristalinas podem ser consideradas como sendo constituídas por íons – cátions e ânions – eletricamente carregados (CALLISTER, 2013). O tamanho desses íons positivos e negativos e a magnitude da carga elétrica neles influenciam na estrutura do cristal.

O Quadro 2 apresenta os valores de densidade de alguns materiais constituintes das placas cimentícias, encontrados na literatura.

Quadro 2 – Valores referenciais de densidade de alguns materiais constituintes das placas cimentícias.

Materiais	Densidade (g/cm ³)
Perlita	<ul style="list-style-type: none"> • Não expandida: 1,1 • Expandida: 0,03 – 0,150
Cimento Portland	<ul style="list-style-type: none"> • Pó: 0,4 • CP III: 1,120 • CP IV: 1,400
Agregados naturais	<ul style="list-style-type: none"> • Areia – 1,64 • Rocha Britada – 1,8

Fonte: Samar e Saxena (2016), Junges et al (2020), Cimento Itambé (2009), La Serna e Rezende (2013).

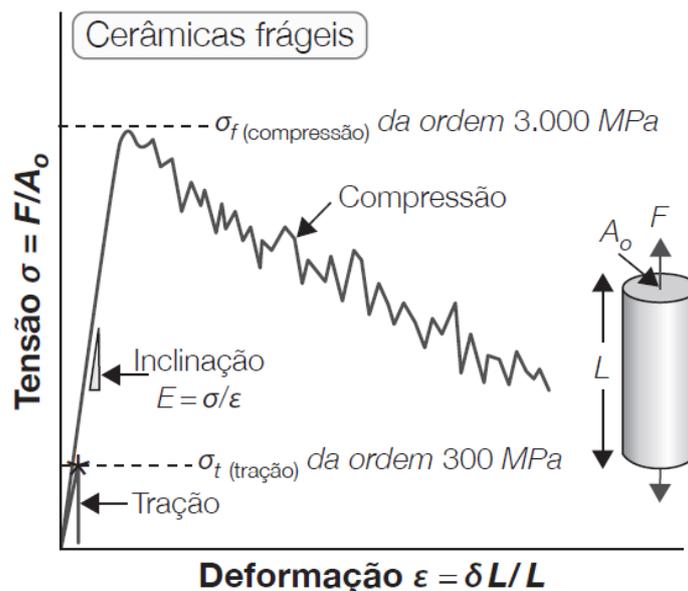
A densidade constitui uma importante propriedade na construção civil, onde é amplamente utilizada na seleção e utilização dos materiais, bem como na avaliação e comparação da qualidade do mesmo, uma vez que a densidade é uma propriedade intrínseca de cada material, ou seja, uma grandeza física que depende da temperatura e da pressão à qual o material está sendo submetido numa dada aplicação de engenharia.

2.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é definido como sendo a medida da rigidez elástica do material e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas, da composição química e da estrutura cristalográfica (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000). Portanto, quanto maior o módulo de elasticidade, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão sob tração ou compressão, e mais rígido será o material em questão (MEYERS, CHAWLA, 2009).

Experimentalmente, utilizando ensaios mecânicos de tração ou de compressão, uma das maneiras de se obter o módulo de elasticidade é pela inclinação da parte elástica linear inicial da curva tensão em função da deformação (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000). O módulo de elasticidade (E), descreve a resposta ao carregamento sob tração ou compressão, e sua magnitude indica a rigidez elástica do material. A resistência (ou tensão) mecânica, para cerâmicas e vidros, depende fortemente do modo de carregamento, conforme diagrama tensão *versus* deformação, Figura 2. Sob tração, significa a resistência à fratura, enquanto para compressão, significa a resistência ao esmagamento, que normalmente é muito maior (ASHBY, 2012).

Figura 2 - Resistência mecânica de cerâmicas e vidros.

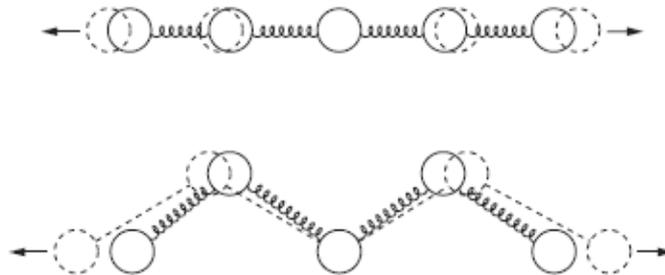


Fonte: Ashby (2012).

Conforme inicialmente definido, o módulo de elasticidade da maioria dos materiais depende da rigidez da ligação e do número de ligações por unidade de volume. Cada material possui um valor característico para o módulo de elasticidade, entretanto, para entender a origem desses valores, torna-se necessário entender, de antemão, a natureza das forças que age junto aos átomos (ASHBY e JONES, 2007). Essas forças que agem junto aos átomos agem como pequenas fontes, ligando um átomo ao outro no estado sólido e são chamadas de ligações interatômicas.

A maneira como os átomos se agrupam (empacotamento) também influencia o valor do módulo de elasticidade. De maneira simplificada, as forças que unem os átomos podem ser comparadas a molas e então, o empacotamento é determinado por quantas pequenas molas existem por unidade de área e, conseqüentemente, o valor do ângulo entre eles (Figura 3) (ASHBY e JONES, 2007).

Figura 3 – Empacotamento dos átomos.



Fonte: Ashby e Jones (2007).

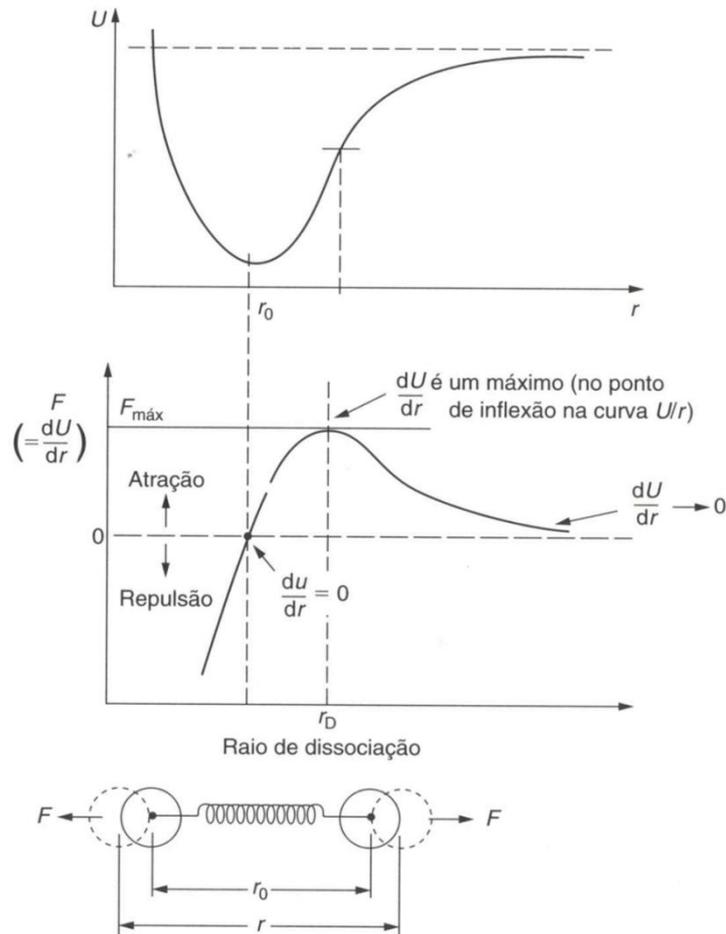
Os átomos podem ser ligados por ligações iônicas, covalentes ou metálicas, também chamadas de ligações primárias, e as ligações de Van der Waals e ligações de hidrogênio, também chamadas de ligações secundárias, sendo essas mais fracas que as ligações primárias (CALLISTER, 2013).

Na Figura 4, uma curva energia (U) pela distância de separação dos átomos (r) é apresentada. A partir dessa curva, é possível encontrar a força F , conforme apresenta a Equação 2:

$$F = \frac{dU}{dr} \quad (2)$$

Através desta definição, o valor de F pode ser encontrado para qualquer separação dos átomos.

Figura 4 – Curva para obtenção da força e distância entre os átomos.



Fonte: Ashby e Jones (2007).

Em materiais cristalinos, como metais e as cerâmicas, a deformação envolve uma mudança na distância interatômica de equilíbrio, o que requer a aplicação de forças interatômicas grandes. É por isso que os valores do módulo de elasticidade de metais e cerâmica são muito altos (MEYERS E CHAWLA, 2009).

A larga faixa de módulos de elasticidade é em grande parte causada pela faixa de valores de S , sendo essa propriedade caracterizada pela rigidez elástica das ligações, obtida por:

$$S = \frac{d^2U}{dr^2} \quad (3)$$

A ligação covalente é rígida ($S = 20\text{--}200 \text{ N/m}$); a metálica e a iônica são menos rígidas ($S = 15\text{--}100 \text{ N/m}$). Se $F = 0$, o valor de r é igual ao raio atômico, r_0 . (ASHBY e JONES, 2007).

Por fim, o módulo de elasticidade, E , é aproximadamente:

$$E = \frac{S}{r_0} \quad (4)$$

O Quadro 3 apresenta os valores de módulo de elasticidade de alguns materiais constituintes das placas cimentícias encontrados na literatura.

Quadro 3 – Valores de módulo de elasticidade de materiais constituintes das placas cimentícias.

Materiais	Módulo de Elasticidade [GPa]
Perlita	23,01
Cimento Portland	22,7 – 23,1
Agregados naturais	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa porosidade (granito, basalto): 70 -140 • Alta porosidade (areia) : 21 a 49

Fonte: Silva (2019), Wallner (2001), Benetti (2012), Santos et al (2013).

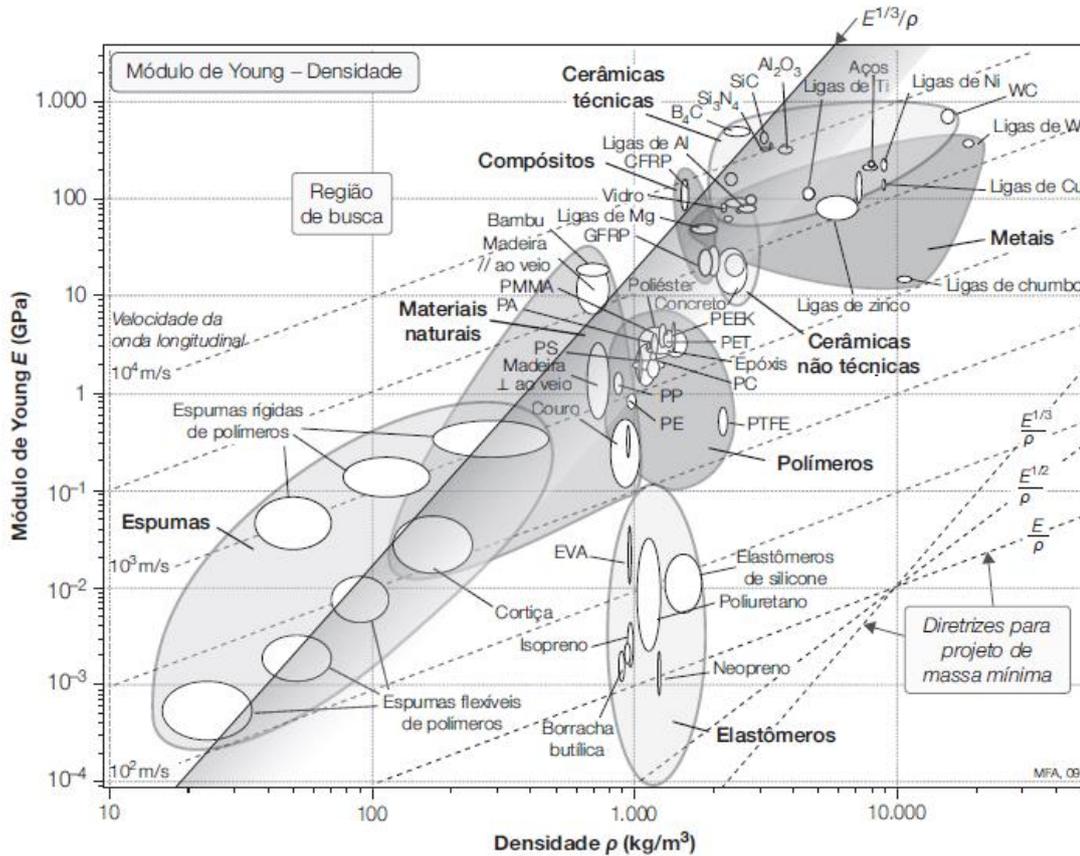
A análise de como são ordenados os átomos e suas forças interatômicas faz com que fique claro o porquê dos metais e das cerâmicas possuírem alto valor de módulo de elasticidade e os polímeros, por exemplo, um baixo valor desta propriedade mecânica. O valor da densidade, por sua vez, também é relacionado com as ligações e distâncias atômicas, uma vez que a densidade de um sólido depende do modo como estão empacotados. A seguir, a correlação entre as propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade é apresentada.

2.4. RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE E DENSIDADE

O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, e a densidade são importantes propriedades físicas dos materiais de construção civil, as quais são requisitos para um projeto estrutural, por exemplo. Ashby (2012) afirma: “O aço é rígido; borracha é flexível: são efeitos do módulo. Chumbo é pesado; cortiça flutua: são efeitos da densidade”. Neste contexto, a Figura 5 apresenta um mapa que relaciona o módulo de Young (E) em

função da densidade (ρ), para diferentes classificações de materiais (metais, cerâmicas, polímeros etc.).

Figura 5 – Mapa que relaciona o módulo de elasticidade (E) em função da densidade (ρ).



Fonte: Ashby (2012).

Este mapa auxilia na seleção de materiais para aplicações de engenharia civil de infraestrutura. É possível observar que cerâmicas, como uma família, são rígidas e apresentam altos valores de E e ρ .

Também é possível verificar na Figura 5, os índices de material E/ρ , $E^{1/2}/\rho$ e $E^{1/3}/\rho$. Cabe ressaltar que cada ponto no mapa, corresponde a um dado valor de E e ρ , em escalas logarítmicas, seguindo:

$$\frac{E}{\rho} = A \quad (5)$$

Esse índice descreve as retas paralelas de inclinação 1. Aplicando os logaritmos, tem-se:

$$\log E = \log \rho + \log A \quad (6)$$

Para a inclinação da reta igual a 2, apresenta-se a condição:

$$\frac{E^{1/2}}{\rho} = \frac{\sqrt[2]{E}}{\rho} = B \quad (7)$$

Tomando os valores dos logaritmos, apresenta-se a Equação 8:

$$\log E = 2 \log \rho + 2 \log B \quad (8)$$

A última condição é expressa na Equação 9:

$$\frac{E^{1/3}}{\rho} = \frac{\sqrt[3]{E}}{\rho} = C \quad (9)$$

E de maneira análoga, a equação do logaritmo também é apresentada, a qual resulta em outro conjunto, de reta de inclinação 3.

$$\log E = 3 \log \rho + 3 \log C \quad (10)$$

Cada valor de inclinação das retas é uma diretriz das retas paralelas que pertencem aquele índice (ASHBY, 2012). A partir de medições experimentais da densidade e do módulo de elasticidade de placas cimentícias, os índices A , B e C podem ser calculados indiretamente pelas Equações 5, 7 e 9. Os cálculos dos índices permitem estabelecer relações matemáticas em escala logarítmica, em que a identificação dos materiais no mapa (Figura 5) poderá ser realizada.

Este mapa auxilia na seleção de materiais através das especificações de projeto, em que requerem baixo peso, por exemplo. Com os valores requeridos pelo projeto, é possível fazer a análise de qual o material mais indicado para dada aplicação.

2.5 ESTUDOS RELACIONADOS ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE E DENSIDADE DE PLACAS CIMENTÍCIAS

A determinação das propriedades físicas e mecânicas de um material determinam suas características e permitem conhecer seu comportamento quando este é submetido a um determinado esforço mecânico. Na literatura, no que se refere à densidade e ao módulo de elasticidade das placas cimentícias, existem poucos artigos que descrevem a correlação dessas propriedades.

Desse modo, para realizar uma revisão bibliográfica, a técnica conhecida como Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi utilizada para a pesquisa de artigos de periódicos em bases científicas. Esta técnica consiste em um método sistemático para analisar resultados, conforme afirma Conforto et al. (2011). O intuito de utilizá-la está em verificar e avaliar o que existe na literatura, para comparação dos resultados (OLIVEIRA et al, 2017). Para este trabalho, a RSL teve como base as plataformas de buscas *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*.

Após estabelecidas as plataformas de buscas, foram definidas combinações de palavras-chave para a pesquisa, com termos em inglês. As palavras-chave foram *elastic modulus*, *cement boards* e *Young's modulus*, realizada em julho e agosto de 2020.

Esta técnica apresenta uma vantagem de realizar contínuos ciclos de busca até que o objetivo da busca seja alcançado. A descrição da metodologia utilizada para a busca na literatura encontra-se no Apêndice A.

O primeiro artigo filtrado traz a densidade e as propriedades mecânicas, como módulo de ruptura e módulo de elasticidade, como critério de caracterização para materiais pré-fabricados, como os painéis OSB, feitos de madeira. Entretanto, o conceito aqui aplicado vai de encontro ao deste trabalho, uma vez que apresenta a relação do perfil de densidade e módulo de ruptura, fornecendo uma visão das propriedades relacionadas à espessura e à orientação dos materiais. Essa linha só fomenta a afirmação de que conhecer as propriedades físicas e mecânicas de um material é fundamental e muito útil para a aplicação ideal do mesmo (KRÁL et al, 2015).

O autor também cita o mapa de Ashby, mostrando como é eficaz para a representação de rigidez, com o módulo de Young, em um eixo e a densidade em outro eixo. Deste modo, é possível encontrar não apenas o material com maior rigidez ou aquele com a densidade mais baixa, mas aquele com a melhor relação de rigidez e densidade.

O segundo estudo apresenta a utilização de resíduos na produção de placas cimentícias reforçadas com fibra de vidro. O método para estimar a densidade das amostras de placas cimentícias foi através da rotina comum de laboratório, ou seja, estimando o valor da massa das amostras e volume foi estimado através do volume de água deslocado pelo material. O artigo traz a correlação das fibras nesse tipo de material, em que os valores obtidos mostram que há um limite para a adição de fibra de vidro, dependendo do tamanho da fibra, processo de fabricação e quantidade de outros ingredientes, o que afetam diretamente no valor da resistência. Por exemplo, a adição de fibras extras causa efeitos negativos, como a dispersão de fibras ou fibras aglomeradas que poderiam enfraquecer as propriedades do material, impactando nos valores de resistência à flexão e porosidade das amostras (KHORAMI et al, 2017).

Jarabo et al (2013) fazem um estudo da adição de caule de milho, resíduo agrícola, usado como um reforço nas placas de fibrocimento. Para avaliar a eficácia desta adição, as propriedades físicas e mecânicas das amostras das placas foram determinadas. O módulo de elasticidade foi determinado através de testes de flexão. As amostras foram preparadas em laboratório e os resultados foram positivos, com altos valores de resistência, associados, segundo autores, a boa variedade de fibras e partículas sólidas.

Outro estudo relacionado à análise de reforço com fibras em placas de fibrocimento é abordado por Simatupang e Lange (1987), mas neste caso, as fibras são sintéticas. Uma certa quantidade de variáveis foi adicionada e o objetivo do estudo foi analisar o reforço em relação às placas sem fibras de plástico. A resistência também foi determinada através do ensaio mecânico de flexão, em que foi aumentada com a adição das fibras, além de apresentarem durabilidade adequada em testes acelerados.

O único estudo encontrado relacionando o material e o ensaio vibroacústico foi desenvolvido por Novak (1992), em que ele usa diferentes materiais para medir e realizar cálculos teóricos do índice de redução sonora. Para medir esse índice, ele utilizou paredes duplas e com material de absorção nas lacunas. Num dos ensaios foi utilizada uma placa cimentícia de 10 mm, com reforço de celulose, entretanto o módulo de elasticidade já era conhecido.

Recentemente, Liu et al (2020) publicaram um estudo para avaliar o comportamento sísmico de materiais compósitos, onde as amostras são excitadas em mesas vibratórias. As análises foram realizadas com elementos finitos, a fim de avaliar os resultados experimentais e comparar o comportamento das paredes de compósitos com resíduos metálicos em concreto poroso (CCWMTPC) com as paredes de alvenaria convencional, dentro dos padrões chineses.

A principal conclusão do estudo foi que as paredes de compósitos não apresentaram nenhum dano e a frequência fundamental permanece constante, ou seja, apresentam um bom comportamento sísmico. Isso se correlaciona com as propriedades físicas e mecânicas destes materiais, bem como a adição dos reforços.

Também foi encontrado um estudo que avalia a resposta dinâmica de painéis estruturais isolados (SIP), com preenchimento de poliestireno estendido (EPS), no impacto de detritos transportados pelo vento. Para isso, foi utilizado um sistema de canhão pneumático, a fim de observar os modos de falha e danos em vários cenários dos impactos de projéteis, através dos perfis de deformação. Este estudo fornece as propriedades mecânicas, mas relata a importância de se conhecê-las, concluindo que os materiais dúcteis podem absorver energia de impacto através de grande deformação, enquanto materiais de face rígida e quebradiça, como o fibrocimento, são propensos a serem penetrados em modo de ruptura por cisalhamento devido à sua fragilidade (CHEN; HAO, 2015). Também é ressaltada a importância das fibras no reforço estrutural dos painéis, uma vez que todas as amostras testadas falharam, na velocidade abaixo da especificada pelo padrão australiano.

Em mais um artigo encontrado, as propriedades mecânicas de placas cimentícias foram determinadas pelo ensaio mecânico de flexão. Neste caso, são placas de fibrocimento autoclavado (FC), e no estudo, foi introduzido um procedimento para fabricar placas de FC em laboratório e métodos econômicos alternativos para aumentar a ductilidade. Os resultados mostraram que a ductilidade das placas FC foi melhorada pela redução da resistência à tração da matriz. Isso foi conseguido reduzindo a densidade (aumentando porosidade) ou substituindo parcialmente o cimento Portland por cinzas volantes (AKHAVAN; CATCHMARK; RAJABIPOUR, 2017).

Majumdar e Laws (1979) publicaram um estudo sobre a adição de fibras no cimento. A preocupação imediata foi garantir que as fibras e o cimento fossem utilizados de maneira correta, de forma a atingir as propriedades necessárias. Os autores ressaltam que, seja qual for a aplicação, o custo é sempre uma consideração importante e que a fibra deve ser relativamente barata, sugerindo que as fibras aparentemente mais promissoras são o vidro resistente a álcali e as poliolefinas. O composto considerado mais simples foi em que as fibras são contínuas e alinhadas na direção da tensão aplicada.

Araújo e Mello (2013) apresentam que a RSL é uma técnica muito eficaz na eliminação da tendenciosidade no processo de busca por artigos para fundamentação teórica, facilitando o processo de replicação e também a análise dos resultados. O resultado dessa revisão sistemática, conforme apresentado acima, permitirá comparar os valores encontrados

neste trabalho, ressaltando a qualidade do mesmo. Não foram encontrados na literatura dados que correlacionam o módulo de elasticidade dinâmico com a densidade de placas cimentícias e suas respectivas espessuras nominais. No entanto, o Quadro 4 apresenta valores de propriedades físicas (densidade e módulo de elasticidade) de placas cimentícias dos autores encontrados na literatura após aplicação da RSL. Sendo assim, este trabalho irá abordar estes resultados e obter esta correlação das duas propriedades das placas cimentícias, com fibras curtas e aleatórias e para as placas com as fibras ordenadas em malha.

Quadro 4 – Valores referenciais encontrados na literatura.

Referência	Material	Espessura	Reforço	Módulo de Elasticidade	Densidade (g / cm ³)
NOVAK	Placa Cimentícia Minerit	10 mm	Aglomerado de celulose	70 GPa na direção longitudinal e 60 GPa na direção latitudinal.	-
LIU et al	Placas de cimento	10 mm	Fibras	10 GPa	1,700
JARABO et al	Fibrocimento	6 mm	Caule de milho	15,0–16,8 GPa	1,727-1,708
SIMATUPANG e LANGE	Fibrocimento	6 mm	Sintéticas (Álcool polivinílico)	12,055 GPa (Duração de 48 semanas de teste)	-
CHEN E HAO	Fibrocimento	6 mm	preenchimento de poliestireno estendido (EPS)	10 GPa	1,580
MAJUMDAR e LAWS	Fibrocimento	10 mm	Fibra de vidro	20-25	-
KRÁL et al	Painel OSB18	18 mm	-	4287,93-5804-96 MPa	0,503-0,638

Fonte: Novak (1992), Liu et al (2020), Jarabo et al (2013), Simatupang e Lange (1987), Chen e Hao (2015), Majumdar e Laws (1979) e Král et al (2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

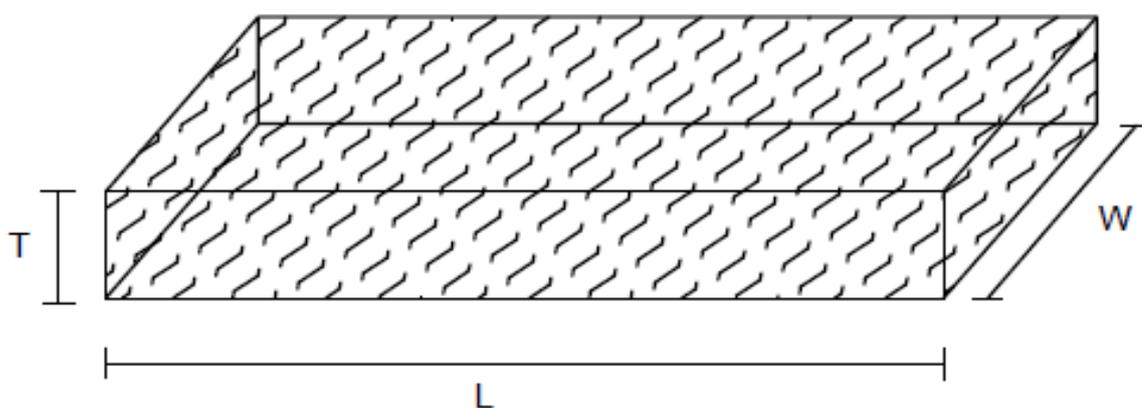
Esta seção tem por finalidade apresentar as metodologias utilizadas para determinação das propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade dinâmico de corpos de prova de placas cimentícias.

3.1. CORPOS DE PROVA DE PLACAS CIMENTÍCIAS

Para a determinação das propriedades físicas de placas cimentícias foram utilizados produtos comerciais da construção civil de dois fabricantes. Dentre os materiais constituintes das placas cimentícias, são citados perlita, liga cimentícia, fibra de vidro e outros elementos, assim como também podem ser constituídas de cimento Portland e agregados naturais, conforme relatado na seção 2.1.

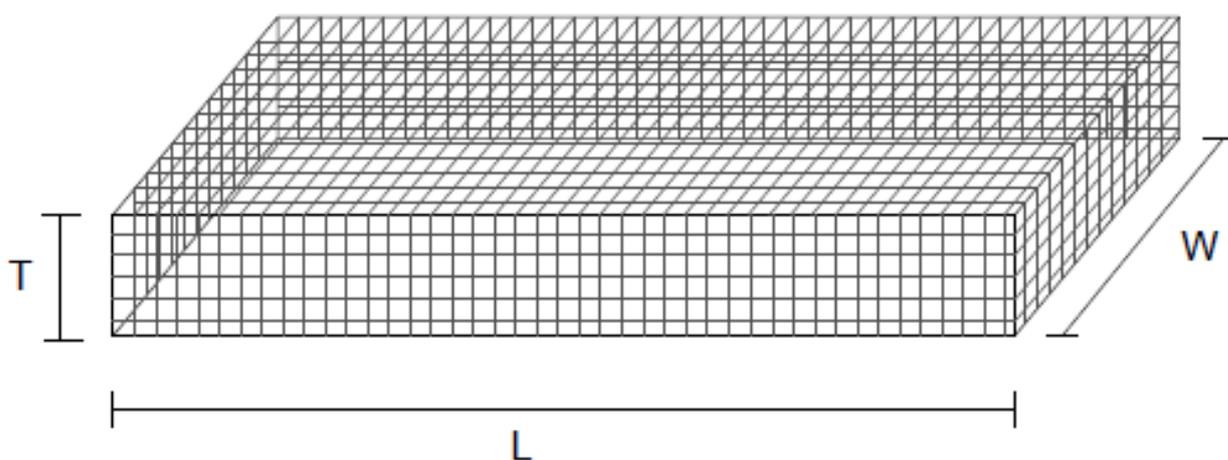
As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, as representações esquemáticas de corpos de prova de placas cimentícias para uma disposição de fibras curtas descontínuas e aleatórias (Figura 6) e de fibras longas ordenadas em malha (Figura 7).

Figura 6 – Representação esquemática de um corpo de prova de Placa Cimentícia com Fibras Curtas Descontínuas e Aleatórias (PCFCDA).



Fonte: Autora (2020).

Figura 7 – Representação esquemática de um corpo de prova de Placa Cimentícia com Fibras Longas Ordenadas em Malha (PCFLOM).



Fonte: Autora (2020).

Nas Figuras 6 e 7, T representa a espessura, L o comprimento e W a largura, sendo essas grandezas denominadas de parâmetros geométricos de corpos de prova de placas cimentícias, nesse trabalho.

Conforme os fabricantes, as espessuras nominais das placas cimentícias (produtos comerciais) variam de 6 mm a 12 mm. Ressalta-se a importância do(a) engenheiro(a) ou arquiteto(a) consultar o manual técnico das placas cimentícias, para a correta aplicação com relação às espessuras nominais (PROFORT, 2016; BRASILIT, 2016). Nesse sentido, de forma complementar aos manuais técnicos, o presente trabalho visa contribuir com a determinação das propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade, sendo importantes grandezas físicas em simulações estruturais, por exemplo (SCREMIN, 2017, p. 83).

Conforme a Norma ASTM E1876-0 e com os valores nominais das espessuras das placas cimentícias estabelecidas pelos fabricantes, os valores nominais dos parâmetros geométricos W e L foram estabelecidos para a confecção de corpos de prova de PCFCDA (Placa Cimentícia com Fibras Curtas Descontínuas e Aleatórias) e PCFLOM (Placa Cimentícia com Fibras Longas Ordenadas em Malha).

Ressalta-se a importância em mensurar experimentalmente os parâmetros geométricos (além da massa e frequência flexional, relatados a seguir) de forma sistemática e

metodológica, pois serão utilizados para as determinações indiretas da densidade e do módulo de elasticidade dinâmico.

Seguindo as condições da Norma ASTM E1876-0, para as espessuras nominais (T_N) de 8 mm, 10 mm e 12 mm definidas pelos fabricantes, as dimensões para a largura nominal (W_N) e comprimento nominal (L_N) foram definidas nesse trabalho, e estão disponíveis na Tabela 1, expressas em milímetros [mm].

Tabela 1 – Parâmetros geométricos nominais dos corpos de provas das placas cimentícias.

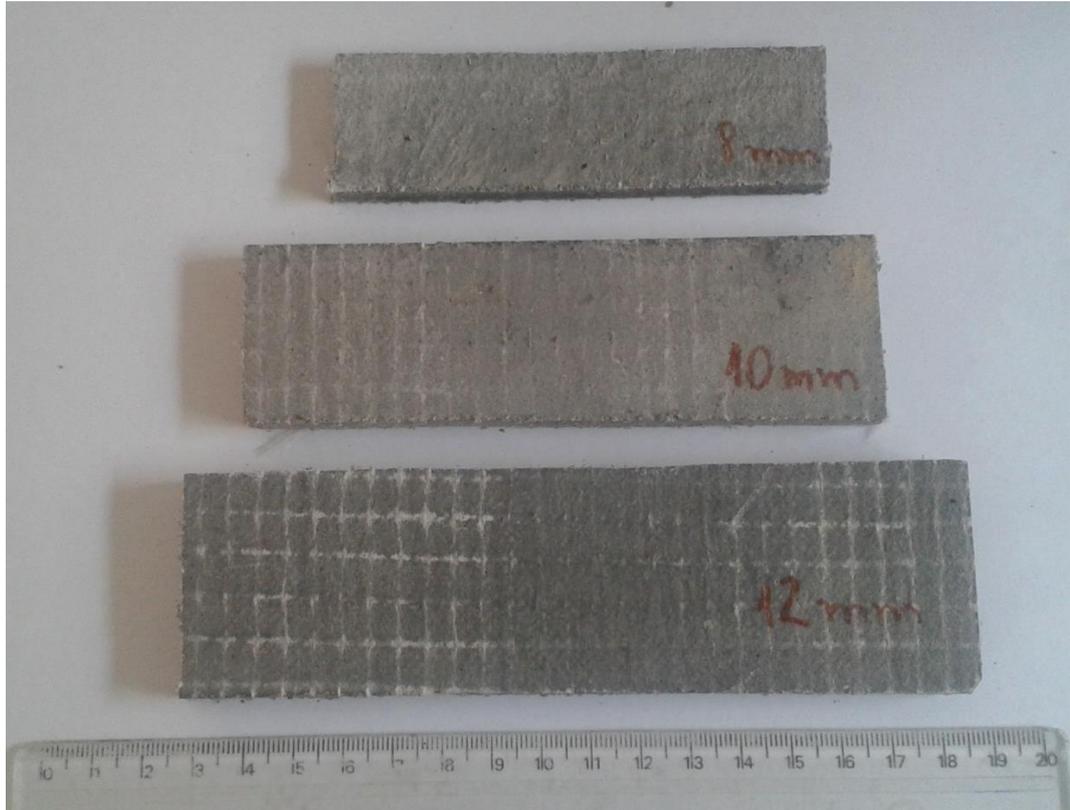
T_N [mm]	W_N [mm]	L_N [mm]
8	32	106,6
10	40	133,3
12	48	160,0

Fonte: Autora (2020).

Para as três espessuras nominais, com as larguras e comprimentos nominais estabelecidos (Tabela 1), com a utilização de um lápis para carpinteiro e esquadro combinado, marcações foram realizadas nas placas cimentícias (produtos) para obtenções de corpos de prova de PCFCDA e PCFLOM, após processamento de corte com máquina serra circular.

Para mostrar a qualidade visual do processamento de corte, a Figura 8 apresenta corpos de prova de PCFLOM obtidos para três espessuras nominais. Nesta figura é possível observar as malhas de fibras longas ordenadas de forma bidimensional, principalmente para a espessura nominal de 12 mm.

Figura 8 – Corpos de prova de PCFLOM após processamento de corte.



Fonte: Autora (2017).

Como mencionado anteriormente, dois produtos comerciais de dois fabricantes foram selecionados para três espessuras nominais (8, 10 e 12 mm), em que cinco corpos de prova foram confeccionados para cada condição (fabricante e espessura), totalizando trinta corpos de prova.

3.2 METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Matematicamente, a densidade é definida pela razão entre a massa m e o volume V , sendo dada por:

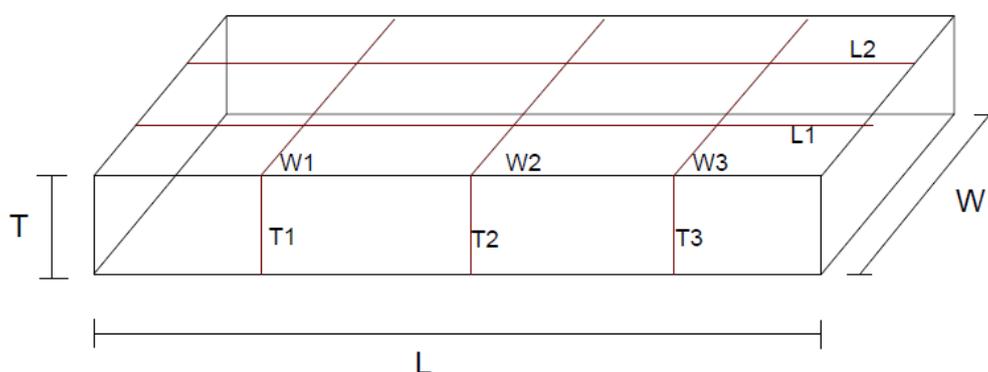
$$\rho = \frac{m_{méd}}{T_{méd} W_{méd} L_{méd}} \quad (11)$$

Para calcular a densidade definida pela Equação 11, será necessário realizar medições das grandezas T , W , L e m para estimar os seus valores esperados ($T_{méd}$, $W_{méd}$, $L_{méd}$ e $m_{méd}$, ou seja, médias de cada corpo de prova) e respectivas incertezas (erros) combinadas (δT , δW , δL

e δm , ou seja, desvios padrões de cada corpo de prova, erros sistemáticos e erro de calibração) de cada um dos cinco corpos de prova de uma mesma condição (fabricante e espessura nominal). Para representar cada população do conjunto composto por cinco corpos de prova de uma mesma condição, os cálculos da média das médias de cada corpo de prova, assim como, a média das incertezas combinadas foram empregados. As expressões matemáticas da estatística realizada serão apresentadas na seção de resultados.

A Figura 9 apresenta a metodologia estabelecida para a medição dos parâmetros geométricos T , W e L para cada um dos trinta corpos de prova de placas cimentícias, para uma representação esquemática de um corpo de prova.

Figura 9 – Representação esquemática de um corpo de prova, indicando a localização de medição dos parâmetros geométricos.



Fonte: Autora (2017).

O instrumento utilizado para medir os parâmetros geométricos (T , W e L) foi um paquímetro, que possui resolução de 0,05 mm. A largura W e espessura T foram mensuradas em três pontos diferentes de cada corpo de prova retangular, e o comprimento L foi medido em dois pontos, conforme apresentado na Figura 9. Com os dados brutos de T , W e L de cada um dos cinco corpos de prova de cada condição, a estatística descritiva foi empregada para calcular a média, o desvio padrão e a incerteza combinada de cada parâmetro geométrico, sendo este procedimento para cada um dos corpos de prova.

Para a determinação da massa de cada corpo de prova, as três mensurações foram realizadas com a utilização de uma balança de precisão, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Representação da determinação da massa de um corpo de prova de PCFLOM.



Fonte: Autora (2017).

A balança utilizada possui resolução de 0,1 g. A calibração da balança foi realizada com a medição da massa de um peso padrão de 200 g, em que foi observado experimentalmente um desvio em módulo de 0,13 g, em relação ao valor assumido como verdadeiro (peso padrão de 200 g). Cabe ressaltar que as verificações da resolução e calibração da balança possibilitaram as estimativas dos erros de resolução e calibração, respectivamente, os quais serão apresentados na seção de resultados, assim como o tratamento estatístico das medições das massas.

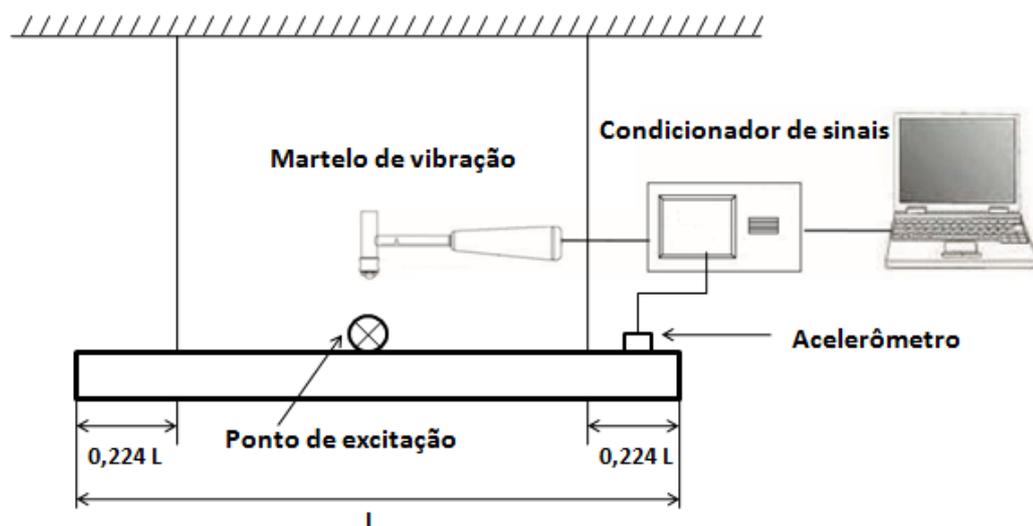
Os experimentos para as determinações experimentais dos parâmetros geométricos e da massa dos corpos de prova foram realizados para a temperatura de 28 ± 1 °C e umidade relativa do ar de ± 64 %.

3.3. METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O módulo de elasticidade pode ser determinado por ensaios mecânicos nas seguintes condições de carregamento: i) quase-estático, e ii) dinâmico. Alguns autores denominam o módulo de elasticidade dinâmico quando determinado na condição de carregamento dinâmico. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado por ensaio vibroacústico pela “Técnica de Excitação por Impulso”. Como o módulo de elasticidade é uma propriedade física intrínseca de cada material, esta será a denominação adotada neste trabalho, e que foi determinado através do ensaio mecânico pela “Técnica de Excitação por Impulso”. Esta consiste em excitar um corpo de prova com um leve impulso mecânico (batida leve com um martelo) e as vibrações são captadas por um transdutor para que as frequências de ressonância possam ser lidas, como observado na Figura 11. O cálculo o módulo de elasticidade e do amortecimento é feito através das frequências e da atenuação da resposta acústica, ou seja, quanto maior o amortecimento, menor será a duração do som (ACTP, 2009).

A resposta acústica consiste no som emitido pelo corpo de prova e tem origem nas suas frequências naturais de vibração. É importante ressaltar que estas frequências dependem da geometria, dimensões e da massa do corpo de prova.

Figura 11 – Ensaio mecânico pela técnica de excitação por impulso.



Fonte: Silva (2018).

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (E) de cada corpo de prova das placas cimentícias foi calculado por (ASTM-E1876, 2000):

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf_f^2}{W} \right) \left(\frac{L^3}{T^3} \right) T_1. \quad (12)$$

em que m é a massa do corpo de prova [g], f_f é a frequência de ressonância flexional [Hz], W , L e T são, respectivamente, a largura, o comprimento e a espessura do corpo de prova [mm]. O parâmetro T_1 consiste em um fator de correção para a flexão básica, dado por (ASTM-E1876, 2000):

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752\nu + 0,8109\nu^2) \left(\frac{T}{L} \right)^2 - 0,868 \left(\frac{T}{L} \right)^4 - \left[\frac{8,340 * (1 + 0,2023\nu + 2,173\nu^2) \left(\frac{T}{L} \right)^4}{1,000 + 6,338(1 + 0,1408\nu + 1,536\nu^2) \left(\frac{T}{L} \right)^2} \right] \quad (13)$$

em que ν é o coeficiente de Poisson.

Entretanto, para estimar o valor de T_1 deve-se avaliar a razão L/T . Se este valor for menor que 20, o valor deste parâmetro é calculado pela Equação (13), porém, se for maior ou igual a 20, a equação para T_1 pode ser simplificada para (ASTM-E1876, 2000):

$$T_1 = \left[1,000 + 6,585 \left(\frac{T}{L} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

Pela técnica de excitação por impulso, o valor do módulo dinâmico pode ser obtido tanto pelas frequências flexionais (no qual o impulso e a captação ocorrem no centro do corpo de prova) quanto para frequências longitudinais (no qual o impulso é aplicado em uma extremidade e captado no lado oposto do corpo de prova), sendo que o valor do módulo obtido no modo flexional (elasticidade) é superior ao obtido no modo longitudinal (cisalhamento), (HELENE et al., 2014).

Cada corpo de prova foi posicionado a uma distância de $0,224 L$ das suas extremidades (Figura 12), onde L representa o comprimento do corpo de prova.

Figura 12 – Realização do ensaio mecânico pela técnica de excitação por impulso.



Fonte: Autora (2017).

Obedecer a distância de $0,224 L$ é importante, pois caso a condição de engaste realizada com os fios de nylon não seja satisfeita, poderá comprometer a qualidade dos resultados de frequência a serem obtidos. A posição de impactação do martelo no corpo de prova também deve seguir a indicação da Norma ASTM-E1876 (2000). O ponto onde o impacto é realizado depende do tipo de vibração que se deseja produzir (FIORENTIN, 2007). No ensaio realizado, esse impacto foi no centro do corpo de prova, obtendo a frequência flexional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos para os valores das propriedades densidade e módulo de elasticidade, bem como a correlação dessas duas propriedades físicas.

4.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E MASSA

Após o corte das placas cimentícias, corpos de prova (CPs) foram obtidos para cada espessura destes produtos comerciais, constituindo uma amostragem de 5 CPs.

O valor médio de cada parâmetro geométrico (\bar{T} , \bar{W} e \bar{L}) e da massa (\bar{m}) de cada amostragem composta por 5 CPS, foram obtidos através da média aritmética (\bar{X}) de cada valor, conforme equação abaixo:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=5} (X_{méd})_i \quad (15)$$

Para cada corpo de prova, também foram calculados os erros experimentais, através da expressão:

$$\delta X = \sqrt{\delta_{aleat}^2 + \delta_{sist}^2 + \delta_{calib}^2}, \quad (16)$$

em que δ_{aleat} corresponde ao erro aleatório, δ_{sist} ao erro sistemático associado e δ_{calib} corresponde ao erro de calibração do instrumento de medição, que neste caso, foi calculado somente para a balança de precisão utilizada para determinação da massa.

O erro aleatório se caracteriza por ser imprevisível, sendo responsável pela diferença dos resultados quando se repete as medições, calculado pelo desvio padrão amostral:

$$\delta_{aleat} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=5} \left(\frac{X_{méd}(i) - \bar{x}}{n-1} \right)^2} \quad (17)$$

Já o erro sistemático está diretamente ligado ao sistema de medição, considerado um erro previsível, que indica a tendência de um instrumento em registrar resultados e foi obtido através da equação:

$$\delta_{sist} = \sqrt{\frac{\Delta s}{12}}, \quad (18)$$

em que Δs corresponde a menor medida do instrumento de medição. Neste caso, a menor medida do paquímetro é 0,05 mm e da balança, 0,1 g.

O erro de calibração da balança foi calculado utilizando um peso padrão de 200 g, obtido através da equação:

$$\delta_{calib} = \frac{|m_{teórico} - m_{medido}|}{m_{teórico}} = \frac{|200 \text{ g} - 200,12 \text{ g}|}{200 \text{ g}} = 0,0006 \quad (19)$$

De maneira geral, o valor dos parâmetros geométricos e da massa correspondem ao valor médio e seu respectivo erro, representado por:

$$X = \bar{X} \pm \delta X \quad (20)$$

As Figuras 13 e 14 apresentam o comportamento da espessura (T) em função da espessura nominal (T_N) para as amostragens de corpos de prova obtidos de “Placas Cimentícias com Fibras Curtas Descontínuas e Aleatórias” (PCFCDA) e para as “Placas Cimentícias com Fibras Longas Ordenadas em Malha” (PCFLOM), respectivamente, bem como os erros associados. Observa-se que quanto menor for o erro combinado associado à média, mais próxima a medição do parâmetro T está de T_N .

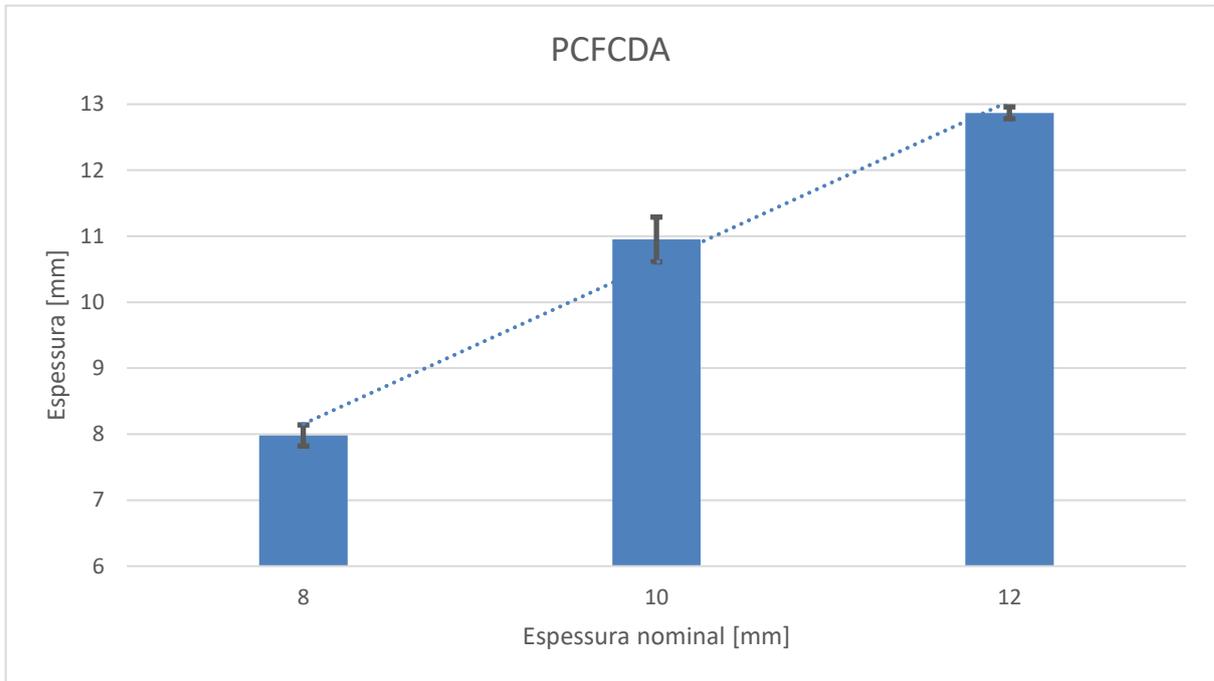
Também foram calculadas as equações reduzidas da reta para as figuras que relacionam o comportamento da espessura média com a espessura nominal. Para as PCFCDA a equação da reta é:

$$T = 1,21324(T_N) - 1,67174 \quad (21)$$

Enquanto para as PCFLOM, a equação de ajuste é:

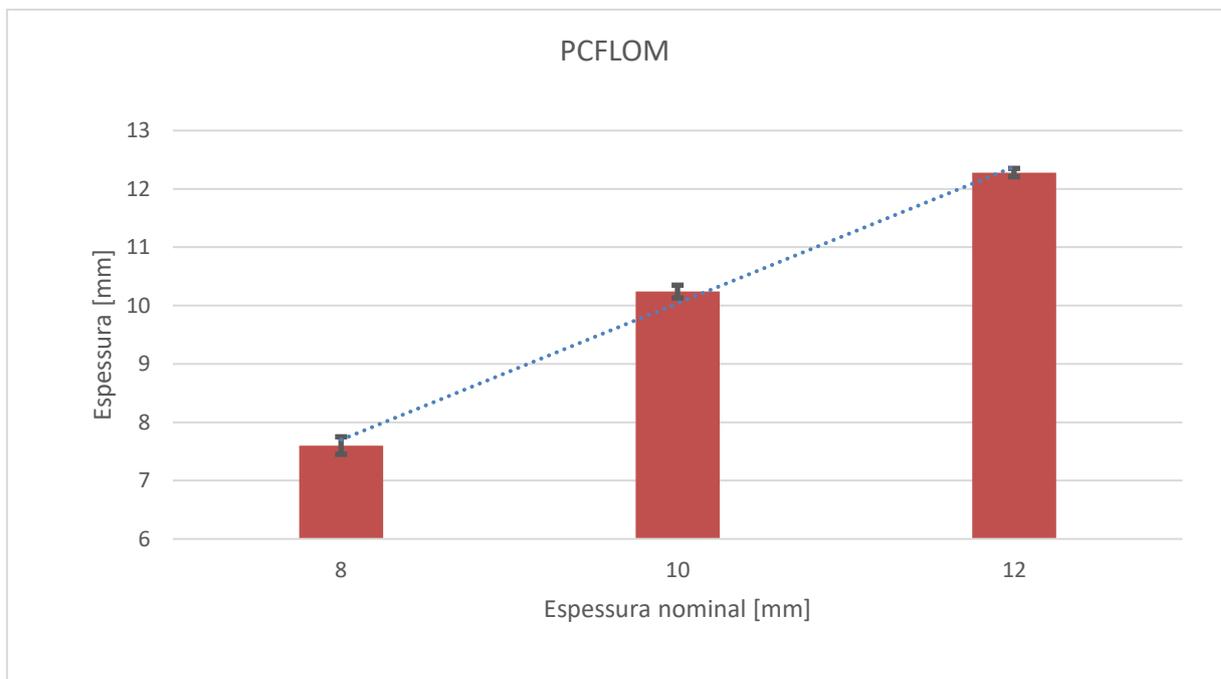
$$T = 1,13586(T_N) - 1,30946 . \quad (22)$$

Figura 13 – Espessuras dos corpos de prova de PCFCDA.



Fonte: Autora (2020).

Figura 14 – Espessuras dos corpos de prova de PCFLOM.



Fonte: Autora (2020).

Ao relacionar o gráfico com a equação de reta, é possível observar que, quanto mais próximo de 1 forem os coeficientes angulares e mais próximos de zero forem os coeficientes lineares, melhores serão os resultados obtidos, ou seja, quando melhor for esta relação, mais próximo da espessura nominal (T_N) será o valor da espessura (T).

As Figuras 15 e 16 apresentam o comportamento da largura (W) em função da largura nominal (W_N) para as amostragens de corpos de prova de PCFCDA e PCFLOM, respectivamente, bem como os erros associados.

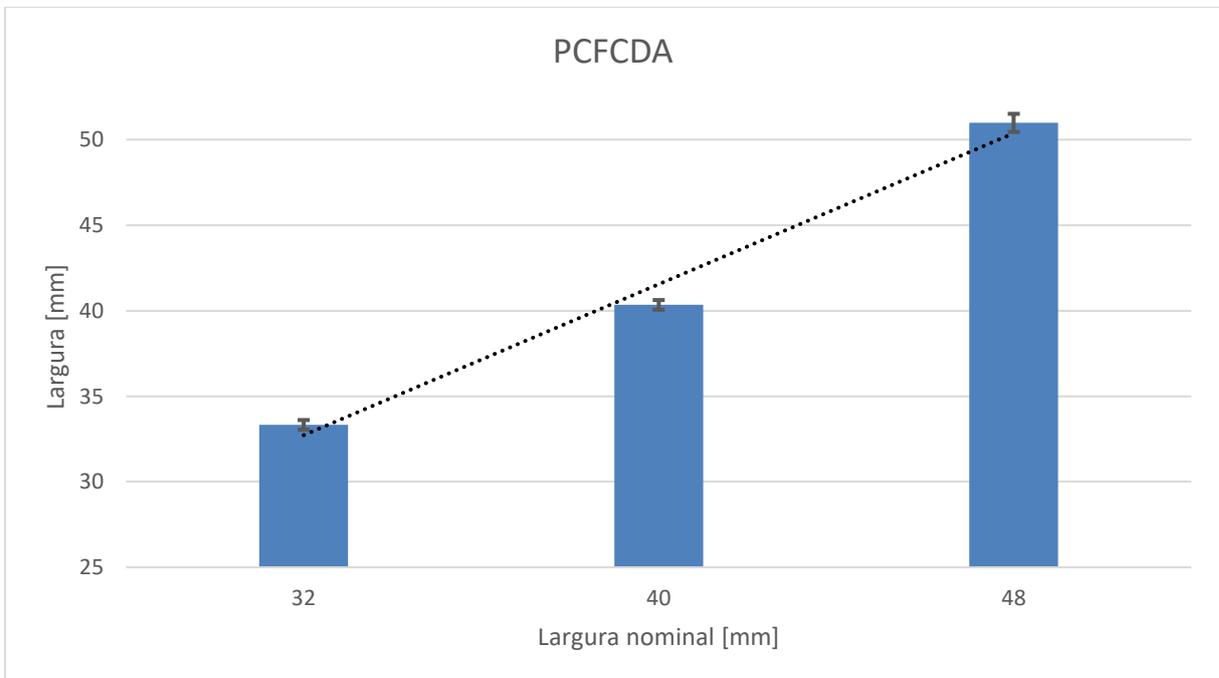
De maneira análoga à espessura, também foram calculadas as equações reduzidas da reta para as figuras que relacionam o comportamento da largura média com a largura nominal. Para as PCFCDA a equação da reta é:

$$W = 1,02432(W_N) + 0,255 \quad (23)$$

Enquanto para as PCFLOM, a equação de ajuste é:

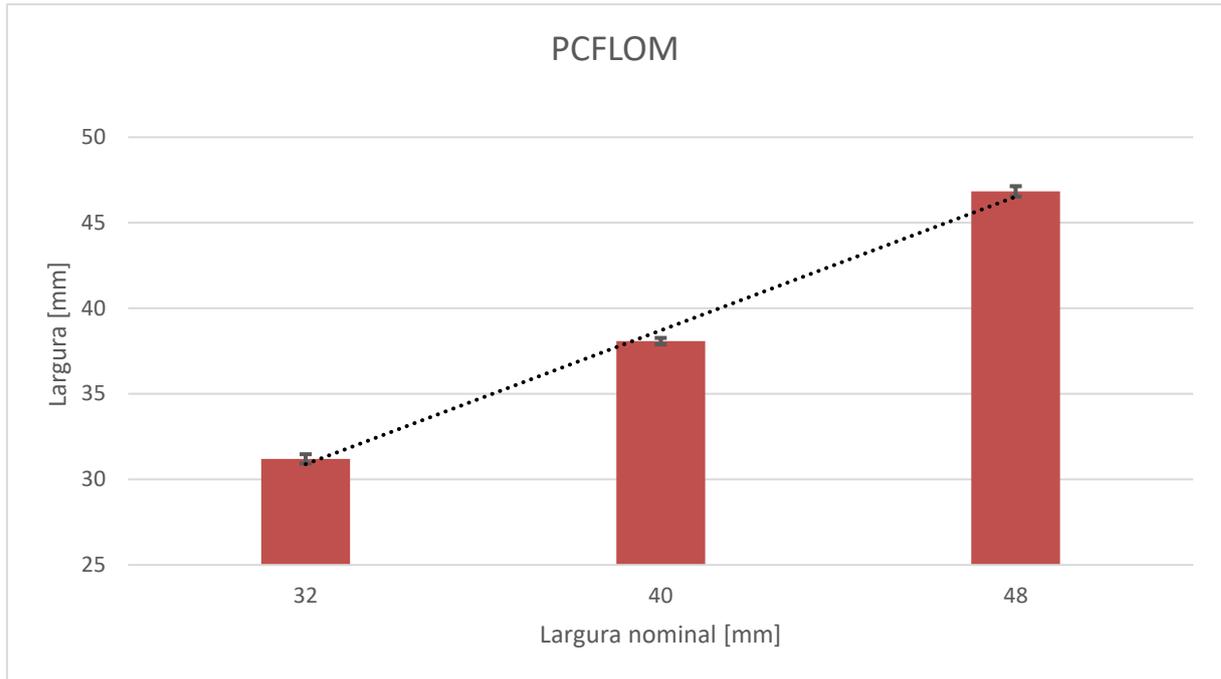
$$W = 0,87096(W_N) - 0,31676 \quad (24)$$

Figura 15 – Larguras dos corpos de prova de PCFCDA.



Fonte: Autora (2020).

Figura 16 – Larguras dos corpos de prova de PCFLOM.



Fonte: Autora (2020).

De maneira análoga à espessura, ao relacionar o gráfico com a equação de reta, é possível observar que as PCFCDA apresentaram valores mais próximos de 1 para os coeficientes angulares e valores mais próximos de zero para os coeficientes lineares, ou seja, para este tipo de placa, mais próximo da largura nominal (W_N) está o valor da largura (W).

As Figuras 17 e 18 apresentam o comportamento do comprimento (L) em função do comprimento nominal (L_N) para as amostragens de corpos de prova de PCFCDA e PCFLOM, respectivamente, bem como os erros associados.

As equações reduzidas da reta para as figuras que relacionam o comportamento do comprimento médio com o comprimento nominal são apresentadas abaixo. Para as PCFCDA a equação da reta é:

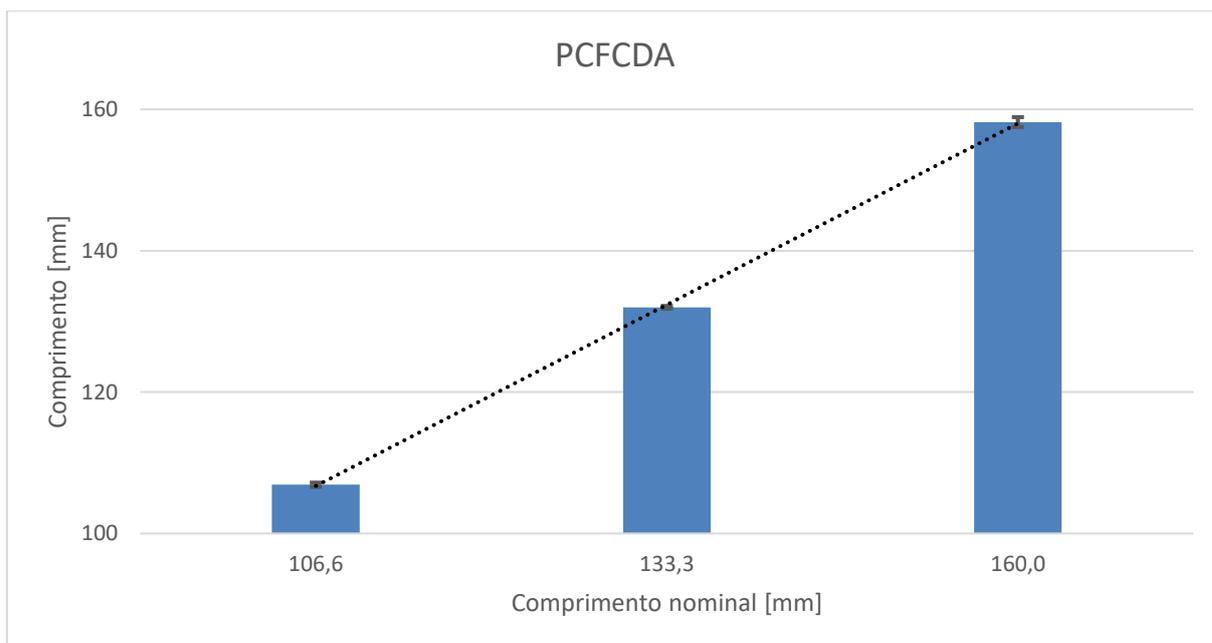
$$L = 0,95493(L_N) - 0,31676 \quad (25)$$

Enquanto para as PCFLOM, a equação de ajuste é:

$$L = 0,94686(L_N) + 5,25153 \quad (26)$$

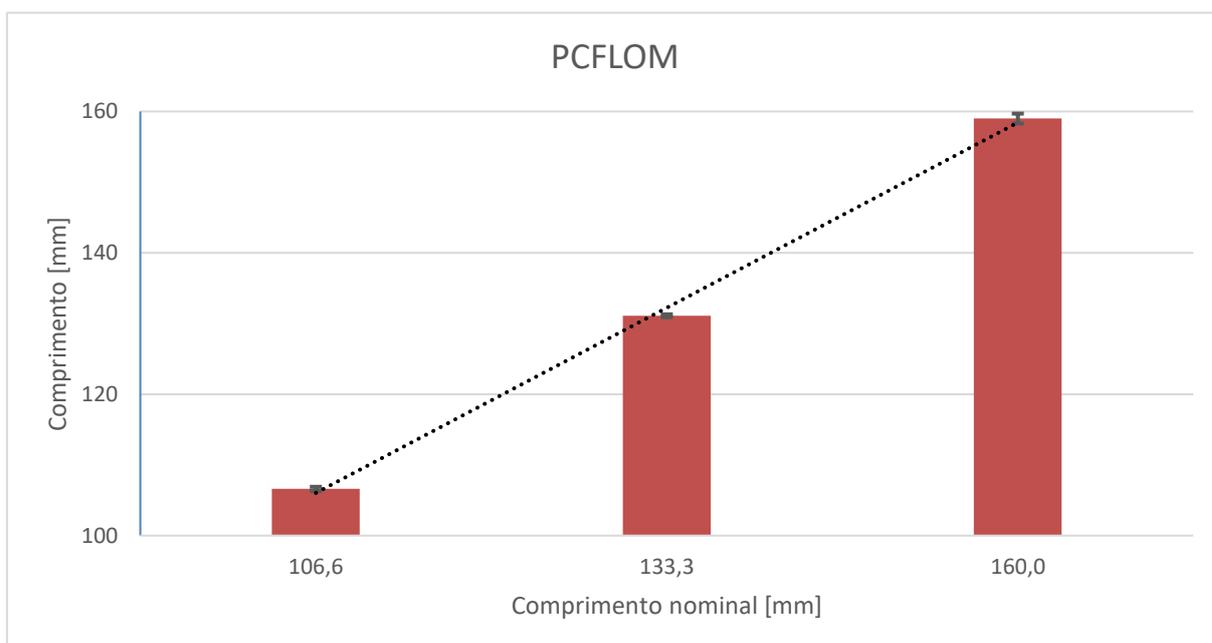
Com relação à equação da reta, as PCFCDA apresentaram melhores resultados, pois o coeficiente angular está mais próximo de um e o coeficiente angular está mais próximo de zero. Neste caso, mais próximo do comprimento nominal (L_N) será o valor do comprimento (L).

Figura 17 – Comprimentos dos corpos de prova de PCFCDA.



Fonte: Autora (2020).

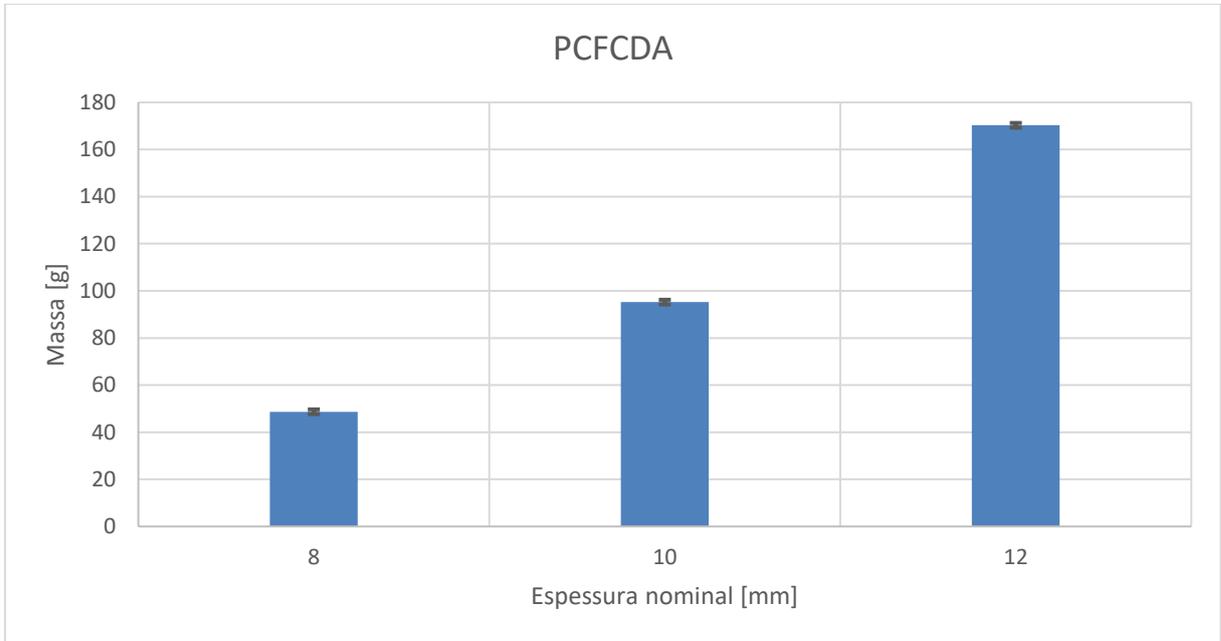
Figura 18 – Comprimentos dos corpos de prova de PCFLOM.



Fonte: Autora (2020).

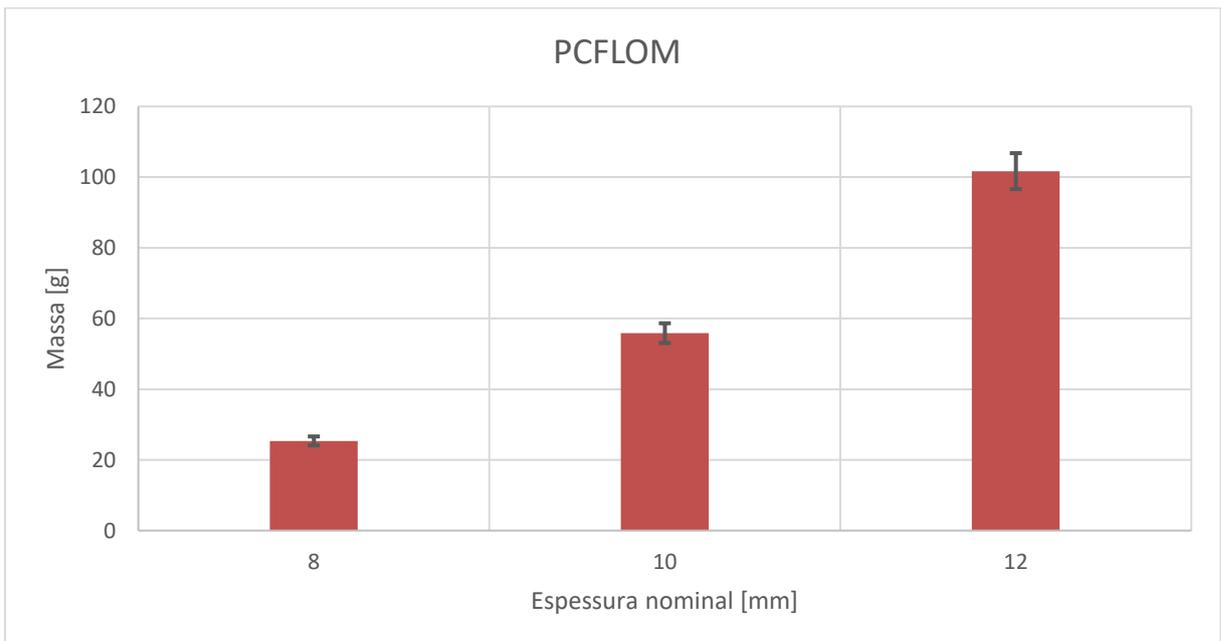
As Figuras 19 e 20 apresentam os valores das massas (m) em função da espessura nominal (T_N) para as amostragens de corpos de prova de PCFCDA e PCFLOM, respectivamente, bem como os erros associados.

Figura 19 – Massas dos corpos de prova de PCFCDA.



Fonte: Autora (2020).

Figura 20 – Massas dos corpos de prova de PCFLOM.



Fonte: Autora (2020).

Os corpos de prova das PCFCDA de 8 mm possuem espessuras 5 % maiores que as PCFLOM, além de possuírem as larguras 7 %, os comprimentos 0,4 % e a massa cerca de 92 %, superiores. De maneira similar, as PCFCDA de 10 mm possuem espessuras 6,9% maiores que as PCFLOM, bem como largura 5,9%, comprimento 0,7% e a massa 70,4% superior.

Para os corpos de prova de 12 mm, as PCFCDA apresentaram espessuras e larguras 4,8% e 8,8% superiores, respectivamente. Já para o parâmetro comprimento, apresentaram comprimento 0,5% menor que as PCFLOM. A massa das PCFCDA também apresentou valor 67,4% superior que a PCFLOM.

Esses diferentes valores dos parâmetros geométricos largura (W) e comprimento (L) podem estar associados à dificuldade encontrada no processo de corte dos corpos de prova a partir das placas cimentícias. As PCFCDA apresentaram maior dificuldade de se obter os parâmetros geométricos, a qual está relacionada com os altos valores encontrados. Vale ressaltar que os erros associados aos parâmetros W e L são superiores aos erros associados ao parâmetro T . Isto se justifica o fato de que o comprimento e a largura são obtidos através dos processos de corte, ou seja, mais susceptíveis à interferência dos erros humanos. A espessura, por sua vez, é obtida pelo processo de fabricação, com maior controle de precisão, mas, no entanto, como será apresentado adiante, apresenta o maior coeficiente de variação.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos valores dos coeficientes angulares (b) e lineares (a) das equações das retas ajustadas dos parâmetros geométricos e da massa.

Tabela 2 – Síntese dos valores dos coeficientes b e a .

Placa Cimentícia	Gráfico	Coefficiente angular do ajuste da reta (b)	Coefficiente linear do ajuste da reta (a)
PCFCDA	T vs. T_N	1,213	-1,671
	W vs. W_N	1,024	+0,255
	L vs. L_N	0,955	+5,039
PCFLOM	T vs. T_N	1,135	+1,309
	W vs. W_N	0,971	-0,317
	L vs. L_N	0,947	+5,251

Fonte: Autora (2020).

A equação reduzida da reta facilita a representação de uma reta no plano. Através do valor de b , é possível analisar a inclinação da reta e seu comportamento. Observando a Tabela 2, nota-se que todos os coeficientes angulares possuem valores positivos, ou seja, a reta é crescente. Quanto maior for este valor, maior é o ângulo entre a reta e o eixo x (horizontal) e

as PCFCDA possuem maiores valores quando comparadas às PCLOM, para cada espessura nominal.

Já o coeficiente linear representa o valor dos parâmetros geométricos para o ponto em que a reta intercepta o eixo y (vertical), ou seja, quando não há valores para o eixo x (horizontal). Para este caso, as PCLOM apresentam maiores coeficientes lineares em relação às PCFCDA para cada espessura nominal.

Com base nos valores das médias e dos erros associados dos parâmetros geométricos e da massa, foram obtidos os valores para o coeficiente de variação (CV definido como a razão entre o erro combinado e a média), conforme Tabela 3. Fisicamente, os valores de CV expressam como variam os dados estatísticos em relação à média da amostra.

É possível observar que, os maiores valores estão para o parâmetro T , ou seja, há maior variação entre a média e o desvio padrão da amostra, mostrando a repetitividade dos valores.

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de variação dos parâmetros geométricos e da massa.

Placa Cimentícia	T_N mm	CV (%) de T	CV (%) de W	CV (%) de L	CV (%) de m
PCFCDA	8	2,01	0,79	0,17	0,16
	10	3,11	0,70	0,13	0,10
	12	0,67	1,04	0,21	0,06
PCFLOM	8	1,97	0,87	0,30	0,36
	10	1,03	0,51	0,17	0,16
	12	0,59	0,63	0,31	0,09

Fonte: Autora (2020).

4.2 DENSIDADE

Os valores obtidos para a densidade (ρ) foram calculados considerando os valores dos parâmetros geométricos e da massa de cada corpo de prova, expressos na Tabela 4, bem como os erros associados. Os erros foram calculados considerando a distribuição gaussiana, ou seja, obtidos através do desvio padrão amostral de cada um dos corpos de prova.

Os valores encontrados para as Placas Cimentícias com Fibras Curtas Descontínuas e Aleatórias estão dentro da faixa de valor das placas de fibrocimento valor aproximado entre $1,5 - 1,7 \text{ g/cm}^3$, em concordância com os valores encontrados na literatura (NOVAK, 1992;

LIU et al 2020; JARABO et al 2013; SIMATUPANG e LANGE, 1987; CHEN E HAO, 2015; MAJUMDAR e LAWS, 1979 e KRÁL et al 2015), conforme apresentado na seção 2.5. Já as Placas Cimentícias com Fibras Longas Ordenadas em Malha possuem um valor de densidade um pouco abaixo desta faixa (1,0 – 1,11 g/cm³) de valor encontrado na literatura (NOVAK, 1992; LIU et al 2020; JARABO et al 2013; SIMATUPANG e LANGE, 1987; CHEN E HAO, 2015; MAJUMDAR e LAWS, 1979 e KRÁL et al 2015).

Tabela 4 – Valores médios e desvios padrões da densidade.

Placa Cimentícia	T_N mm	ρ g/cm³	$\delta\rho$ g/cm³
PCFCDA	8	1,71	0,03
	10	1,64	0,01
	12	1,64	0,02
PCFLOM	8	1,00	0,03
	10	1,09	0,05
	12	1,11	0,03

Fonte: Autora (2020).

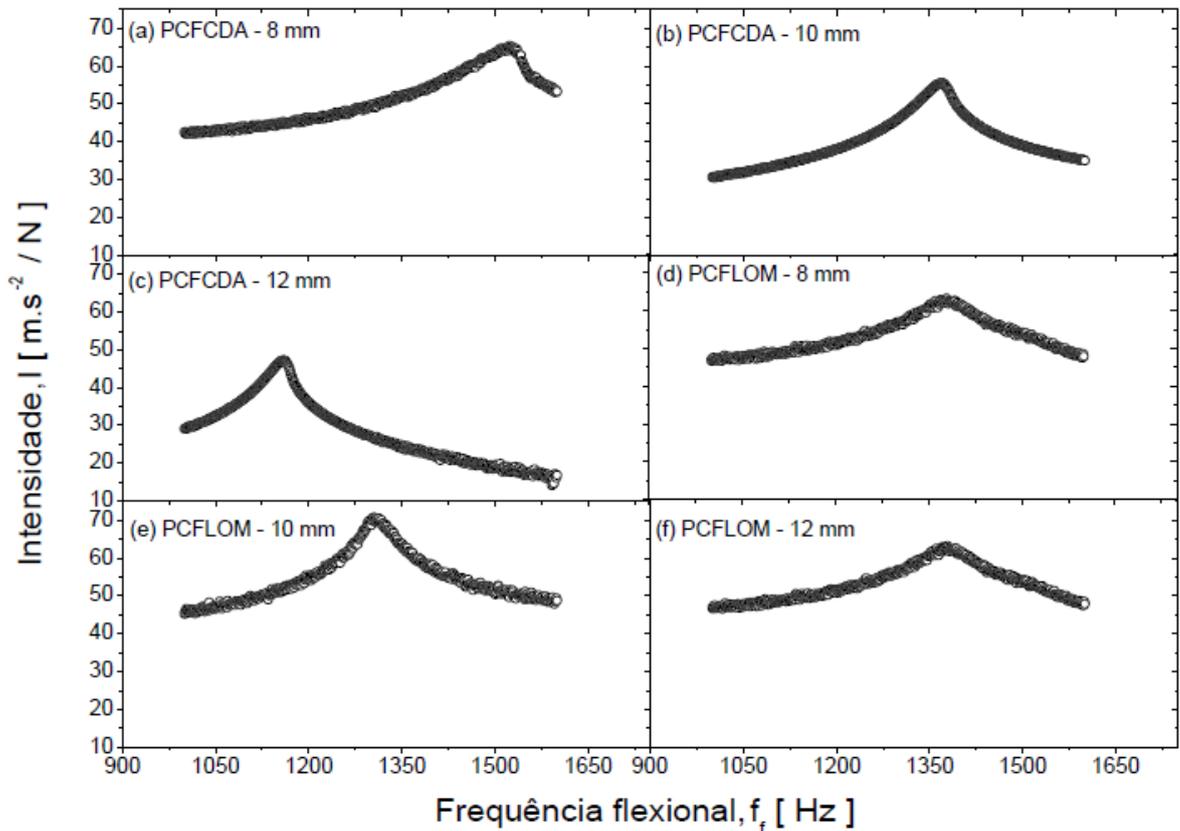
As PCFLOM possuem menores valores de densidade devido ao seu baixo valor de massa para cada corpo de prova. Esses compósitos possuem grande quantidade de fibras para o reforço da estrutura, constituindo materiais mais leves que as PCFCDA.

Já as placas PCFCDA possuem maior densidade, ou seja, maior massa, uma vez que os corpos de prova possuem valores tabelados para os parâmetros geométricos. Isso permite observar que, em aplicações de engenharia, essas placas sob a ação da gravidade possuem maior peso nas estruturas, pois o peso é proporcional à massa do corpo, conforme a segunda lei de Newton. A densidade de um sólido depende de como os átomos estão empacotados e de seu peso e volume. Como estão empacotados e seu volume não se alteram muito, essa dispersão da densidade vem principalmente da diferença de peso. Neste caso, quanto maior for a massa, maior será a densidade.

4.3 FREQUÊNCIA FLEXIONAL

A frequência flexional (f_f) foi determinada no intervalo de 900 Hz e 1800 Hz para os corpos de prova das placas (PCFCDA e PCFLOM) com espessura de 8 mm, 10 mm e 12 mm. A Figura 21 apresentam os gráficos da intensidade em função da frequência flexional de corpos de provas representativos de placas cimentícias.

Figura 21 – Intensidade em função da frequência flexional de corpos de prova representativos de placas cimentícia (PCFCDA e PCFLOM).



Fonte: Autora (2020).

No gráfico da Figura 21, observa-se que os corpos de prova (CPs) das PCFLOM apresentam maiores valores de intensidade comparados com os CPs das PCFCDA. Este fato está relacionado à resistência mecânica do material ao impacto do martelo no ensaio vibroacústico. As frequências flexionais (f_f) são obtidas a partir do ensaio vibroacústico ao se observar o ponto de intensidade máxima no gráfico (abscissa), a partir deste intervalo de frequência. Isso significa dizer que a frequência medida é compatível com o intervalo de resposta dos transdutores e do sistema eletrônico.

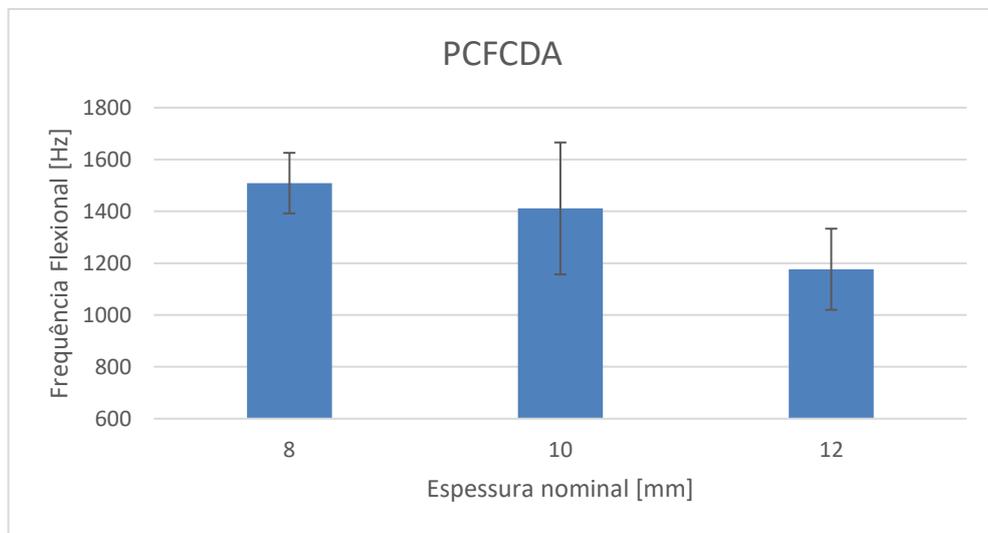
Este gráfico permite observar a tendência do sistema físico em oscilar na sua máxima amplitude (ou intensidade) e esta tendência depende da aproximação da frequência de excitação das frequências naturais do material. As frequências flexionais surgem quando o CP é apoiado em seus pontos dos nós ($0,224L$) e sofre um impacto com o martelo utilizado no ensaio.

É muito importante para o engenheiro civil de infraestrutura conhecer este comportamento mecânico do material através de ensaios dinâmicos, pois representa o modo

de vibração do material e seu comportamento após sofrer uma excitação. Exemplos deste comportamento em campo podem ser observados tanto na fase de obra, em que se faz necessário a fixação destes painéis, como também após a fase obra, caso seja necessário fixar algum objeto nas paredes feitas de placas cimentícias.

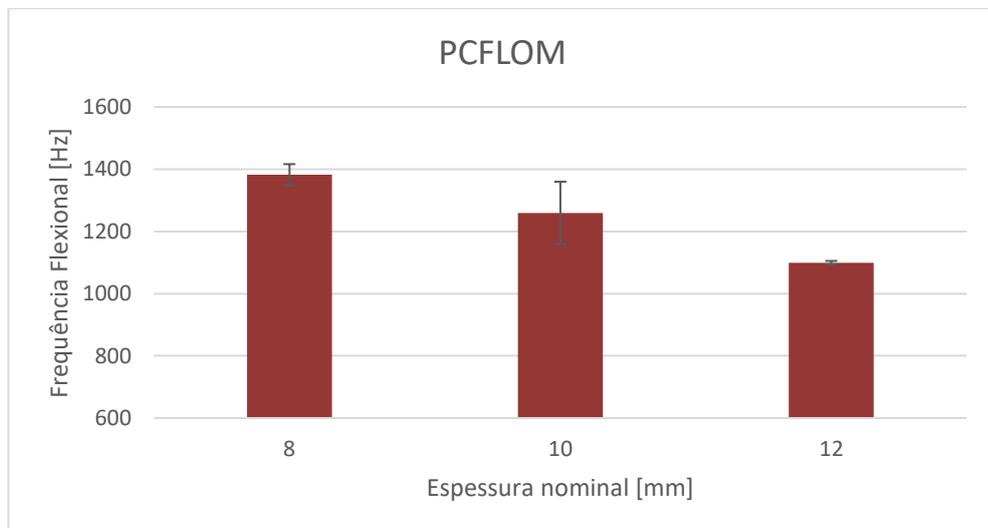
As Figuras 22 e 23 apresentam os valores das frequências flexionais no ponto de máxima intensidade (f_f) em função da espessura nominal (T_N) para as amostragens de corpos de prova de PCFCDA e PCFLOM, respectivamente, bem como os erros associados.

Figura 22 – Frequência flexional dos corpos de prova de PCFCDA.



Fonte: Autora (2020).

Figura 23 – Frequência flexional dos corpos de prova de PCFLOM.



Fonte: Autora (2020).

As frequências flexionais das PCFCDA são notadamente superiores que as PCFLOM, para todas as espessuras nominais e também, maiores valores de erros. Como já mencionado, as frequências flexionais foram obtidas ao se observar o ponto de intensidade máxima no gráfico (Figura 21). Isto significa dizer que as PCFCDA expressam maiores vibrações ao sofrerem alguma excitação.

Na Tabela 5, são apresentados os valores dos coeficientes de variação das frequências flexionais para cada espessura nominal, obtidos através da razão entre o erro e a média.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes de variação da frequência flexional.

Placa	T_N	CV (%)
Cimentícia	mm	de f_f
PCFCDA	8	7,74
	10	18,04
	12	13,30
PCFLOM	8	2,47
	10	7,95
	12	0,53

Fonte: Autora (2020).

Os maiores valores de CV encontram-se para as PCFCDA, ou seja, estas apresentaram maior variação entre a média e o desvio padrão da amostra, mostrando a repetitividade dos valores. Este valor também pode estar associado ao processo de corte, uma vez que os parâmetros geométricos também influenciam na realização do ensaio.

4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico foram calculados considerando os valores médios da massa, frequência flexional, parâmetros geométricos e do parâmetro T_1 de cada corpo de prova, de dentro de uma mesma amostragem de espessura nominal. Para encontrar os valores dos erros, foram realizados os cálculos dos desvios padrões para os corpos de prova dentro de uma amostragem para cada espessura nominal. A Tabela 6 apresenta os valores médios e os respectivos desvios padrões do módulo de elasticidade dinâmico (E) para os corpos de prova das PCFCDA e para as PCFLOM. De maneira análoga à densidade, os erros foram calculados considerando a distribuição gaussiana, ou seja, obtidos através do desvio padrão amostral.

Tabela 6 – Valores médios e desvios padrões do módulo de elasticidade dinâmico.

Placa	T_N	E	δE
Cimentícia	mm	GPa	GPa
PCFCDA	8	7,90	1,40
	10	8,32	2,42
	12	8,61	2,15
PCFLOM	8	4,21	0,31
	10	4,83	0,73
	12	5,62	0,11

Fonte: Autora (2020).

Os valores de E encontrados para as PCFCDA e PCFLOM são inferiores aos valores encontrados na literatura (NOVAK (1992), LIU et al (2020), JARABO et al (2013), SIMATUPANG e LANGE (1987), CHEN E HAO (2015), MAJUMDAR e LAWS (1979) e KRAL et al (2015)), conforme apresentado na seção 2.5, estando fora da faixa média de valores entre 10 e 15 GPa para as placas de fibrocimento. Entretanto, é importante citar que os valores da literatura para o módulo de elasticidade foram obtidos por outras técnicas, ou seja, diferente da técnica de excitação por impulso, estando relacionados com a diferença do valor encontrado neste trabalho.

As PCFCDA possuem maior módulo de elasticidade e, para amostragem, são mais resistentes mecanicamente que as PCFLOM. Assim como a densidade, a diferença de valores no módulo de elasticidade dinâmico está relacionada com os valores de massa e dos constituintes empregados no processamento de cada placa cimentícia.

Quando há uma orientação bem definida das fibras, há uma indução de concentração dos pontos de tensão, ou seja, nos pontos de interseção e sobreposição entre as fibras. Isto acontece nas PCFLOM, e esta condição das fibras ordenadas em malha faz com que estas placas possuam maior superfície específica e isso significa que haverá menor distribuição de área por unidade de peso. Nesse sentido, acarretará menores valores de densidade.

Seguindo este raciocínio, se as fibras são mais espaçadas, o que acontece também nas PCFLOM, a concentração molecular também é menor, pois haverá menor interação do ponto de vista de rigidez elástica. Quanto menor esta condição, menor será a interação molecular e consequentemente menor valor do módulo de elasticidade. Por isso, as PCFCDA possuem maiores valores de módulo de elasticidade também, uma vez que não possuem pontos diretos de concentração de tensão de linhas orientadas. Assim, há uma melhor distribuição de tensão entre os materiais moleculares, melhor distribuição de carregamento nas fibras espaçadas aleatoriamente do que nas fibras orientadas.

Essa interação química molecular mais intensa e mais próximas para as PCFCDA, as quais são responsáveis pelos maiores valores de densidade e de módulo de elasticidade dinâmico, estando correntes com a literatura.

Para esta propriedade mecânica, como hipótese (discussão realizada anteriormente), a disposição e quantidade de fibras também tem certa interferência nos valores encontrados experimentalmente, observando melhor resistência mecânica para as placas com fibras descontínuas e aleatórias. Como visto, essa resistência está associada à rigidez da ligação e do número de ligação por unidade de volume, concluindo que maior é a ligação dos átomos para as PCFCDA. Elas por sua vez, também apresentarão menores valores de deformação elástica resultante da aplicação de uma carga, podendo ser as mais indicadas para aplicações estruturais. Por fim, cabe ressaltar que os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das placas cimentícias são valores médios (comportamento mecânico global) de uma contribuição individual do módulo de cada um dos constituintes destes materiais, em que cada constituinte possui uma determinada rigidez elástica.

4.5 DIRETRIZES PARA PROJETOS DE MASSA MÍNIMA

A Tabela 7 apresenta os valores dos índices calculados que descrevem a inclinação das retas, a qual constituem uma diretriz para identificação dos materiais no mapa de Ashby, conforme apresentado na seção 2.4 (ASHBY (2012)).

Tabela 7 – Índices *A*, *B* e *C* que descrevem as diretrizes de projeto.

Placa	T_N	ρ	E	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Cimentícia	mm	g/cm³	(GPa)			
PCFCDA	8	1,71	7,90	4,63	1,65	1,17
	10	1,64	8,32	5,08	1,76	1,24
	12	1,64	8,61	5,24	1,79	1,25
PCFLOM	8	1,00	4,21	4,20	2,04	1,61
	10	1,09	4,83	4,42	2,01	1,55
	12	1,11	5,62	5,05	2,13	1,60

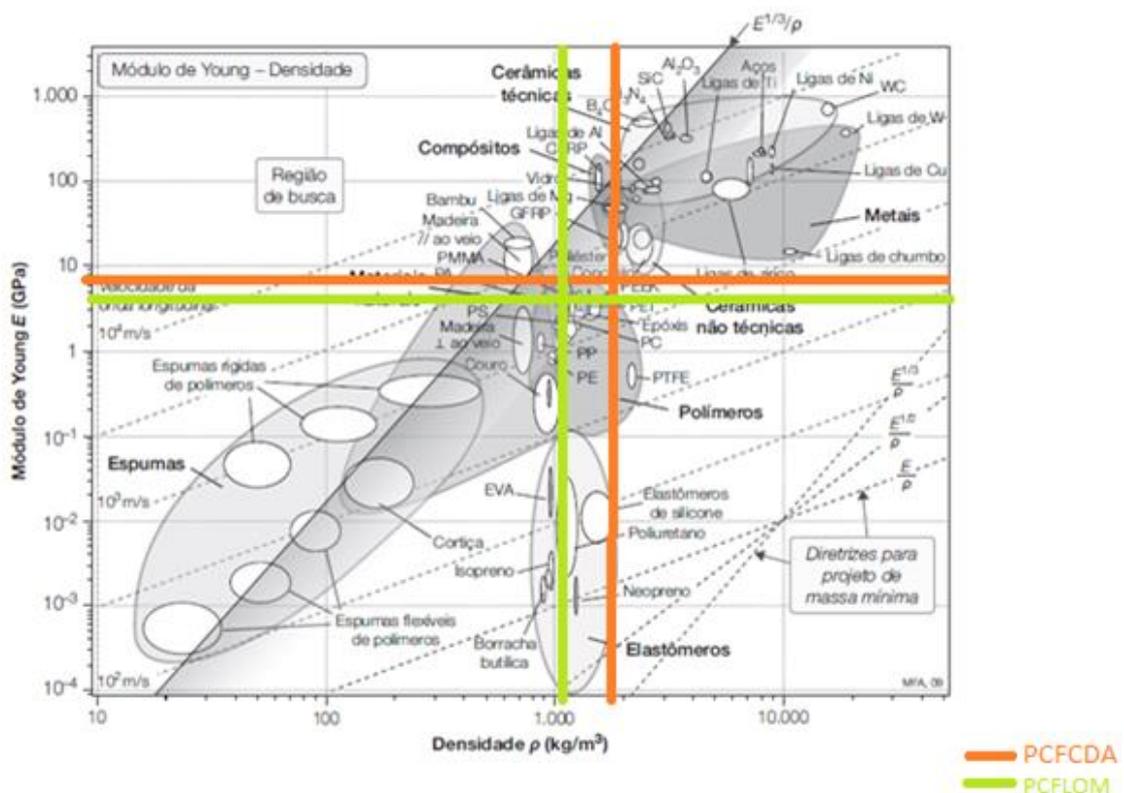
Fonte: Autora (2020).

É possível identificar que os valores dos índices *A*, *B* e *C* apresentados na Tabela 7 não variam significativamente com a espessura nominal, pois estes índices são obtidos a partir de grandezas físicas. No entanto, os índices variam com o tipo da placa cimentícia.

As constantes que relacionam o módulo de elasticidade e a densidade apresentaram valores superiores para as PCFCDA para as retas paralelas de inclinação 1 e valores superiores para as PCFLOM para as retas paralelas de inclinação igual a 3.

As placas com fibras descontínuas (PCFCDA) possuem uma densidade média de 1,66 g/cm³ e módulo de elasticidade na média de 8,27 GPa. As placas com as fibras ordenadas em malha (PCFLOM) apresentaram densidade inferior, com valor médio de 1,07 g/cm³ e módulo com valor médio de 4,89 GPa. Na Figura 24, os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico e da densidade das placas cimentícia são representados por dois pontos (E , ρ) no mapa de Ashby, o qual pode ser observado pela intersecção das linhas coloridas verticais e horizontais.

Figura 24 – Identificação dos valores no mapa de Ashby.



Fonte: Adaptado de Ashby (2012).

Os valores correlacionados das propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade expostos no mapa, permitem observar que as PCFCDA apresentam valores próximos a materiais como concreto e às cerâmicas. Já as PCFLOM apresentam valores próximos à polímeros rígidos. Este mapa correlaciona as duas propriedades em estudo,

auxiliando na seleção de materiais para aplicações de engenharia civil de infraestrutura, principalmente àquelas que exigem maior reforço estrutural dos materiais utilizados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou os resultados das propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade dinâmico de Placas Cimentícias com Fibras Curtas Descontínuas e Aleatórias e de Placas Cimentícias com Fibras Longas Ordenadas em Malha, para as espessuras nominais de 8 mm, 10 mm e 12 mm, para uma amostragem de 5 corpos de prova de cada espessura e placa cimentícia.

Quanto aos objetivos deste trabalho, foi possível confeccionar os corpos de prova, determinar os parâmetros geométricos e massa, bem como realizar os ensaios para então determinar as propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade dinâmico. A partir destes dados, realizou-se o tratamento estatístico para avaliação dos erros envolvidos. Por fim, foram determinadas as constantes para as diretrizes de massa mínima

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos cálculos, determinações experimentais, comparações e mapeamentos realizados neste estudo e das análises dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- As PCFCDA possuem maiores valores de massa e conseqüentemente, maiores valores de densidade, estando relacionados à estrutura interna das placas, bem como a disposição das fibras na matriz cerâmica;
- Os valores de módulo de elasticidade para as PCFLOM são notadamente inferiores que as PCFCDA, mostrando que as fibras aleatórias permitem maior resistência ao material, uma vez que se espalham no material, e também, que os constituintes e seus percentuais influenciam nos valores das propriedades;
- Os erros obtidos para cada grandeza (T , W , L , m e f_i) são imprescindíveis para avaliação dos resultados das grandezas físicas densidade e módulo de elasticidade dinâmico;
- As constantes que relacionam o módulo de elasticidade e a densidade apresentaram valores superiores para as PCFCDA para as retas paralelas de inclinação 1 e valores superiores para as PCFLOM para as retas paralelas de inclinação igual a 3.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi estabelecido o objetivo de se determinar o módulo de elasticidade através da técnica de excitação por impulso. Como proposta futura, uma avaliação desta propriedade pode ser realizada utilizando o ensaio mecânico de flexão (quase-estático), no intuito de se avaliar as diferenças entres esses valores. Outra proposta também pode ser realizada através da determinação da densidade por outros métodos, como por exemplo, o método que se utiliza o deslocamento de água com o CP submerso.

Esperava-se também, obter resultados da propagação dos erros envolvidos para cada parâmetro utilizado na determinação da densidade e do módulo de elasticidade para as placas cimentícias. Uma pesquisa acerca do tema é recomendada, pois nada tão específico foi encontrado nas plataformas pesquisadas.

REFERÊNCIAS

- AECWeb. **Placas cimentícias revitalizam as paredes de concreto de túneis e mergulhões.** Disponível em: https://www.aecweb.com.br/emp/cont/m/placas-cimenticias-revitalizam-as-paredes-de-concreto-de-tuneis-e-mergulhoes_8438_13692. Acesso em 17. nov.2019.
- AKHAVAN, A.; CATCHMARK, J.; RAJABIPOUR, F. Ductility enhancement of autoclaved cellulose fiber reinforced cement boards manufactured using a laboratory method simulating the Hatschek process. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 135, p. 251-259, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.001>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-01**: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration. West Conshohocken, Pa.: ASTM International, 2001.
- ARAÚJO, W. J. P.; MELLO, C. H. P. Uma revisão sistemática da literatura para a terceirização de pesquisa & desenvolvimento. In: 9º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos. **Anais**. Natal, 02 a 04 de setembro de 2013.
- ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASHBY M. F.; JONES, D. R. **Engenharia de Materiais – Uma Introdução a Propriedades, Aplicações e Projeto**, 3ª ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials: engineering, science, processing and design**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2014.
- BAUER, L.A.F. **Materiais de construção 2**. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.
- BRASILIT Produtos. **Placas cimentícias**. Disponível em: <https://www.brasilit.com.br/produtos/placa-cimenticia>. Acesso em: 13 jun. 2016.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CHEN, W.; HAO, H. Performance of structural insulated panels with rigid skins subjected to windborne debris impacts – Experimental investigations. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 77, p. 241-252, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.112>.
- CONFORTO et al. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos**, v.8, n.1998, p. 1-12, 2011.
- F3 CONSTRUÇÕES. **Placas Cimentícias**. Disponível em: <https://www.f3construcoes.com.br/instalacao/placa-cimenticia.html>. Acesso em 17. nov.2019.

FIorentin, T. A. **Estudo de geração de ruído em reatores de núcleo de ar**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

GARCIA, A; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

HELENE, P. et al. Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto. In: 56º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2014, **Anais [...]** Natal, 2014.

ITAMBÉ, C. **Itambé e Concrebras apresentam curiosidades do concreto no 51º Congresso Brasileiro do Concreto**. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/itambe-apresenta-curiosidades-do-concreto-no-51o-congresso-brasileiro-do-concreto-realizado-em-outubro-de-2009-na-cidade-de-curitiba/>. Acesso em: 18 nov.2019

JARABO, R. et al. Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 43, p. 832-839, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.034>.

JUNGES, B. M. B. et al. Hardness correlation length in a self-compacting concrete. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 1-11, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000400001>.

KHORAMI, M. et al. Utilization of waste cardboard and Nano silica fume in the production of fibre cement board reinforced by glass fibres. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 152, p. 746-755, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.061>.

KRÁL, P. et al. Specific modulus and density profile as characterization criteria of prefabricated wood composite materials. **Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, [S.L.], v. 63, n. 2, p. 433-438, 2015. Mendel University Press. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201563020433>.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. Agregados para a construção civil, DNPM. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais>. Acesso em: 18 nov.2019.

LIU, P.F. et al. Out-of-plane seismic behavior of cast-in-situ composite wall with metal tailing porous concrete. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 210, p. 110346-110361, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110346>.

LOPES, J. T. B. **Materiais de Construção Mecânica**. Belém, 2019. (Apostila)

MAJUMDAR, A.J. V. LASWS. Fibre cement composites: research at BRE. **Ipc Business Press**. Watford, p. 17-27. jan. 1979.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. New York: Cambridge University Press, 2009.

NETO, F. L.; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

NOGUEIRA, C. F. B.; SAFFARO, F. A.; GUADANHIM, S. J.. Diretrizes de projeto para a redução de perdas na produção de Habitações de Interesse Social customizadas com painéis pré-fabricados em sistemas de construção a seco. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 67-89, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000100210>.

NOVAK, R. A. Sound Insulation of Lighteight. **Applied Acoustics**, England, mar. 1992. Journal Elsevier, p. 281-303.

OLIVEIRA, L. et al. Levantamento sobre as metodologias de projeto para o desenvolvimento de veículos ferroviários. In: 11º Congresso Brasileiro de Inovação e Gestão de Desenvolvimento do Produto. **Anais**. São Paulo, 04 e 05 de setembro de 2017.

PERLITE.INFO. **Basic Facts About Perlite: Origin and Characteristics**. Disponível em: <http://www.perlite.info/hbk/0031401.htm>. Acesso em: 26 nov. 2020.

PILZ, T. L. et al. Estudo de placas cimentícias para uso em habitações populares: uma revisão sistemática da literatura. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 1, p. 1-7, jan. 2020.

PROENÇA, S. P. B. **Curso de Resistência dos Materiais**. São Carlos: USP, 2018.

PROFORT Produto. **Placas cimentícias Profort ds**. Disponível em: <http://placlux.com.br/produtos>. Acesso em: 13 jun. 2016.

QUINDELER, T. **A importância do módulo de elasticidade do concreto**. Guia do engenheiro civil. Disponível em: <https://tquindeler.wixsite.com/guiaengenheirocivil/single-post/2017/03/13/A-importância-do-módulo-de-elasticidade-do-concreto>. Acesso em 22 out. 2019.

SAMAR, M.; SAXENA, S. **Study of chemical and physical properties of perlite and its applicaation in India**. International Journal of Science Technology and Management, v. 5, n. 4, p. 70-80, abr. 2016.

SANTOS, A. M. et al. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO Concreto CBC2013. **Anais**. Gramado, 29 de outubro a 1º de novembro de 2013. Acesso em: 24 mar. 2020.

SCREMIN, A. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Departamento de Engenharia Mecânica. Data completa 2017. **Apostila**. Universidade Federal do Paraná.

SILVA, E. R. **Estudo da influência da matriz e da morfologia da grafita nas propriedades elásticas dos ferros fundidos nodular e cinzento**. 2018. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

SILVA, Julio Cezar Pedrosa da. **Fabricação e análise das propriedades mecânicas de pedra sintética a base de vermiculita e perlita**. 2019. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SIMATUPANG, M.H. e LANGE, H. Lingnocellulosic and plastic fibres for manufacturing of fibre cement boards. **The Journal of Cement Composites and Lighteigh Concrete**, Hamburg, v.9, n. 2, p.13-17, mai. 1987.

TABATABAIEFAR, H. R. et al. Mechanical properties of sandwich panels constructed from polystyrene/cement mixed cores and thin cement sheet facings. **Journal of Sandwich Structures & Materials**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 456-481, 16 dez. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1099636215621871>.

WALLNER, Cassio. **VIDA EM FADIGA DO AÇO ARBL COM ESTRUTURA FERRITA- PERLITA (Q7)**. São Bernardo do Campo: Relatório de Iniciação Científica, 2001.

ZENERATO, T. S. et al. Análise Acústica de Fachadas de Light Steel Frame e Placas Cimentícias. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 1-11, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0685>.

ZOLLO, R. F. Fiber-reinforced concrete: na overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, v.19, p. 107-122, out. 1997.

APÊNDICE A

A determinação das propriedades físicas e mecânicas de um material determinam suas características e permitem conhecer seu comportamento quando este é submetido a um determinado esforço, por exemplo. Na literatura, no que se refere as propriedades mecânicas das placas cimentícias, existem poucos artigos que descrevem essas propriedades.

Desse modo, para realizar a revisão bibliográfica de um material, foi utilizada a técnica conhecida como Revisão Sistemática da Literatura (RSL), a qual é um método sistemático para analisar resultados, conforme afirma Conforto et al (2011). Esta técnica apresenta uma vantagem de realizar contínuos ciclos de busca até que o objetivo da busca seja alcançado.

Para este trabalho, a RSL teve como base as plataformas de buscas *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*.

Para a identificação dos trabalhos científicos sobre as propriedades físicas e mecânicas das placas cimentícias, foram seguidas algumas etapas. Após escolhidas as plataformas de buscas, como já mencionado anteriormente, foram escolhidas combinações de palavras-chave para a pesquisa, em que todos os termos são em inglês, ou seja, a busca se deu pelas palavras-chaves dos artigos. Após a escolha destes itens, foi iniciada uma filtragem dos artigos, por tipo de documento, filtrando-os apenas por “*Article*”. O resultado do filtro obtido com esta pesquisa pode ser observado na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados das combinações de palavras-chave.

Combinações de palavras-chave	Science direct	Web of Science	Scopus
1- density AND “cement boards”	133	17	45
2- “Young’s modulus” AND “cement boards”	23	0	0
3- “cement boards” AND density AND “Young’s modulus”	13	1	0
4- “Elastic modulus” AND “cement boards”	6	2	4
5- density AND “Elastic modulus” AND “cement boards”	16	0	1

Fonte: Autora (2020).

Analisando a tabela acima, obtém-se a base teórica encontrada utilizando a combinação das palavras-chave. É importante ressaltar que nem todos os artigos encontrados estão disponíveis. Entretanto, foi realizado o download para os artigos que estavam disponíveis.

Esta etapa traz os resultados brutos da pesquisa. Para então utilizar os artigos encontrados, foram feitas as leituras dos resumos e então, feita a seleção dos artigos que mais se aproximaram da busca acerca do tema.

E então, após todas as buscas realizadas, foi feita uma leitura breve dos resumos dos artigos disponíveis. Nesta etapa nota-se que em combinações de palavras diferentes, alguns artigos filtrados foram os mesmos.

O principal critério inicial para a seleção dos artigos foi a correlação das propriedades físicas densidade e módulo de elasticidade e as propriedades da placa cimentícia com adição de fibras para reforço. Por isso, com este primeiro filtro, foram lidos 48 artigos, encontrados através da Revisão Sistemática da Literatura.

Por fim, foram selecionados nove artigos que se assemelham com a proposta deste trabalho, que é a de determinar o valor do módulo de elasticidade de materiais compósitos cerâmicos com adição de fibras, como é o caso das placas cimentícias