

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VERONICA LISS CARVALHO MANCUZO
ERIC COSTA OGATA

**ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE
CIMENTO-MICROCELULOSE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

VERONICA LISS CARVALHO MANCUZO
ERIC COSTA OGATA

**ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE
CIMENTO-MICROCELULOSE**

Trabalho de Conclusão de Curso 2
apresentado ao curso superior em
Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Campus
Curitiba como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Arthur Medeiros
Co-Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA
2019



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO-MICROCELULOSE

Por

VERONICA LISS CARVALHO MANCUZO

ERIC COSTA OGATA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2019 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

Orientador – Arthur Medeiros, Dr.

UTFPR

Co-Orientador – Wellington Mazer, Dr.

UTFPR

Profa. Lidiane Fernanda Jochem, Dra.

UTFPR

Mestrando em Ciência dos Materiais – Marcelo da Costa Teixeira, Engenheiro Civil.

UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaríamos de agradecer a Deus pela saúde, perseverança e clareza provida durante a realização desse trabalho, sem a qual não teríamos sido capazes de permanecer confiantes em nossas ideias e fortes nos momentos de desânimo.

Se torna imprescindível agradecer nossos caros mestres Arthur Medeiros e Wellington Mazer que com suas orientações possibilitaram maior qualidade e veemência em todo o corpo do trabalho, além de sempre estarem a disposição quando preciso.

Agradecemos também o estimado técnico de laboratório Felipe Peretto e toda sua equipe por estarem de prontidão para realização de todas as atividades relevantes ao trabalho.

Também gostaríamos de gratificar nossos pais e namorados que suportaram conosco as cabeças cansadas, os olhos pesados e as mãos doloridas durante toda a trajetória da faculdade, bem como durante o desenvolvimento desse trabalho. Vemos esse trabalho como o ápice de todo sonho, expectativa, suor e amor que vocês nos confiaram, e agora após concluído, olhamos para trás e sentimos orgulho e gratidão.

Agradecemos também a banca avaliadora presente no dia da apresentação, cujo tempo e opinião são vitais para certificar todo nosso desempenho nessa empreitada.

Não podemos esquecer também dos nossos espetaculares amigos e companheiros de curso que quando possível nos ajudaram e contribuíram para a finalização do nosso trabalho, além de ouvirem nossas reclamações e lamentações durante todo o tempo.

RESUMO

MANCUZO, Veronica L. C., OGATA, Eric C. Estudo do desempenho mecânico de compósitos de cimento-microcelulose. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Materiais compósitos são cada vez mais estudados em diversas áreas da tecnologia, apresentando propriedades capazes de em conjunto com sua matriz, melhorar o seu desempenho e entregar um produto inovador e de alta performance. Essa pesquisa teve como objetivo estudar o desempenho mecânico de compósitos cimentícios reforçados com microcelulose cristalina ou M.C.C. Para a realização de ensaios de resistência à tração na flexão e compressão axial, foram moldados corpos de prova com concentrações de 1,5%, 3% e 4,5% de M.C.C. em relação à matriz cimentícia, sendo a dispersão das partículas, realizado por meio de banho ultrassônico. Além disso, em testes piloto areias de composições diferentes foram testadas. Também foram realizados ensaios de porosimetria do material, para se correlacionar ao aumento ou diminuição da resistência em virtude da quantidade de vazios presentes na argamassa. Após a realização dos ensaios mecânicos comprovou-se o aumento de 26% na resistência à compressão, porém, em relação a resistência à tração na flexão, não houve diferença significativa entre às amostras padrão e reforçadas com M.C.C., podendo os resultados estarem intimamente ligados com a diferença de composição entre as areias arenítica e calcária utilizadas, já que nos ensaios piloto, foram observados valores de resistências tanto à compressão como à flexão significativamente maiores em relação aos testes atualizados.

Palavras-chave: Compósitos. Microcelulose cristalina. Celulose microcristalina. Argamassa.

ABSTRACT

MANCUZO, Veronica L. C., OGATA, Eric C. Study of mechanical performance of cement-micro cellulose composites. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Composite materials are increasingly studied in the most diverse fields of technology, presenting properties capable of, along with their matrix, improve their performance and deliver an innovative and high-performance product. The goal of this research is to study the mechanical performance of cementitious composites reinforced with microcrystalline cellulose, or M.C.C. In order to carry out tensile tests in flexion and axial compression, specimens with concentrations of 1.5%, 3% and 4.5% of MCC were framed based on the cementitious matrix, being the dispersion of the particles carried out through ultrasonic bath. Also, porosimetry tests were performed to correlate with the increase or decrease of the resistance. After the mechanical tests, a 26% increase on the compressive strength was noticed, which could not be observed regarding flexural tensile strength, which showed no significant difference between the standard and MCC reinforced samples. The results could be closely associated to the current type of sand, since in pilot tests, values of resistance to both compression and flexion were significantly higher than in the present study.

Keywords: Composites. Microcrystalline cellulose. Crystalline microcellulose. Mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.....	16
Figura 2 - Estrutura de um filamento individual de uma fibra vegetal	22
Figura 3 - Estrutura química básica da celulose	23
Figura 4 - Estrutura química básica da hemicelulose	23
Figura 5 - Estrutura química básica dos monômeros fenil-propanos da lignina	24
Figura 6 - Processo de manufatura da M.C.C.	25
Figura 7 - Curvas granulométricas das areias 1 e 2	29
Figura 8 - Curvas granulométricas das areias	30
Figura 9 - Microcelulose cristalina (M.C.C.)	31
Figura 10 - Cuba de banho de ultrassom.....	33
Figura 11 - Prensa universal emic DL300	34
Figura 12 - Porosímetro poremaster® 33.....	35
Figura 13 - Etapas de preparação da argamassa	38
Figura 14 - Flow test - Mesa de espalhamento.....	39
Figura 15 - Cp's na câmara úmida	39
Figura 16 - Corpo de prova no ensaio de resistência à compressão.....	40
Figura 17 - Corpo de prova no ensaio de resistência à flexão	40
Figura 18 – Resistência à tração na flexão - Ensaio piloto.....	43
Figura 19 – Resistência à compressão - Ensaio piloto.....	44
Figura 20 – Resistências à compressão e à flexão por porcentagem de M.C.C. adicionado (areia 1)	45
Figura 21 - Gráfico das resistências à tração na flexão	47
Figura 22 - Resistências à compressão	50
Figura 23 - Resistências à compressão e à flexão por porcentagem de M.C.C. adicionado (areia 2)	51
Figura 24 – Resultados de intrusão cumulativa dos ensaios piloto (areia 1).....	52
Figura 25 – Intrusão de mercúrio cumulativa dos ensaios definitivos (areia 2).....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de cimentos no Brasil	19
Quadro 2 – Especificações técnicas do cimento CP V-ARI	28
Quadro 3 - Propriedades Físico-Químicas da M.C.C.	31
Quadro 4 - Propriedades físico-químicas do Superplastificante	32
Quadro 5 - Dados técnicos da Cuba de Banho de Ultrassom.....	33
Quadro 6 - Dados Técnicos Prensa Universal EMIC DL 3000.....	35
Quadro 7 - Dados técnicos Porosímetro	36
Quadro 8 – Valores da resistência à flexão dos CPs piloto (areia 1).....	42
Quadro 9 - Valores da resistência à compressão dos CPs piloto (areia 1)	44
Quadro 10 - Valores da resistência à flexão dos CPs definitivos (areia2).....	47
Quadro 11 - Valores da resistência à compressão dos CPs definitivos (areia 2).....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de Variância ANOVA.....	41
Tabela 2 - Análise da Variância ANOVA resistência à flexão (Piloto)	43
Tabela 3 - Análise da Variância ANOVA resistência à compressão ensaios (Piloto) 45	
Tabela 3 - Análise da Variância ANOVA resistência à flexão (Definitivos).....	48
Tabela 4 - Resultados obtidos da comparação entre as concentrações de M.C.C. nas amostras definitivas	48
Tabela 6 - Análise da Variância ANOVA resistência à compressão (Definitivos)	50
Tabela 7 - Resultados obtidos da comparação entre as concentrações de M.C.C. nas amostras definitivas	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	15
2.1.1	Fase Contínua/Matriz	16
2.1.2	Fase Dispersa/Reforço	17
2.2	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	17
2.2.1	Cimento Portland	17
2.3	ARGAMASSA – COMPÓSITO CIMENTÍCIO	19
2.3.1	Aditivos	20
2.4	FIBRAS VEGETAIS	21
2.4.1	Celulose	22
2.4.2	Hemicelulose	23
2.4.3	Lignina	24
2.5	MICROCELULOSE CRISTALINA.....	24
2.5.1	Compósitos reforçados com nanocelulose e M.C.C.	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	MATERIAIS	28
3.1.1	Cimento CP V-ARI	28
3.1.2	Agregado miúdo	28
3.1.3	Microcelulose cristalina (M.C.C.)	30
3.1.4	Aditivo Superplastificante	31
3.1.5	Água de amassamento	32

3.2	EQUIPAMENTOS	32
3.2.1	Cuba de Banho de Ultrassom	32
3.2.2	Prensa Universal.....	34
3.2.3	Especificação do Porosímetro.....	35
3.3	MÉTODOS	37
3.3.1	Traço da argamassa	37
3.3.2	Banho de ultrassom	37
3.3.3	Produção da argamassa.....	38
3.3.4	Teste de Flow	38
3.3.5	Cura	39
3.3.6	Ensaio de resistência à compressão	39
3.3.7	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	40
3.3.8	Ensaio de porosidade	41
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	41
3.5	ENSAIOS PILOTO	42
3.5.1	Resistências à flexão	42
3.5.2	Resistências à compressão axial	44
4	RESULTADOS	46
4.1	ENSAIOS DEFINITIVOS	46
4.1.1	Resistência a flexão	46
4.1.2	Resistência à compressão axial	49
4.1.3	Porosimetria por intrusão de mercúrio	52
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A eficiência de um produto está diretamente interligada com a qualidade de sua matéria-prima, por esse motivo, a engenharia civil trabalha lado a lado com a engenharia dos materiais. Materiais como tubos, telhas, tijolos e outros, vem surgindo no mercado com algumas diferenças de composição, tamanho e design com o objetivo de melhorar e facilitar os sistemas construtivos. Para o engenheiro civil, é um diferencial aquele que tenha um conhecimento básico das propriedades de alguns materiais, para assim ter a segurança de trazer novas técnicas e produtos aprimorados para o mercado. Assim, para seu desenvolvimento, são fundamentais as pesquisas laboratoriais.

Os processos construtivos na área da engenharia civil, principalmente no Brasil, podem ser considerados tradicionais. O propósito das pesquisas é trazer novas combinações e atentar as pessoas a novas possibilidades não só de materiais construtivos, mas também de criações que podem trazer diversos benefícios para a sociedade. É um processo lento de transição, mas a veracidade de um experimento sendo comprovada com diversos dados e experimentos podem tornar estas descobertas mais confiáveis e assim aceitas, aos poucos, na nossa realidade. Um exemplo disso, recentemente, foi o aumento do estudo na área de nanofibras. Uma parcela desta área se refere ao uso da microcelulose cristalina, que dentre as diversas utilizações mostrou ser eficiente no reforço estrutural de compósitos cimentícios. (HOYOS *et al.*, 2013; PARVEEN *et al.*, 2017).

Seja obra de grande ou pequeno porte, uma das maiores considerações em relação à estrutura é a sua resistência as cargas solicitantes de diversas naturezas. Com o tempo, alguns fatores naturais como agentes climáticos, vento, umidade, abalos sísmicos, entre outros; e até mesmo por ação humana, por exemplo, as vibrações mecânicas feitas na fase da fundação de um prédio vizinho, podem afetar a estrutura da construção. Tal casualidade na maioria das vezes não pode ser prevista, e quando é, não é possível controlá-la. Por isso, uma grande solução pode vir do desenvolvimento de estruturas mais resistentes. Já que grande parte da estrutura é composta de concreto que é um compósito cimentício, o aprimoramento deste material é de grande importância. Este aprimoramento pode ser realizado com a incorporação de outros componentes que complementam aspectos desvantajosos,

tendo assim um material mais completo que assegure qualidade, segurança e durabilidade.

Inicialmente para entender a microcelulose cristalina, nota-se que esta substância é única e que pode ser conhecida como multifuncional. Há muito tempo este composto tem sido utilizado nos setores de fármacos, alimentícios, cosméticos e continua a ser estudada para outras finalidades. A microcelulose cristalina é originada da polpa da madeira, ou de vegetais, purificada em condições controladas por meio do processo de hidrólise ácida e podem ser obtidas em diferentes configurações como em pó, coloidal ou em pasta.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo analisar o desempenho mecânico de compósitos cimentícios com microcelulose cristalina (M.C.C.).

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para o desenvolvimento desse trabalho são:

- Analisar o efeito da adição de determinados percentuais de M.C.C. no compósito;
- Estudar a influência da M.C.C. na porosidade do material;
- Analisar o desempenho mecânico dos compósitos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A celulose pode ser considerada o polímero mais abundante da Terra, sendo sua estrutura encontrada predominantemente em plantas. A produção anual pode ser estimada em um valor superior a 10^{12} toneladas, sendo uma fonte, praticamente, inesgotável de matéria-prima para o desenvolvimento de materiais sustentáveis (FRENCH *et al.*, 2004), além de apresentar em forma cristalina, excelentes propriedades mecânicas.

Visto que materiais conhecidos tendem a comportar-se de maneira distinta em micro e nano escalas, o estudo desse tipo de compósitos vem sendo desenvolvido em diversas áreas da engenharia, inclusive na construção civil, abrindo uma crescente gama de possibilidades na sua utilização.

Além disso, sabe-se que um dos problemas inerentes aos materiais cimentícios, é a formação de fissuras tanto durante o processo de fabricação, como por meio da hidratação do cimento e que pode se propagar com o tempo, levando-o à falha (PARVEEN *et al.*, 2017). Nesse sentido, tanto a nano como a microcelulose já foram estudadas como reforço de matrizes poliméricas e até mesmo, foi descoberto que partículas de nanocristais de celulose aumentaram a resistência a flexão em 30% de pastas de cimento (CAO *et al.*, 2015). Porém, o estudo de M.C.C. em compósitos, ainda foi pouco explorado. Assim, o presente trabalho visa contribuir com os dados coletados por meio dos ensaios mecânicos junto à comunidade científica, para que o estudo continue a ser desenvolvido, possibilitando em breve, mais uma opção de reforço no mercado aliada à sustentabilidade.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A ciência dos materiais estuda os tipos de interações que ocorrem quando da combinação de diferentes materiais, bem como auxílio no entendimento seu comportamento à diferentes aplicações. A seguir, pretende-se explicar a respeito dos compósitos, assim como sobre suas propriedades físicas e mecânicas observáveis por meio de testes laboratoriais. Essas informações serão essenciais para a compreensão do trabalho.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

São denominados compósitos os materiais compatíveis de diferentes composições associados. O objetivo dessa associação, é obter uma melhor performance aliada à inovação e utilização de recursos abundantes existentes, que podem ainda ser renováveis e contribuir para a sustentabilidade de processos de fabricação atuais. Além disso, é possível atingir o desenvolvimento de características específicas, como maior resistência, direcionando sua aplicação. Na engenharia civil, materiais compósitos são temas recorrentes em pesquisas, empregados no desenvolvimento de compósitos reforçados com fibra vegetal, resíduos industriais, para reabilitação de estruturas metálicas, entre outros (FILHO *et al*, 2003; FONSECA, 2005; VENTURA, 2009).

Um material compósito apresenta ainda duas ou mais fases que podem ser tanto químicas quanto fisicamente distintas, que da associação, podem resultar em um novo material com características diferentes dos constituintes originários. Em relação à estrutura dos compósitos, os materiais que os compõem podem ser classificados em matriz e reforço. A matriz é considerada a matéria base e é também conhecida como a fase contínua, enquanto o reforço, como a fase dispersa e contida na fase contínua. Na Figura 1 é apresentado resumidamente como os compósitos podem ser classificados em relação ao tipo de reforço adotado. O resultado da associação entre matriz e reforço, abrangendo desde os polímeros reforçados com fibras, os concretos estruturais e outros de matriz metálica ou cerâmica, faz os compósitos mais resistentes à corrosão e excelentes no desempenho estrutural (CALLISTER, 2008).

Figura 1 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos



Fonte: CALLISTER (2008)

Neste trabalho, o reforço se dará por meio de partículas dispersas na matriz cimentícia, o que aumenta a resistência do compósito em uma escala microscópica por meio da interação partícula-matriz. A matriz suporta em maior escala a carga que é aplicada, ao passo que as partículas impedem ou dificultam o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Em consequência, é possível observar a redução da deformação plástica e o aumento do limite de escoamento, da resistência à tração e da dureza (CALLISTER, 2008).

2.1.1 Fase Contínua/Matriz

Por ser a parte do compósito que envolve a fase dispersa, a matriz é responsável por: distribuir as tensões resultantes de cargas externas; absorver a energia e reduzir a concentração de tensões; manter segura a posição e orientação da fase dispersa e proteger o reforço dos efeitos agressivos do meio externo (FERREIRA, 2016).

2.1.2 Fase Dispersa/Reforço

A fase dispersa atribui à matriz propriedades desejáveis e necessárias ao aglomerado. Na engenharia civil, o uso de fibras como reforço é bastante utilizado para o aumento da resistência mecânica do compósito; e as partículas para melhorar a rigidez, a dureza e a estabilidade (FERREIRA, 2016). Apesar de, geralmente, o material utilizado como reforço ser mais frágil que a matriz, a sua combinação suporta cargas mais localizadas no compósito (CALLISTER, 2008).

2.2 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Na engenharia civil, o emprego de materiais compósitos à base de cimento reforçado com fibras e outros materiais como concretos, argamassa armada e fibrocimento são os mais utilizados (FILHO *et al.*, 2012). O cimento, segundo Callister (2008), é um material cerâmico classificado como inorgânico, que possui como característica principal o endurecimento após a pega, formando uma pasta quando misturado com a água. Além disso, o cimento atua como uma fase de união nos compósitos, pois aglutina-se quimicamente com agregados particulados para formar uma única estrutura coesa à temperatura ambiente.

2.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland, de acordo com Callister (2008), é produzido pela moagem e mistura de argila e minerais contendo cal em proporções adequadas, e então, por meio do aquecimento da mistura em forno rotativo (até aproximadamente 1400°C), processo esse conhecido como calcinação, obtem-se o clínquer. Esse clínquer é então moído até transformar-se em um pó muito fino, ao qual adiciona-se uma pequena quantidade de gesso ($\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$) para controlar o processo de pega. As propriedades do cimento Portland, dependem em sua maioria, de sua composição.

Segundo Bauer (2005), os componentes essenciais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), constituindo em torno 95% do total da análise de óxidos. Além disso, alguns tipos de cimento podem conter teores de magnésia (MgO) e anidrido sulfúrico (SO_3). Tem ainda, como constituintes menores, impurezas, óxidos de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O),

óxido de titânio (TiO_2) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio constituem os denominados álcalis do cimento.

No processo de fabricação do cimento Portland, ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação dos seguintes compostos:

- silicato tricálcico ($3\text{CaO} * \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$);
- silicato bicálcico ($2\text{CaO} * \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$);
- aluminato tricálcico ($3\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$);
- ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$).

A pega e o endurecimento do cimento, resultam de reações químicas de hidratação que ocorrem entre os vários constituintes do cimento e a água. Essas reações se manifestam primeiramente na pega (enrijecimento da pasta que antes era plástica) e ocorrem logo após a mistura, geralmente entre um intervalo de várias horas. Os sais minerais que compõe o cimento reagem com a água para originar um novo sistema cristalino de compostos hidratados estáveis, emaranhando-se e colando-se uns aos outros, conferindo alta resistência ao conjunto (COUTINHO, 1988). A velocidade de hidratação, depende ainda da composição e finura do cimento, da presença ou não de aditivos e das condições externas, como temperatura e humidade relativa do ar. O endurecimento, então, prossegue como resultado da hidratação do cimento em um processo relativamente lento, que pode durar vários anos (FERREIRA, 2016).

No Quadro 1, estão descritos os tipos de cimentos produzidos no Brasil, suas adições e a norma que regulamenta sua fabricação.

Quadro 1 - Tipos de cimentos no Brasil

Tipo de Cimento	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana ou filer (até 5%)	CP-I	16697:2018
Cimento Portland Comum	Materiais carbonáticos (6 - 10%)	CP I-S 32 CP I-S 40	
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E 32	
	Materiais carbonáticos (até 15%)	CP II-E 40	
	Pozolana (6-14%) Materiais carbonáticos (até 15%)	CP II-Z 32	
	Materiais carbonáticos (11 - 25%)	CP II-F 32 CP II-F 40	
Cimento Portland de Alto-forno	Escória (35-75%)	CP III-32 CP III-40	
Cimento Portland Pozolânico	Materiais carbonáticos (até 10%)	CP IV-32	
	Pozolana (15-50%)		
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 10%)	CP V-ARI	
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP III-RS, CP V-ARI RS		

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland

2.3 ARGAMASSA (COMPÓSITO CIMENTÍCIO)

Uma argamassa é constituída por um conjunto de materiais misturados e proporcionados, normalmente de agregado miúdo (areias e pedriscos), ligante hidráulico/aglomerante (cimento Portland), água e eventualmente, aditivos. A utilização de agregado miúdo visa tornar as argamassas mais econômicas e diminuir os efeitos de retração, o que pode ocasionar o surgimento de fissuras (PRUDÊNCIO Jr, 2007).

Dentre as propriedades do estado fresco, ou seja, período entre a mistura de aglomerantes e agregados com a água e o início da pega, as argamassas devem apresentar:

- uma boa consistência e a retenção da mesma, que poderá ser controlada por meio do procedimento padronizado pela NBR 7215 (ABNT, 1996);
- coesão, para que a mesma possa manter seus constituintes homogêneos e sem segregação;

- plasticidade, para que a argamassa possa deformar-se e manter sua deformação mesmo após as tensões que lhe forem impostas;
- retenção de água, o que confere à argamassa fresca a capacidade de manter sua consistência e trabalhabilidade quando sujeita às solicitações que provoquem perda de água;
- adesão inicial, para que a argamassa permaneça unida à base de aplicação após o seu lançamento.

Por outro lado, as propriedades do estado endurecido das argamassas devem ser:

- resistência mecânica, para que a mesma resista aos esforços mecânicos a que será submetida de acordo com sua aplicação;
- deformabilidade, conferindo a argamassa a capacidade de se deformar sem que sejam geradas tensões importantes no material;
- permeabilidade, que pode ser controlada por meio do tipo e quantidade do aglomerante empregado;
- retração volumétrica, que ocorre após a reação química do cimento e remoção da água absorvida por meio do processo de hidratação do cimento, durante o processo de cura;
- aderência.

2.3.1 Aditivos

A ideia do emprego de aditivos nos diversos produtos do mercado, surgiu de um processo natural de se buscar potencializar ou introduzir características que aumentem a qualidade e diminuam os defeitos dos materiais. No estudo das argamassas e concretos, segue-se essa mesma linha de pensamento.

Define-se como aditivo todo produto que adicionado a mistura de uma argamassa ou concreto em quantidade não superior a 5% da matriz e bem homogeneizado, faz aparecer ou reforçar certas características (BAUER, 2005).

A norma americana ASTM C 125b (2018) ainda define um aditivo como “Material outro que não a água, agregado ou cimento, empregado como ingrediente do concreto ou da argamassa, adicionado a estes, antes ou durante a mistura.”

Ainda segundo Bauer (2005), a resistência à compressão das argamassas e concretos com aditivos superplastificantes é, essencialmente, a mesma de uma mistura bem compactada com baixa relação água/cimento, como aproximadamente 0,5.

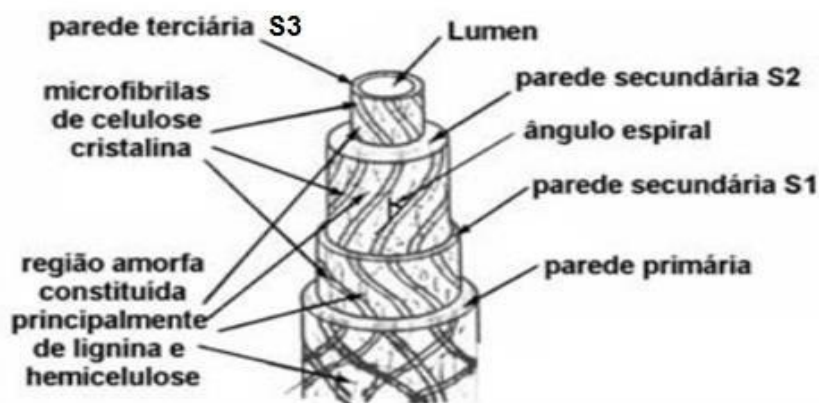
2.4 FIBRAS VEGETAIS

As fibras vegetais podem ser obtidas de fontes madeireiras e não madeireiras, sendo relevantes para o processo de obtenção de materiais isolados, que será descrito em seguida. As fontes madeireiras, como pinus e eucalipto, são as de maior interesse comercial, pois resultam em maior produtividade e em produtos de alta qualidade. Fibras de fontes não madeireiras podem ser obtidas do sisal, linho, algodão, bambu, resíduos da agricultura, entre outros (VENTURA, 2009). Por existir em abundância na natureza, são comumente empregadas como reforço em compósitos cimentícios, podendo melhorar a resistência à fratura e estabilização de fissuras. Apesar dos pontos positivos, sua aplicação ainda é um desafio, visto que sua manufatura é demorada e os maiores produtores de fibras para esse tipo de pesquisa encontram-se na região norte do Brasil, aumentando os gastos com transporte.

Estas fibras naturais são compostas majoritariamente de celulose, lignina e hemicelulose (YANG *et al.*, 2007). A celulose é o constituinte em maior abundância. Essa composição presente no tecido celular, também é considerada um compósito, onde a celulose é a responsável pela estruturação e a hemicelulose funciona como uma matriz em que a celulose se organiza. A lignina, por fim, possui a função de solidificação da parede celular, comparável ao cimento.

A estruturação de uma fibra vegetal, como o eucalipto, pode ser visualizada com maior clareza na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura de um filamento individual de uma fibra vegetal



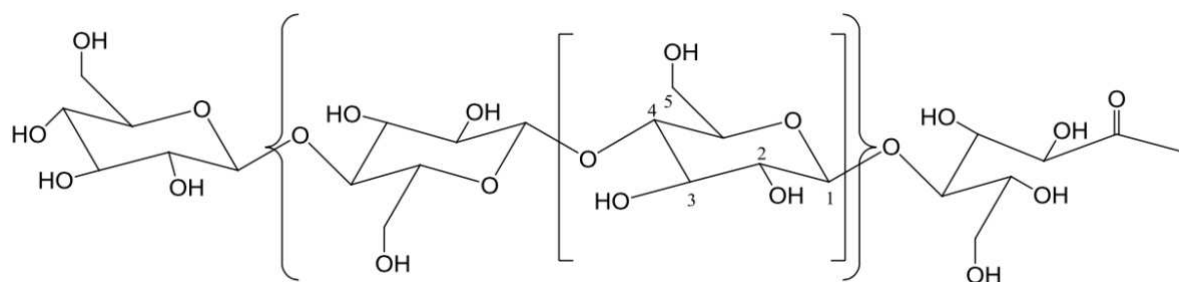
Fonte: NASCIMENTO (2017)

Na figura anterior nota-se como a camada S3 (parede terciária) é semelhante à S1 e suas microfibrilas estão dispostas, aproximadamente, na direção perpendicular ao eixo da fibra de 60° e, às vezes, pode apresentar-se revestida por outra: a camada verrugosa (KOGA, 1988).

2.4.1 Celulose

A estrutura química da celulose é formada por um homopolissacarídeo linear composto de unidades de D-glucopiranosose ligadas entre si por β -1-4-glicosídicas $(C_6H_{10}O_5)_n$, exemplificado na Figura 3. Cada monômero possui três grupos hidroxila, que em combinação com sua capacidade de formar ligações de hidrogênio, desempenham um papel importante na estabilização e organização da cadeia de celulose em uma estrutura altamente ordenada (JOHN e THOMAS, 2008). Dentro desses grupos de hidroxila, existem regiões cristalinas e amorfas nas chamadas microfibrilas como já apresentado na Figura 2.

Figura 3 - Estrutura química básica da celulose

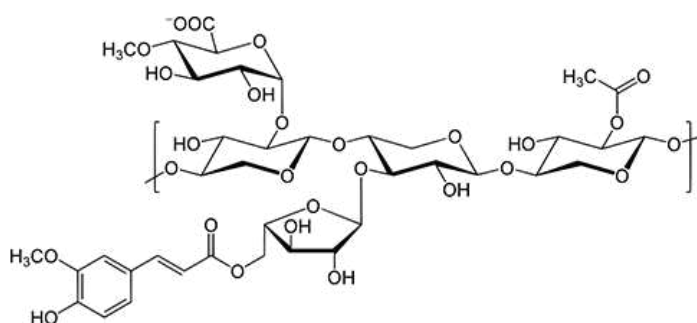


Fonte: CORDEIRO (2016)

2.4.2 Hemicelulose

Formada por polissacarídeos, a estrutura da hemicelulose é composta por uma combinação de açúcares com anéis de 5 e 6 carbonos. Sua função é formar a matriz de suporte para as microfibrilas de celulose e é muito hidrofílica em solução alcalina e facilmente hidrolisada em ácidos (GHAREHKHANI *et al.*, 2015; JHON e THOMAS, 2008). Em três aspectos é possível diferir a hemicelulose da celulose, o primeiro deles é que contém diversas unidades de açúcar diferentes, enquanto que a celulose contém apenas unidades D-glucopiranosose ligadas entre si por β -1,4-glicosídicas; o segundo é que apresenta um considerável grau de ramificação com cadeias laterais pendentes contendo grupos que dão origem à sua natureza não cristalina, enquanto que a celulose é um polímero linear; o terceiro é o grau de polimerização ou do inglês degree of polymerization (DP), que da celulose nativa, que é de 10 a 100 vezes maior do que a de hemicelulose, que é cerca de 50 DP a 300 DP (JOHN e THOMAS, 2008). Um exemplo de sua estrutura é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura química básica da hemicelulose



Fonte: THAKUR (2014)

2.4.3 Lignina

Como já mencionado anteriormente, o polímero fenólico lignina, prende a celulose e hemicelulose como um adesivo natural e tem um importante papel no transporte de água, nutrientes e metabólitos, sendo responsável pela resistência mecânica dos vegetais, atuando ainda na proteção da parede celular contra ataques biológicos (JOHN e THOMAS, 2008; NAVARRO, 2011). Sua estrutura é formada pela polimerização de três monômeros fenil-propanos (Álcoois precursores), a guaiacila, a siringila e a p-hidroxifenila, exemplificados na Figura 5. Como esses componentes distribuem-se de forma irregular, sua estrutura torna-se amorfa. Outra característica é que a lignina é hidrofóbica e totalmente insolúvel na maior parte dos solventes, podendo ser removida por um processo químico, se desejável (ANDRADE, 2010).

Figura 5 - Estrutura química básica dos monômeros fenil-propanos da lignina



Fonte: (KLOCK, 2019)

2.5 MICROCELULOSE CRISTALINA

Devido às diferentes propriedades físico-químicas dos componentes das fibras é comum o isolamento de um deles para o uso em sua forma pura. Dentre os tipos de materiais que podem ser isolados, destacam-se a microcelulose cristalina (M.C.C.), celulose nanofibrilada e nanocristais de celulose.

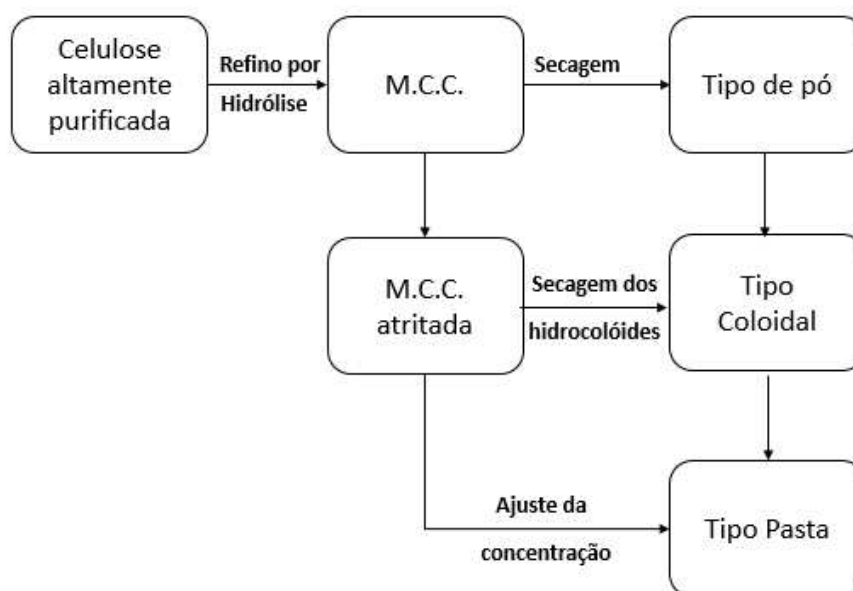
A extração de um componente celulósico acontece em duas etapas. Na primeira são efetuados pré-tratamentos químicos, como a extração das ceras, branqueamento e tratamento alcalino, com o objetivo de isolar um material com maior resistência à tração, altamente associado à cristalinidade do componente celulósico.

Na segunda etapa, o material celulósico na forma microfibrilada ou cristalina é isolado por métodos mecânicos, hidrólise ácida e hidrólise enzimática (TAIPINA, 2012).

Para que se obtenham os cristais de celulose isolados, utiliza-se somente a hidrólise ácida sob condições controladas. Durante a hidrólise, as moléculas ácidas penetram nas regiões amorfas decompondo as ligações celulósicas, isolando as estruturas cristalinas no formato de agulhas, denominadas nanocristais de celulose ou whiskers. O Dr. O.A. Batista, da FMC Corporation, Estados Unidos, descobriu e estabeleceu esses métodos de preparação do material celulósico em 1955, mas foi a partir da década de 90 que surgiu a linha de investigação desse material como matriz polimérica e potencial compósito devido às suas adequadas propriedades mecânicas (FERREIRA, 2016). Antes disso, a utilização da M.C.C. foi ampla e exclusivamente como aditivo para fármacos, cosméticos e alimentos, devido suas características de não-aderência, boa compressibilidade e alto poder de diluição (FERREIRA, 2016).

Um resumo do processo de manufatura da M.C.C., que pode ser obtida em três formas, é observado na Figura 6.

Figura 6 - Processo de Manufatura da M.C.C.



Fonte: ADITIVOS & INGREDIENTES (2009)

2.5.1 Compósitos reforçados com nanocelulose e microcristais de celulose

Recentemente o estudo de nanopartículas de celulose e M.C.C. tem sido o foco de muitas pesquisas e o número de trabalhos e revisões voltados para a compreensão do comportamento desse material e suas aplicações, vem crescendo (CAO *et al*, 2015; FARUK *et al*, 2012; SIQUEIRA *et al.*, 2010).

Hoyos *et al.* (2013) comparam as interações entre M.C.C., cimento, da água e produtos de hidratação entre amostras de compósitos cimentícios com percentual de M.C.C. adicionado entre 0% e 3%. Após dois procedimentos de cura, um padrão, em solução com adição de cal em temperatura ambiente e um acelerado, em solução saturada de cal em temperatura ambiente seguida por 7 dias à 50°C, as amostras foram submetidas a ensaios de flexão, compressão e análise termogravimétrica, concluindo-se que a adição de M.C.C. aumenta o grau de hidratação dos materiais cimentícios e diminui a trabalhabilidade da mistura. Por outro lado, apesar de boa dispersão na matriz de cimento, as propriedades mecânicas da argamassa de cimento curada por processo padrão diminuiu, já o acelerado manteve-se próximo ao esperado.

Silva *et al.* (2018) estudaram a trabalhabilidade de argamassas, sua massa específica, desempenho mecânico, absorção de água, produtos de hidratação e a microestrutura convencionais com o dos compósitos cimentícios reforçados com M.C.C.. Para isso, os autores utilizaram um processo simples de dispersão de baixa concentrações de M.C.C. por meio de agitação magnética, e perceberam que a aglomeração das partículas, aumentou consideravelmente com o aumento das concentrações (a partir de 1%). Tanto a massa específica como a absorção de água aumentaram até, 0,2%, com adição de M.C.C., porém, para maiores teores de M.C.C., tanto a massa específica quanto a absorção diminuíram devido ao aumento da aglomeração dos cristais. Essa aglomeração formou uma microestrutura mais densa, resultando em maior porosidade. O desempenho mecânico em comparação com a argamassa convencional aumentou, também, em menores concentrações de M.C.C. (0,2% em relação à matriz) e primeiros dias de hidratação (3 e 7). O desempenho máximo alcançado das resistências à flexão e à compressão foram para as concentrações de 0,6 e 0,2% de M.C.C. aos 28 dias respectivamente.

Ferreira *et al.* (2016) também estudaram os efeitos da M.C.C. nos compósitos cimentícios, analisaram a relação água/cimento ideal e o efeito da dispersão das

partículas de M.C.C. por meio do banho ultrassônico. A cura foi realizada durante 28 dias por imersão e, em seguida, realizados os ensaios de resistência à flexão e à compressão. Nos testes, os autores concluíram que percentuais menores de M.C.C. como 0,5% e 1% conferem melhores resultados mecânicos.

Também Parveen *et al.* (2017) desenvolveram compósitos com M.C.C. e caracterizaram a massa específica, a resistência mecânica e a microestrutura. Foram utilizadas técnicas de dispersão da M.C.C. por meio de um surfactante produzido na região, o Pluronic, e banho ultrassônico. Além da análise da influência da concentração de M.C.C. e superplastificante para avaliar o desempenho mecânico das argamassas. Por meio da combinação do Pluronic, superplastificante e do banho ultrassônico, obteve-se o melhor desempenho mecânico dentre os artigos analisados, obtendo-se expressivo aumento no módulo de elasticidade, resistência à flexão e à compressão, além de melhora da densidade aparente e hidratação do cimento.

A metodologia para o preparo das argamassas foi escolhida levando-se em consideração os estudos acima citados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O intuito dessa pesquisa foi analisar o desempenho mecânico de compósitos de cimento e microcelulose cristalina em argamassa com adição de 3 teores de microcelulose em relação à matriz cimentícia, comparando-os com uma argamassa referência. As concentrações de microcelulose cristalina (M.C.C.) adicionados na argamassa foram de 1,5%, 3% e 4,5%, essas concentrações foram escolhidas com base nos estudos citados no item 2.5.1.

Visto que em comparação aos resultados preliminares, obtidos por ensaios piloto, houveram alterações na trabalhabilidade da mistura, foi necessário alterar o tipo de areia utilizado. Isso se deve ao fato de o superplastificante empregado ser considerado forte, com adições maiores que 5% não recomendadas. A caracterização das duas areias foi realizada por meio do ensaio de granulometria.

Os valores de resistência à compressão e flexão dos corpos de prova, bem como a porosidade foram determinados respectivamente, por meio de ensaios mecânicos e pelo método de intrusão de mercúrio, nos laboratórios da UTFPR-Ecoville, em Curitiba.

3.1 MATERIAIS

Todos os materiais utilizados para a realização dos ensaios foram cedidos pela própria universidade.

3.1.1 Cimento

Será utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI. Esse cimento é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, composto em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos ao qual se adiciona uma ou mais formas de sulfato de cálcio (ABNT, 1991).

No Quadro 2 estão apresentadas as especificações técnicas do CP V-ARI fornecidas pelo fabricante com base na norma regulamentadora NBR 5733 (ABNT, 1991).

Quadro 2 – Especificações técnicas do cimento CP V-ARI

Parâmetros	
Tempo de início de pega (horas)	≥1
MgO (%)	≤6,5
Perda ao fogo (%)	≤6,5
Resíduo insolúvel (%)	≤3,5
SO ₃ (%)	≤4,5
Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	≥14
3 dias	≥24
7 dias	≥34
28 dias	-
Adições permitidas (%)	
Escória	0
Fíler calcário	0 a 10
Material pozolânico	0

Fonte: ITAMBÉ

3.1.2 Agregado miúdo

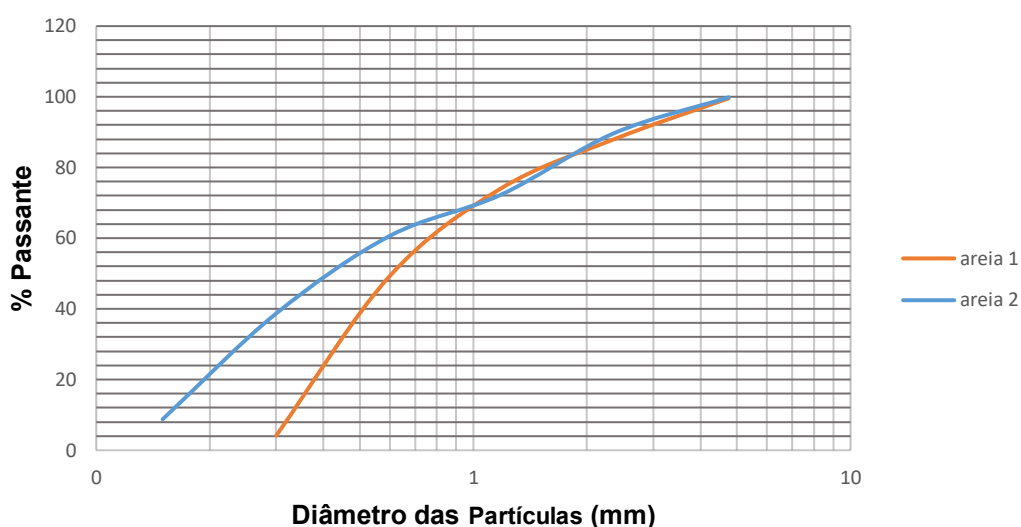
Previamente foram realizados ensaios piloto com uma areia inicial, denominada neste trabalho de areia 1, em que a curva granulométrica encontra-se na

Figura 7. Esses ensaios piloto tiveram como objetivo estabelecer uma linha de raciocínio e de resultados esperados que serviram de base à realização do trabalho atua. Estes testes foram realizados aproximadamente 6 meses antes do início desta pesquisa e, ao moldarmos os primeiros corpos de prova com a mesma areia para os ensaios definitivos, a argamassa ficou extremamente seca mesmo com o uso de aditivos, fazendo com que as mesmas ficassem arenosas e apresentassem fissuras. Por esse motivo, optou-se pela troca da areia.

O agregado miúdo utilizado no preparo dos corpos de prova para os ensaios definitivos constituiu-se de uma mistura de areia média, com uma areia muito fina, na proporção de 2:1, respectivamente. Essa composição teve como objetivo obter um melhor empacotamento de grãos na argamassa, ou seja, selecionar o tamanho dos agregados de forma a preencher os vazios entre as partículas do agregado médio com as partículas menores. Além disso, desse modo é possível minimizar os consumos de água e de cimento nos compósitos. A curva granulométrica da composição das duas também é representada na Figura 7, como areia 2.

Portanto, na sequência desse trabalho, serão denominados de areia 1, os resultados dos ensaios piloto, feitos com argamassa preparada com a areia de origem arenítica e denominados de areia 2, os ensaios definitivos em argamassa preparada com a mistura da areia calcária média e da areia fina.

Figura 7 - Curvas granulométricas das areias 1 e 2



Fonte: Os autores, 2019.

Tanto a areia 1 utilizada nos ensaios piloto como a areia 2 utilizada nos ensaios definitivos, encontram-se de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), dentro da zona ótima de utilização, apresentando respectivamente módulos de finura 2,84 e 2,30. Uma diferença observada entre os dois agregados a ser citada é a forma mais arredondada e uniforme da areia 1 de arenito em relação à areia 2 de origem calcária, apresentando entre os finos da mistura grãos médios mais angulosos do que a areia 1, como na Figura 8.

Figura 8 - Curvas granulométricas das areias



(a) Areia 1



(b) Areia 2

Fonte: Os autores, 2019.

3.1.3 Microcelulose cristalina (M.C.C.)

A microcelulose cristalina utilizada neste trabalho, ilustrada na Figura 9, foi adquirida em forma de pó, apresentando as características descritas no Quadro 3, a partir das informações fornecidas pelo fabricante.

Quadro 4 - Propriedades físico-químicas do Superplastificante

Características	Valor
Aparência	Líquido amarelo claro
Base química	Polímero policarboxilato
Densidade (g/cm ³)	1,07
Teor de cloretos (%)	<0,1
Teor de álcalis (%)	<1,0

Fonte: MC-BAUCHEMIE (2018)

Esse tipo de superplastificante confere maior trabalhabilidade à mistura, visto que da adição de M.C.C. e seu comportamento hidrofílico, a quantidade de finos é aumentada e por consequência, a mistura fica mais seca. Para evitar então, a adição de água à argamassa, optou-se pela utilização do superplastificante sem alterar a relação água/cimento e assim evitar redução de resistência mecânica. O aumento da trabalhabilidade da mistura ocorre pelo fato das partículas de cimento absorverem o aditivo, fazendo com que as mesmas se tornem negativamente carregadas e mutuamente repulsivas. Devido a esse efeito, ocorre melhor dispersão das partículas de cimento e da mistura, que em consequência torna-se mais fluida.

3.1.5 Água de amassamento

Utilizou-se água destilada proveniente do laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR do campus Curitiba, tanto para a fabricação dos corpos de prova quanto para os ensaios em laboratório, em razão da contaminação que pode ocorrer do contato com a M.C.C. e o cimento, podendo alterar os tempos de pega e a resistência (NBR 15900-1, 2009).

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 Cuba de Banho de Ultrassom

O modelo do equipamento utilizado (Figura 10), da marca Cristófoli, encontra-se no laboratório de química da UTFPR. Os parâmetros calibráveis personalizáveis da cuba consistem em temperatura e tempo.

Figura 10 - Cuba de Banho de Ultrassom



Fonte: Os autores, 2019.

A cuba funciona por processo de cavitação, que é a formação e colapso de milhões de bolhas minúsculas ou cavidades dentro de um líquido, produzida pela alternância de ondas de pressão altas e baixas que são geradas pelo ultrassom. As bolhas acontecem em meio ao líquido e o efeito de milhares de implosões por segundo.

As principais especificações técnicas do equipamento são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Dados técnicos da Cuba de Banho de Ultrassom

Capacidade total	2,5 Litros
Capacidade útil	2,1 Litros
Peso líquido	2,5 kg (com componentes)
Peso bruto	3 kg (embalado)
Frequência	60 Hz
Potência	170 Watts
Frequência Ultrassônica	42 kHz
Temporizador	Digital: 5 tempos pré-estabelecidos (180-280-380-480-90s)
Consumo elétrico	17 Watts/hora
Faixa de temperatura adequada de funcionamento	15 a 40°C

Fonte: CRISTÓFOLI EQUIPAMENTOS DE BIOSSEGURANÇA LTDA (2015)

A empresa que fabrica o equipamento é certificada e está em conformidade com a ISO 9001:2008 (Quality management systems – Requeriments), ISO 13485:2003 (Medical Devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purpose) e BPF (Boas Práticas de Fabricação – ANVISA), atendendo também a ISO 14001:2004 (Environmental management systems – Requirements with guidance for use).

3.2.2 Prensa Universal

A prensa universal hidráulica que foi utilizada é da marca EMIC, modelo DL 3000, conforme Figura 11, e está localizada no laboratório de prensas do curso de engenharia civil da UTFPR. Esse tipo de prensa é utilizado na determinação da resistência dos materiais em ensaios de tração, compressão, flexão, dobramento, cisalhamento, arrancamento, delaminação, adesão, embutimento, entre outros.

Figura 11 - Prensa Universal EMIC DL300



Fonte: INSTRON BRASIL EQUIPAMENTOS CIENTÍFICOS LTDA (s.d.)

As principais especificações técnicas do equipamento são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Dados Técnicos Prensa Universal EMIC DL 3000

Capacidade de Carga	kN	30
Velocidade Máxima de Ensaio	mm/min	500
Velocidade Mínima de Ensaio	mm/min	0,005
Velocidade de Retorno Pós Ensaio	mm/min	600
Curso Máximo	mm	1122
Espaçamento entre Colunas	mm	420
Altura	mm	1582
Largura	mm	756
Profundidade	mm	707
Peso	kg	121
Potência Máxima	VA	600

Fonte: INSTRON BRASIL EQUIPAMENTOS CIENTÍFICOS LTDA (s.d.)

3.2.3 Especificação do Porosímetro

Para os ensaios de determinação da porosidade dos compósitos foi utilizado o porosímetro da marca QUANTACHROME, modelo POREMASTER® 33, disposto na Figura 12, localizado em um dos laboratórios do departamento de engenharia civil da UTFPR.

Figura 12 - Porosímetro POREMASTER® 33



Fonte: QUANTACHROME CORPORATION (2018)

O equipamento, por meio da técnica de intrusão de mercúrio, mede o tamanho dos poros baseado no princípio de que um líquido não-reativo e que não molha só penetrará em poros finos quando uma pressão suficiente for aplicada para permitir sua intrusão. Existe uma relação bem conhecida (Equação 1) que descreve a pressão necessária para forçar o mercúrio líquido em poros de diâmetro específico chamado de Equação de Washburn.

$$D = \frac{-4\gamma(\cos\theta)}{P} \quad (1)$$

P = Pressão aplicada

D = Diâmetro do poro

θ = Ângulo de contato entre mercúrio líquido e a parede de poros

γ = Tensão superficial do mercúrio

Esse equipamento mede o volume de mercúrio que é introduzido em uma amostra em função do aumento da pressão, permite a geração do tamanho de poros e distribuições do volume de poros para os poros acessíveis a partir do exterior de um material. Usando instrumentos capazes de medir pressões entre 0,2 e 60.000 psi, como a série POREMASTER®, podem ser medidos poros entre 3,6 nanômetros e 1100 mícron.

As principais especificações técnicas do equipamento são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Dados técnicos Porosímetro

Faixa de Pressão	0,2-33 psia
Faixa do Tamanho dos Poros	1100-0,0064 μ m
Precisão do Volume	$\pm 1\%$ fso do volume da célula da amostra
Resolução do Volume	$\pm 0,0001$ cc
Precisão do Transdutor	$\pm 0,11\%$ fso or mais
Estações de Baixa Pressão	2 (0,2-50 psia)
Estações de Alta Pressão	1 (20-33.000 psia)

Fonte: QUANTACHROME - Manual de Instruções POREMASTER® 33

3.3 MÉTODOS

Para os ensaios de resistência à flexão, foram moldados 6 corpos de prova prismáticos de dimensões 160 mm x 40 mm x 40 mm para cada uma das concentrações de M.C.C. (0%, 1,5%, 3% e 4,5%) e para os ensaios de resistência à compressão, analogamente, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 50 mm, resultando num total de 48 corpos de prova, em conformidade com os padrões das normas EN 196-7, ASTM C348-18 e ASTM C109-16.

Escolheu-se produzir 6 corpos de prova, para cada concentração de M.C.C. para que se houvesse uma melhor representatividade dos dados.

3.3.1 Traço da argamassa

Com base nos equipamentos e recursos disponíveis, além da análise dos trabalhos de Ferreira *et al.* (2016), Hoyos *et al.* (2013), Parveen *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2018) para o preparo das argamassas foi utilizado o traço constituído por cimento CP V-ARI, areia (MF = 2,30) e água destilada na relação 1:3:0,5.

3.3.2 Banho de ultrassom

De acordo com Ferreira (2016), Hoyos (2013) e Parveen *et al.* (2017) uma forma de melhorar a dispersão das partículas de M.C.C. é quando misturada na água por meio de banho ultrassônico. Por esse motivo, optou-se por realizar o mesmo procedimento, assim, antes do preparo da argamassa, foi necessário que 80% da água juntamente com o devido percentual de M.C.C. fossem misturados e levados para dispersão na cuba de banho ultrassônico da Figura 5, por 45 minutos. Os 20% restantes foram, então misturados com o superplastificante e adicionados à mistura na argamassadeira seguindo a mesma metodologia das normas descritas no subtópico 3.3.

3.3.3 Produção da argamassa

Foram pesadas as quantidades de cimento, areia e água destilada, sem adição de superplastificante como na Figura 13 (a), para o preparo da argamassa padrão. Em seguida os materiais foram levados para mistura na argamassadeira consoante à norma EN 196-7, conforme Figura 13 (b).

Em um segundo momento foram pesadas as quantidades de M.C.C. para cada traço, também calculou-se a adição de superplastificante necessária em relação à massa de cimento visando garantir a trabalhabilidade das argamassas com M.C.C. Após repetiu-se o procedimento da mistura citada no parágrafo anterior, com a diferença de que conforme item 3.4.2, o restante da água e plastificante dosados ao final foi misturado em velocidade alta por mais 60 segundos.

Figura 13 - Etapas de preparação da argamassa



(a)

(b)

Fonte: Os Autores, 2019.

3.3.4 Teste de Flow

Imediatamente após a mistura foi realizado o teste de trabalhabilidade seguindo o procedimento descrito na norma ASTM C1437 (2015), como pode-se observar na Figura 14. Esse teste visa garantir a trabalhabilidade e igualdade de condições para as diferentes argamassas.

Figura 14 - Flow Test - Mesa de Espalhamento

Fonte: Os Autores, 2019.

3.3.5 Cura

O processo de cura, apesar de na literatura ter sido majoritariamente realizado submerso, conforme Figura 15, foi realizado somente em câmara úmida sem submersão a fim de simular um ambiente mais aproximado de um canteiro de obras, visto que não são construídos nenhum tipo de tanque de cura.

Figura 15 - CP's na câmara úmida

Fonte: Os Autores, 2019

3.3.6 Ensaio de resistência à compressão

Após 28 dias de cura, os corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão axial foram ensaiados segundo a ASTM C109.

Os corpos de prova foram ensaiados na prensa hidráulica universal (Figura 16), disponível na universidade.

Figura 16 - Corpo de prova no ensaio de resistência à compressão



Fonte: Os Autores, 2019

3.3.7 Ensaio de resistência à tração na flexão

Os corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à tração na flexão, que daqui para frente será mencionado como ensaio de resistência à flexão, foram ensaiados segundo a ASTM 348 (2018), Figura 17.

Figura 17 - Corpo de prova no ensaio de resistência à flexão



Fonte: Os Autores, 2019

3.3.8 Ensaio de porosidade

Após os ensaios de resistência à flexão e à compressão dos corpos de prova, foram retiradas pequenas amostras para análise de porosidade, utilizando o porosímetro localizado nos laboratórios do NPT (Núcleo de Pesquisas Tecnológicas) da UTFPR.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A fim de comparar os dados obtidos nos ensaios mecânicos de resistência à flexão e à compressão, foi utilizada análise de variância (ANOVA), que é um método para testar igualdades de três ou mais médias populacionais, baseado na análise de variâncias amostrais (ANJOS, 2005). Nesse método, será testado uma determinada característica ou critério, para categorizar as populações, designado de análise da variância de um critério, seguindo a disposição apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise de Variância ANOVA

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Função F de Snedecor
Explicada	$\sum(Y_{est} - Y_{med})^2$	k	$\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{k}$	
Não Explicada	$\sum(Y - Y_{est})^2$	$(n - k - 1)$	$\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}$	$\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}}$
Total	$\sum(Y - Y_{med})^2$	$(n - 1)$		

Fonte: Lima, 2013

No caso das análises de variância apresentarem diferenças significativas, é necessário determinar quais grupos de médias, são importantes em particular. Para tal análise utilizou-se o procedimento denominado One-way ANOVA, através do teste de Tukey, que tem como base a DMS (Diferença Mínima Significativa) e é calculado de acordo com a equação (2).

$$DMS = q_{\alpha}(g, N - g) \sqrt{\frac{QMErro}{n}} \quad (2)$$

Em que n é o número de réplicas do tratamento (nível), q_{α} é um valor tabelado (Tabela do Teste de Tukey) e $QMErro$ é o quadrado médio do erro (MEDEIROS, s.d.).

Para esse teste utilizou-se o software *PAST*.

3.5 ENSAIOS PILOTO

Foram moldados previamente 24 corpos de prova com a areia 1, 3 para cada concentração de M.C.C. estudada (0%, 1,5%, 3%, 4,5%). Esses exemplares foram nomeados de CP1p a CP24p.

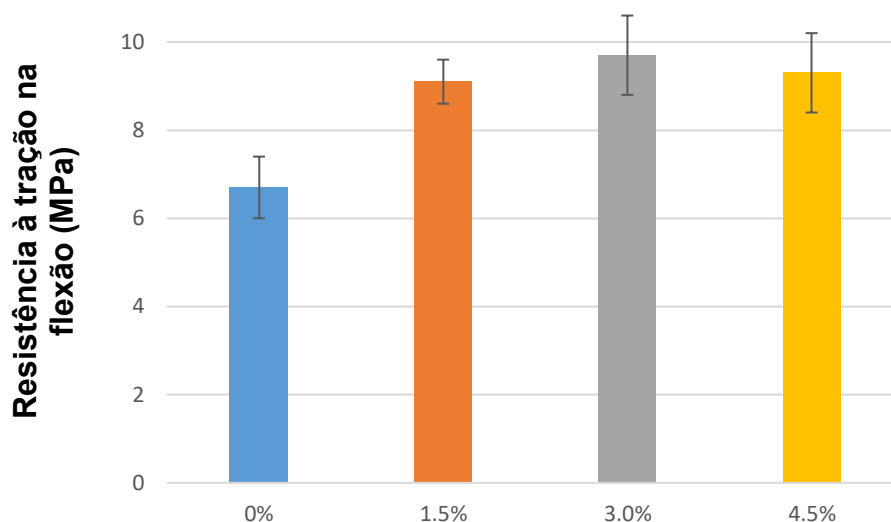
3.5.1 Resistências à flexão

Os corpos de prova prismáticos de 1p a 12p foram ensaiados na prensa até o seu rompimento. Os resultados obtidos para sua resistência à flexão estão dispostos no Quadro 8 e na Figura 18.

Quadro 8 – Valores da resistência à flexão dos CPs piloto (areia 1)

AMOSTRAS PRISMÁTICAS	0% MCC				1,5% MCC			
	Identificação	Flexão (MPa)	Média (Mpa)	Desv. P.	Identificação	Flexão (MPa)	Média (Mpa)	Desv. P.
	CP1p	6,6	6,7	0,7	CP4p	8,7	9,1	0,5
	CP2p	6,1			CP5p	9,6		
	CP3p	7,5			CP6p	9,0		
	3% MCC				4,5% MCC			
	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.
	CP7p	10,6	9,7	0,9	CP10p	8,4	9,3	0,9
	CP8p	9,6			CP11p	10,3		
	CP9p	8,8			CP12p	9,1		

Figura 18 – Resistência à tração na flexão - ensaios Piloto



Fonte: Os Autores, 2019

Observa-se que nos ensaios piloto à flexão utilizando a areia 1, houve melhora significativa da resistência à tração na flexão de todas as amostras reforçadas com M.C.C., com um aumento de 35,6%, 44,6% e 38,1% em relação à argamassa padrão, para as concentrações respectivamente de 1,5%, 3% e 4,5%.

Esse resultado é reforçado pelos dados apresentados na Tabela 2, para um nível de 95% de confiança, um valor-P inferior ao $F_{crítico}$, caracterizando a diferença estatística entre os valores obtidos.

Tabela 2 - Análise da Variância ANOVA resistência à flexão (Piloto)

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	16,406	3	5,469	9,165	0,006	4,066
Dentro dos grupos	4,773	8	0,597			
Total	21,179	11				

Nota: Se o valor-P é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Os Autores, 2019

3.5.2 Resistências à compressão axial

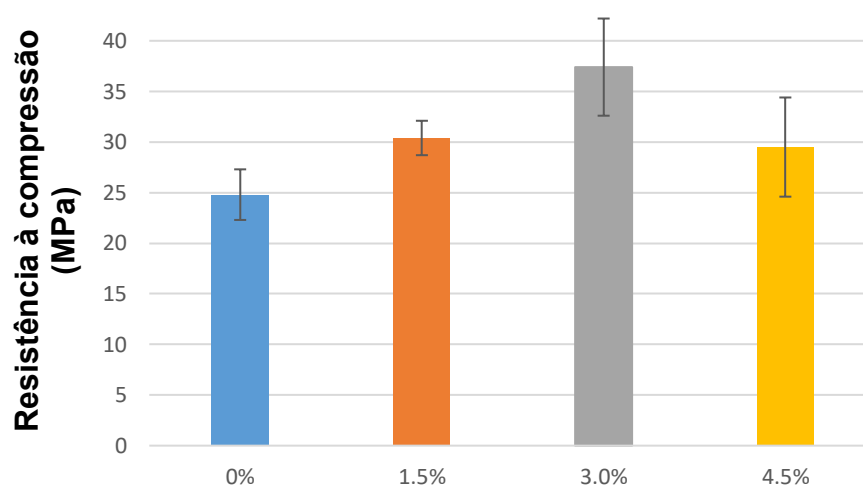
Os corpos de prova cilíndricos de 13p a 24p foram ensaiados na prensa até o seu rompimento. Os resultados obtidos para sua resistência à compressão estão dispostos no Quadro 9, bem como expostos na Figura 19.

Quadro 9 - Valores da resistência à compressão dos CPs piloto (areia 1)

AMOSTRAS CILÍNDRICAS	0% MCC				1,5% MCC			
	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.
	CP13p	22,1	24,84	2,5	CP16p	30,3	30,4	1,7
	CP14p	27,2			CP17p	28,8		
	CP15p	25,2			CP18p	32,2		
	3% MCC				4,5% MCC			
	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.
	CP19p	42,73	37,4	4,8	CP22p	27,6	29,5	4,9
	CP20p	35,9			CP23p	35,1		
	CP21p	33,51			CP24p	25,8		

Fonte: Os Autores, 2019

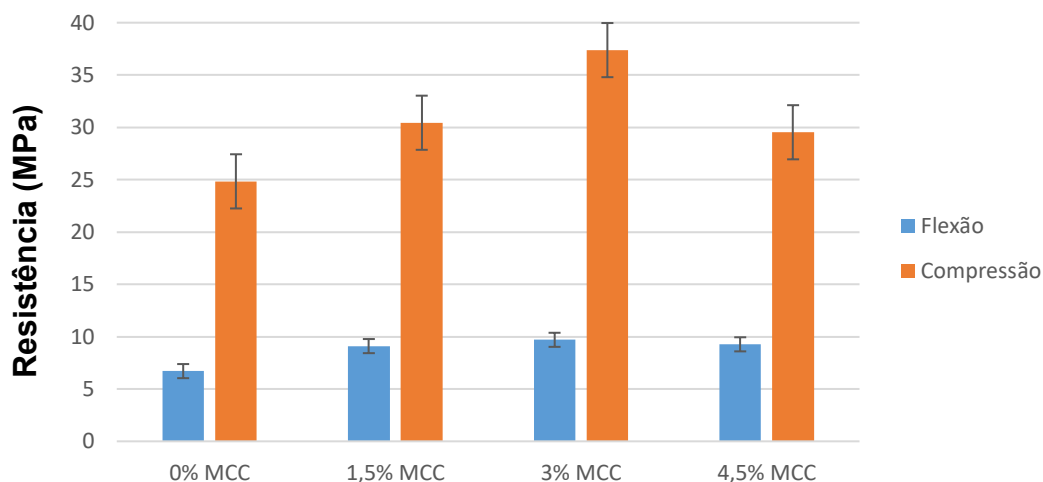
Figura 19 – Resistência à compressão - ensaios Piloto



Fonte: Os Autores, 2019

As médias dos resultados estão expostos na Figura 20. A média permite uma primeira análise superficial do comportamento dos valores.

Figura 20 – Resistências à compressão e à flexão por porcentagem de M.C.C. adicionado (areia 1)



Fonte: Os Autores, 2019

Nos ensaios piloto à compressão utilizando a areia 1, também houve melhora significativa da resistência à compressão axial de todas as amostras reforçadas com M.C.C., um aumento de 22,5%, 50,5% e 18,9% em relação à argamassa padrão respectivamente para as concentrações de 1,5%, 3% e 4,5%.

Esse resultado é reforçado pelos dados apresentados na Tabela 3, com 95% de confiança.

Tabela 3 - Análise da Variância ANOVA para a resistência à compressão dos ensaios Piloto

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	240,919	3	80,306	5,652	0,022	4,066
Dentro dos grupos	113,660	8	14,207			
Total	354,579	11				

Nota: Se o valor-P é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Os Autores, 2019

Por fim, foi possível notar que com M.C.C. as resistências à flexão e à compressão aumentaram e que para concentrações muito altas, a tendência é que a argamassa fique saturada e comece assim, a perder resistência mecânica.

Para uma melhor distribuição de dados, optou-se por aumentar o número de amostras, preparando 6 corpos de provas por concentração de M.C.C. para os testes de resistência à flexão, totalizando 24 amostras e o mesmo número de amostras para os testes de resistência à compressão, totalizando 48 amostras. Também foi necessário alterar o agregado miúdo, para que a argamassa não ficasse demasiado seca impedindo com que o teste de trabalhabilidade fosse satisfatório. As amostras preparadas para os resultados dos ensaios definitivos com a areia 2 serão descritos no próximo capítulo.

4 RESULTADOS

Após 28 dias de cura na câmara úmida foram realizados os ensaios de resistência à flexão e à compressão para aferir a resistência de cada corpo de prova, além de tentar inferir possíveis efeitos causado pela adição da M.C.C.

4.1 ENSAIOS DEFINITIVOS

Os corpos de prova moldados posteriormente aos ensaios piloto foram realizados com a mistura de agregado miúdo (areia 2) com 6 amostras para cada percentual. Esses corpos de prova foram enumerados de CP1 a CP24 para ensaios de flexão e CP25 a CP48 para os ensaios de resistência à compressão.

4.1.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos para os corpos de prova CP1 a CP24 encontram-se no Quadro 10.

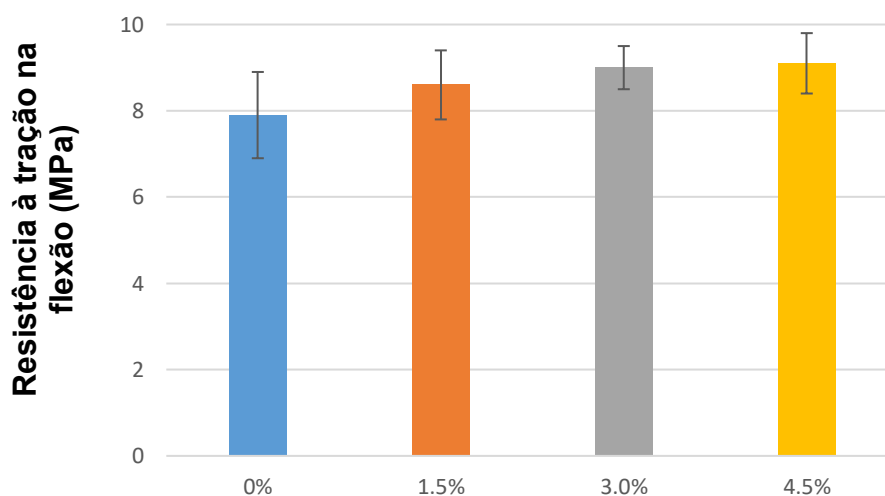
Quadro 10 - Valores da resistência à tração na flexão dos CPs definitivos (areia 2)

AMOSTRAS PRISMÁTICAS	0% MCC				1,5% MCC			
	Identificação	Flexão (MPa)	Média	Desv. P.	Identificação	Flexão (MPa)	Média	Desv. P.
	CP1	7,9	7,9	1,0	CP7	7,3	8,6	0,8
	CP2	8,6			CP8	8,6		
	CP3	9,5			CP9	8,1		
	CP4	7,2			CP10	9,4		
	CP5	6,8			CP11	9,2		
	CP6	7,4			CP12	8,7		
	3% MCC				4,5% MCC			
	Identificação	Flexão (MPa)	Média	Desv. P.	Identificação	Flexão (MPa)	Média	Desv. P.
CP13	8,1	9,0	0,5	CP19	8,7	9,1	0,7	
CP14	9,2			CP20	9,4			
CP15	9,4			CP21	10,4			
CP16	9,2			CP22	9,1			
CP17	-			CP23	8,5			
CP18	9,2			CP24	8,6			

Fonte: Os Autores, 2019

O CP17 não possui resultado, pois ocorreu um erro no manuseio da prensa hidráulica. Para uma melhor visualização dos resultados, estes foram dispostos na Figura 21.

Figura 21 - Gráfico das resistências à tração na flexão



Fonte: Os Autores, 2019

Os resultados do Quadro 10 foram fornecidos ao software PAST para realização da análise estatística a fim de inferir se existe ou não diferença significativa entre as porcentagens de M.C.C. A Tabela 3 traz os valores da análise realizada e a Tabela 4 a comparação entre as amostras.

Tabela 3 - Análise da Variância ANOVA resistência à flexão (Definitivos)

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,276	3	1,739	2,954	0,059	3,127
Dentro dos grupos	11,187	19	0,589			
Total	16,404	22				

Nota: Se o valor-P é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Os Autores, 2019

Tabela 4 - Resultados obtidos da comparação entre as concentrações de M.C.C. nas amostras definitivas

Teste de Tukey: Q\ p				
	0,0%	1,5%	3,0%	4,5%
0,0%		0,52	0,10	0,071
1,5%	1,96		0,73	0,61
3,0%	3,41	1,45		1,00
4,5%	3,72	1,76	0,30	

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey, linhas são comparadas com colunas e as células em destaque, indicam diferenças estatísticas significantes a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Os Autores, 2019

Como o valor-P encontrado na análise da variância é maior do que o coeficiente de 0,05 e $F < F_{\text{crítico}}$, percebe-se que não há diferença estatística entre os valores de resistência confirmado pelo teste de Tukey. Por não haver nenhuma célula em destaque, que caracteriza a diferença entre os valores, os mesmos não foram considerados significativos.

4.1.2 Resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão obtidos para os corpos de prova CP25 a CP48, encontram-se no Quadro 11 e na Figura 22.

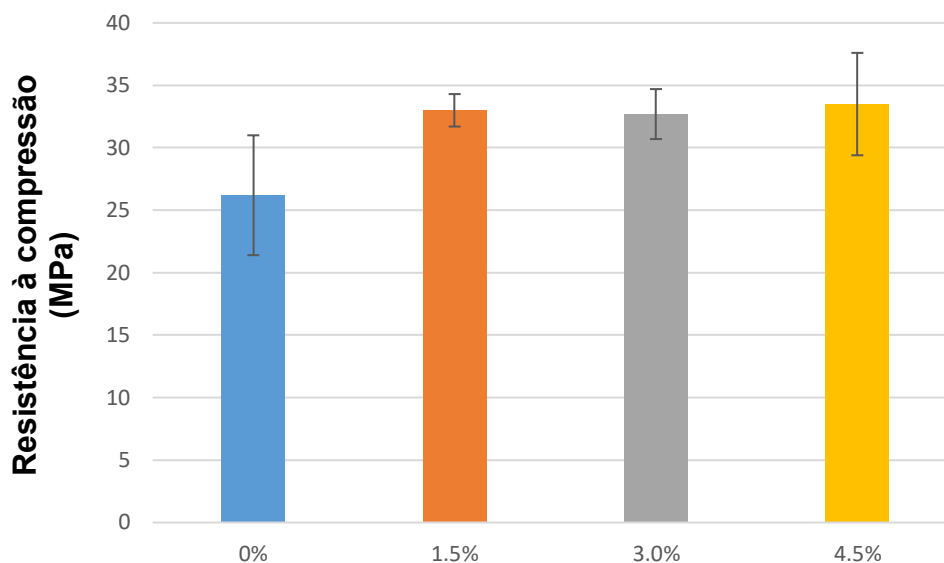
Quadro 11 - Valores da resistência à compressão dos CPs definitivos (areia 2)

AMOSTRAS CILÍNDRICAS	0% MCC				1,5% MCC			
	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.
	CP25	30,6	26,2	4,8	CP31	35,4	33,0	1,3
	CP26	26,8			CP32	32,5		
	CP27	33,1			CP33	32,5		
	CP28	21,9			CP34	31,5		
	CP29	21,9			CP35	33,1		
	CP30	23,0			CP36	33,1		
	3% MCC				4,5% MCC			
	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.	Identificação	Compr. (MPa)	Média	Desv. P.
CP37	34,3	32,7	2,0	CP43	37,3	33,5	4,1	
CP38	34,2			CP44	38,0			
CP39	33,7			CP45	29,7			
CP40	32,6			CP46	33,0			
CP41	29,0			CP47	35,2			
CP42	32,2			CP48	27,7			

Fonte: Os Autores, 2019

Para uma melhor visualização dos resultados estes estão dispostos na Figura 22.

Figura 22 - Resistências à compressão



Fonte: Os Autores, 2019

Os resultados apresentados no Quadro 11 também foram fornecidos ao software PAST. A Tabela 6 traz os valores da análise realizada e a Tabela 7 a comparação entre as amostras.

Tabela 6 - Análise da Variância ANOVA resistência à compressão (definitivos)

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	213,049	3	71,017	6,212	0,004	3,098
Dentro dos grupos	228,645	20	11,432			
Total	441,695	23				

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Os Autores, 2019

Tabela 7 - Resultados obtidos da comparação entre as concentrações de M.C.C. nas amostras definitivas

Tukey's pairwise comparisons: Q\ p(same)				
	0,0%	1,5%	3,0%	4,5%
0,0%		0,01	0,02	0,01
1,5%	4,93		1,00	1,00
3,0%	4,68	0,25		0,97
4,5%	5,72	0,34	0,59	

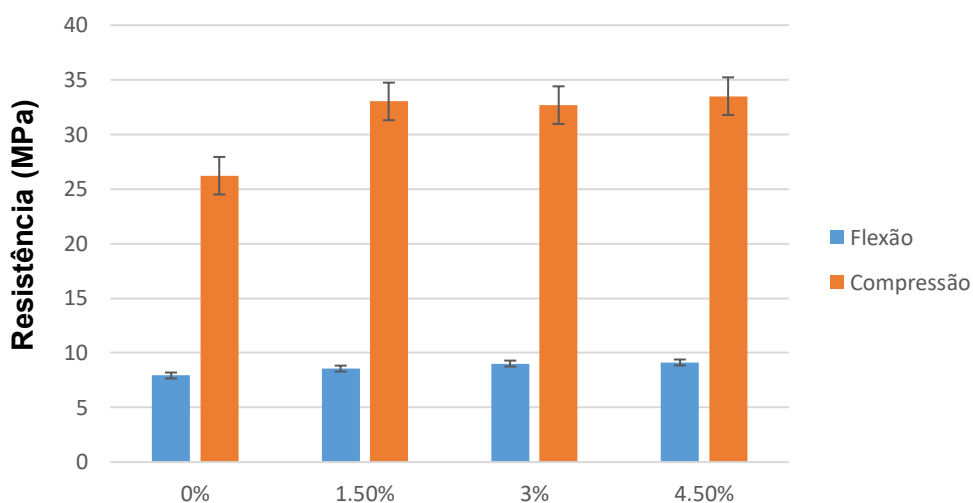
Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey, linhas são comparadas com colunas e as células em destaque, indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Os Autores, 2019

Como o valor-P encontrado é menor do que o coeficiente de 0,05 e $F > F_{\text{crítico}}$, percebe-se que há diferença estatística entre os valores de resistência encontrados. O teste de Tukey confirma (células destacadas) que essa diferença existe entre todas as concentrações de M.C.C. em relação à argamassa padrão, porém não em relação às próprias concentrações.

As médias de resistência à flexão e à compressão obtidas para cada percentual de M.C.C. ensaiado são apresentadas na Figura 23. Essa análise realizada apenas com uma média aritmética simples pode indicar efeitos mesmo que de uma maneira mais superficial quando comparada as feitas pelo programa PAST.

Figura 23 - Resistências à compressão e à flexão por porcentagem de M.C.C. adicionado (areia 2)



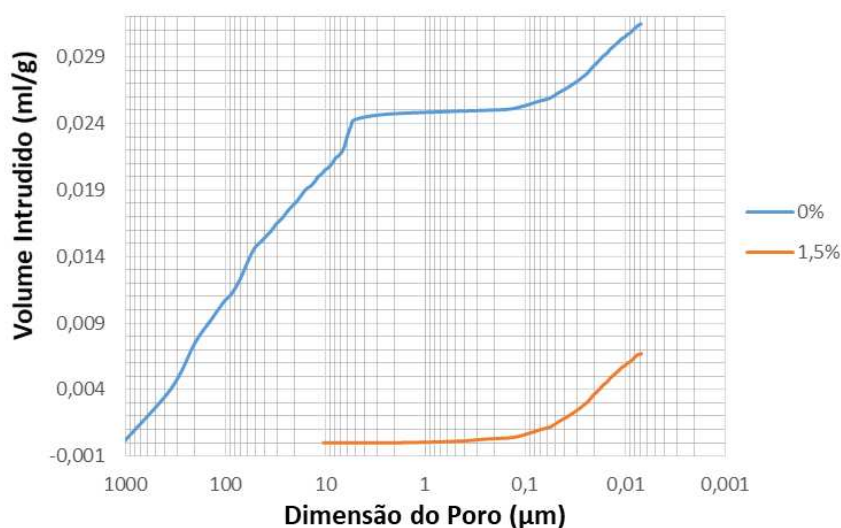
Fonte: Os Autores, 2019

4.1.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Concluídos os ensaios mecânicos, foram retiradas pequenas amostras para serem ensaiadas no porosímetro. Uma amostra para cada concentração de M.C.C., 0%, 1,5%, 3% e 4,5% foram separadas e ensaiadas.

No caso das amostras piloto, os resultados foram incompletos, como pode-se observar na Figura 24, onde são apresentados os diâmetros dos poros intrudidos por mercúrio referentes somente às amostras de 0% e 1,5%, devido a erro no laboratório.

Figura 24 – Resultados de Intrusão cumulativa dos ensaios piloto (areia 1)

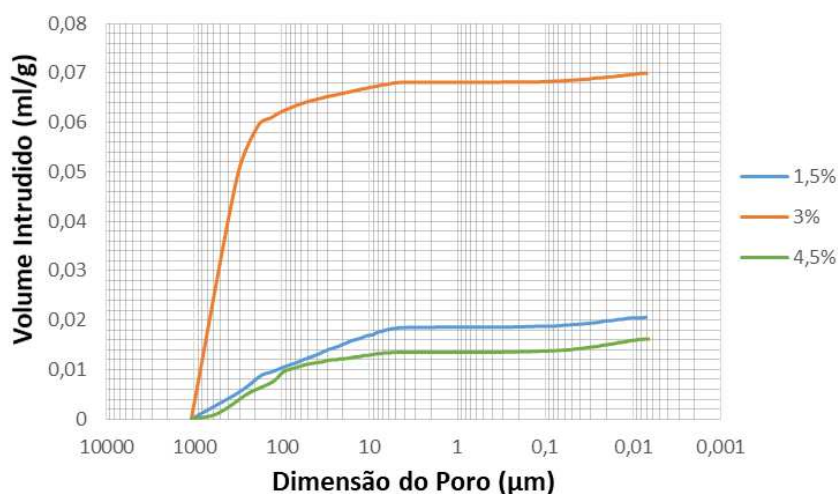


Fonte: Os Autores, 2019

Nota-se que no caso dos ensaios piloto, os resultados obtidos em relação à argamassa padrão e com adição de 1,5% de M.C.C. apresentam grande variação na dimensão dos poros. Com a adição de M.C.C., o volume de mercúrio intrudido na amostra de 1,5% de M.C.C. foi bem menor, indicando pouca ocorrência de poros. Visto que quanto menor a porosidade, ou quantidade de vazios na amostra, maior a resistência, os resultados mostram uma tendência coerente em relação ao incremento nos resultados mecânicos dos ensaios piloto, onde a amostra com 1,5% de M.C.C. apresentou porosidade total de 0,86% em relação à argamassa padrão (3,94%). Isso porque a M.C.C. por ser um material extremamente fino, ocupa os vazios que não são preenchidos pelos finos da areia, diminuindo a ocorrência de poros e o número de vazios.

Para os ensaios de porosimetria da argamassa definitiva, também foram coletadas pequenas amostras dos corpos de prova com concentração de 1,5%, 3% e 4,5% de M.C.C., porém não foi possível a coleta da amostra de argamassa padrão (0%), pois os autores descartaram os corpos de prova após os ensaios sem coletá-la (Figura 25).

Figura 25 – Intrusão de mercúrio cumulativa dos ensaios definitivos (areia 2)



Fonte: Os Autores, 2019

No caso dos ensaios definitivos das argamassas produzidas com a areia 2, observa-se que o pico de maior porosidade ocorre com 3% de M.C.C. com porosidade total de 15,2%, onde há maior intrusão de mercúrio nos vazios. Já as concentrações de 1,5% e 4,5% apresentam menor porosidade em relação à de 3%, sendo 3,9% e 2,9% respectivamente, valores aproximados entre si. Esse é um comportamento inesperado, já que as resistências apresentadas não sofreram grandes alterações, o que dado aos resultados de porosidade total, deveria acontecer. Se a porosidade da amostra de 3% é maior em relação às outras concentrações, deveria haver uma queda em sua resistência. Já no caso dos ensaios piloto, com a areia 1, com a diminuição do volume de poros a resistência aumentou.

5 CONCLUSÃO

Ao final desta pesquisa que teve como objetivo estudar o desempenho mecânico de compósitos de cimento-microcelulose, pode-se afirmar que a microcelulose cristalina (M.C.C) é capaz de aumentar a resistência à flexão e à compressão das amostras. Isso ocorreu por meio de sua interação com a matriz cimentícia e com os demais materiais constituintes da argamassa.

Por intermédio dos testes realizados, os compósitos de cimento-microcelulose apresentaram comportamento diferenciado de acordo com a origem dos agregados. Para areias provenientes de misturas calcárias e com grãos de forma mais lamelar (areia 2), as amostras apresentaram melhora estatisticamente significativas à compressão axial de 26,1% em relação à argamassa padrão. Já, na resistência à tração na flexão o aumento não foi considerado relevante, provavelmente devido à presença de matéria orgânica existente em materiais de origem calcária e a forma dos grãos, que dificulta a acomodação dos grãos menores em seus vazios. Pode-se afirmar que para a areia do tipo 2, pequenas adições de M.C.C. como no caso da concentração de 1,5% já levam à melhores resultados, tendo que entre as adições de 1,5% - 4,5% foi viável obter-se resultados adequados. Pode-se ressaltar ainda que melhores resultados mecânicos, foram obtidos nos ensaios piloto, chegando-se a aumentos significativos na resistência à flexão de até 44% em relação à argamassa padrão e resistência à compressão de 50%. Porém, esses números precisam ser melhor trabalhados, com maior número de amostras para que os testes estatísticos comprovem que para a areia do tipo 1, as resistências atingidas de fato são mais apropriadas para os compósitos-microcelulose. Portanto, em relação ao estudo apresentado, 1,5% de adição de M.C.C. á uma argamassa já é suficiente para se obter aumento em sua resistência mecânica.

Em relação à porosidade, as amostras testadas apresentaram comportamentos diferentes em meio à adição de M.C.C. e da troca do agregado miúdo constituinte. O impacto dessa diferença foi o fato das mesmas poderem melhor analisadas em relação aos materiais utilizados para o preparo das amostras do que em relação a microcelulose em si. Tanto durante os testes com as amostras dos ensaios pilotos moldados com a areia 1, quanto dos ensaios definitivos moldados coma a areia 2, ocorreram erros na coleta das amostras para os procedimentos

laboratoriais, impossibilitando que uma análise completa fosse realizada. No entanto, como mostraram alguns dos resultados apresentados, é esperado que o menor diâmetro de poros e em consequência, menor porosidade de um compósito, aumente sua resistência, como observado nos ensaios pilotos.

Além disso, concentrações muito elevadas de M.C.C. adicionadas à mistura, podem causar perda na trabalhabilidade da mesma. Isso porque quanto mais finos somados ao comportamento hidrofílico da M.C.C., se faz necessário a utilização de aditivos ou maior adição de água para tornar o compósito trabalhável. Pode-se supor ainda que esse comportamento hidrofílico, se bem equilibrado por meio dos constituintes da argamassa, pode ajudar no processo de hidratação do cimento para que se atinjam valores ainda maiores de resistência mecânica.

Por ser de fácil obtenção, já que a M.C.C. é amplamente utilizada na indústria alimentícia, é possível considerar a aplicação do material como sendo viável na construção civil, dependendo das condições de produção do produto final, seja em forma de um pilar ou uma viga por exemplo. Seu uso, no entanto, seria mais indicado para elementos pré-fabricados já que sua produção, além de ser mais controlada, permitiria melhor eficiência durante a mistura dos materiais. O investimento em um equipamento de mistura ultrassônico ou até mesmo magnético para água e M.C.C. também não é muito alto, se comparados aos ganhos de que uma produção em série poderia gerar.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Um estudo com menores adições de M.C.C. pode ser feito posteriormente a fim de explorar se em menores concentrações do que 1,5%, o desempenho mecânico dos compósitos alcançará níveis de resistências ainda mais altos e se no caso da resistência à tração na flexão, apresentará diferença significativa.

Um estudo em concreto ao invés de argamassas também pode ser realizado para identificar se a adição da M.C.C. pode aumentar ainda mais sua resistência mecânica, já que até a conclusão deste trabalho, somente estudos com argamassa foram encontrados como referência bibliográfica.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – **Tipos de cimentos**. s.d. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimento-portland/>>. Acesso em: 15 de novembro 2018.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.

ADITIVOS & INGREDIENTES, **Celulose Microcristalina ou, simplesmente, CMC**. Revista nº 64, pg. 62, 2009. Disponível em: <https://aditivoseingredientes.com.br/upload_arquivos/201602/2016020484946001454331689.pdf>. Acesso em: 18 de Novembro de 2018.

ANDRADE, A. S. **Utilização de micropartículas de lignina Kraft combinadas com amido anfótero visando o aumento das propriedades do papel embalagem**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2010.

ANJOS, A. **Notas de Aula**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~aanjos/CE213/apostila.pdf>>. Acesso em: 26 de junho de 2019.

ASTM C1437-15. **Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM C125-18b. **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM 348. **Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM C109/C109M-16. **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC – v.1, 2005.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais.** University of Iowa, USA, 2008.

CAO, Y., WEISS, W. J., YOUNGBLOOD, J., MOON, R., ZAVATIERRI, P. **The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste.** Elsevier: Cement and Concrete Composites, Volume 56, Pages 73-83, 2015.

CORDEIRO, M.A. **Estudo da hidrólise enzimática do caroço de açaí (*euterpe oleraceae mart*) para a produção de etanol.** Dissertação de Pós-Graduação (Engenharia Química) – Univerisidade Federal do Pará, 2016.

COUTINHO, S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** Vol. 1,2 e 3. LNEC, Lisboa, 1988.

CRISTÓFOLI EQUIPAMENTOS DE BIOSSEGURANÇA LTDA. **Manual cuba de ultrassom Cristófoli.** Port. Rev.2. Campo Mourão, PR, 2015. Disponível em: <<https://www.cristofoli.com/product/download>>. Acesso em: 21 de Junho de 2019.

EN 196-7. **Methods of testing cement – Part 7: Methods of taking and preparing samples of cement.** 2007.

FARUK, O., BLEDZKI, A.K., FINK, H.P., SAIN M. **Bio composites reinforced with natural fibers: 2000–2010.** Elsevier: Progress in Polymer Science, 2012.

FERREIRA, S. P. C. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados por celulose microcristalina.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade do Minho, 2016.

FILHO, N.T.A., DANTAS, C.P., LEAL, A.F., BARBOSA, N.P., SILVA, C.G., ALEXANDRE, M.V. **Resistencia mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2012.

FILHO, R.D.T., GHAVAMI, K., ENGLAND, G.L., SCRIVENER, K. **Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability.** Cement and Concrete Composites, 2003.

FONSECA, F.O. **Contribuição para o desenvolvimento de compósito cimento-madeira com materiais da região amazônica.** Dissertação de Pós-graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, 2005.

FRENCH, A., BERTONIERE, N., BROWN, R., CHANZY, H., GRAY, D., HATTORI, K., GLASSER, W., **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.** 5th Edition, New York, 2004.

GHAREHKHANI, S., SADEGHINEZHAD, E., KAZI, S. N., YARMAND, H., BADARUDIN, A., SAFAEI, M. R., ZUBIR, M. N. M. **Basic effects of pulp refining on fiber properties - A review.** Carbohydrate. Polymer., 2015.

HOYOS, C. G., CRISTIA, E., VÁZQUEZ, A. **Effect of cellulose microcrystalline particles on properties of cement based composites.** Elsevier: Materials and Design, 2013.

INSTRON BRASIL EQUIPAMENTOS LTDA. **Série 23 EMIC**. São José dos Pinhais, PR, s.d.

ITAMBÉ, Cimentos. **Produtos – CP V-ARI**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/produtos/>>. Acesso em: 15 de novembro 2018.

JOHN, M. J., THOMAS, S. **Biofibres and biocomposites**. Carbohydr. Polym., 2008.

KLOCK, U. **Notas de aula de Química da Madeira**. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/lignina20132.pdf>>. Acesso em: 21 de junho de 2019.

KOGA, M.E.T. **Matérias fibrosas, Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2 ed. Escola SENAI, Instituto de pesquisas Tecnológicas de São Paulo, Brasil. vol. I, p.561-582, 1988.

LIMA, A. J. M. **Engenharia de Avaliações**. 348p. Apostila dos cursos de graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MC-BAUCHEMIE. **Aditivos para concreto e argamassa**. Edição 10/2018. Disponível em: <https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/br/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%203100.pdf>. Acesso em: 21 de junho de 2019.

MEDEIROS, Luiz. **Modelos de Probabilidade e Inferência Estatística. Análise de Variância – Parte 2**. Universidade Federal da Paraíba, s.d. Disponível em: <<http://www.de.ufpb.br/~tarciana/MPIE/Aula19.pdf>>. Acesso em: 6 de julho de 2019.

NASCIMENTO, L.F.C. **Caracterização do compósito epóxi-fibra de malva para emprego em blindagem balística multicamada**. Tese de doutorado (Ciência dos materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.

NAVARRO, I. T. C. **Caracterização Microestrutural das Fibras Naturais: *Etilingera elatior*, *Costus* e *Helicônia bihai***. Dissertação de Mestrado (Engenharia de materiais e de processos químicos e metalúrgicos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

PARVEEN S., RANA S., FANGUEIRO R., PAIVA, M.C. **A novel approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with enhanced microstructure and mechanical performance**. Elsevier: Cement and Concrete Composites, 2017.

PRUDÊNCIO Jr, L. R. **ECV 5302 – Materiais de Construção Civil I**. Apostila (Engenharia Civil), 2007.

QUANTACHROME CORPORATION. **Poremaster ® automated mercury porosimeters**. Boyton Beach, USA, 2018. Disponível em: <https://www.quantachrome.com/pdf_brochures/07128.pdf>. Acesso em: 21 de Junho de 2019.

SILVA, L. F., PARVEEN, S., FILHO, A. G., FANGUEIRO, R., SARDEIRO, P., VANDERLEI, R. D. **Estudo da microcelulose em compósitos cimentícios**. V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais, Valência, Portugal, 2018.

SIQUEIRA, G., BRAS, J., DUFRESNE, A. **Cellulosic Bio nanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications**. Polymers, 2010.

TAIPINA, M. O. **Nanocristais de celulose: obtenção, caracterização e modificação de superfície**. Dissertação de Mestrado (Química) – Universidade Estadual de Campinas, 2012.

THAKUR, K. V.; THAKUR, M. K. **Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites**. Carbohydrate Polymers, vol. 109 Pág. 102-117, 2014.

VENTURA, A.N.F.M. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas**. Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, n. ° 3/4, 2009.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D.; ZHENG, C. **Characteristics of hemicelluloses, cellulose and lignin pyrolysis**. Fuel, 2007.