

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

VICTOR HUGO DAGNONI

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DO
CONCRETO COM ADIÇÃO DA FIBRA DE CARBONO PICOTADA**

Joinville

2018

VICTOR HUGO DAGNONI

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DO
CONCRETO COM ADIÇÃO DA FIBRA DE CARBONO PICOTADA**

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

Orientador: Dr. Claudimir A. Carminatti.

Joinville

2018

VICTOR HUGO DAGNONI

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DO
CONCRETO COM ADIÇÃO DA FIBRA DE CARBONO PICOTADA.

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

Banca Examinadora:

Dr. Claudimir A. Carminatti
Orientador
Presidente

Dr. Daniel Hastenpflug
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Thiago Antonio Fiorentin
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Msc. Valéria Bennack
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, ao prof. Dr. Carminatti em segundo lugar por toda dedicação, avaliação, motivação e correções dos caminhos e interpretações ao longo dessa pesquisa. Em terceiro a empresa Aniccasty e ao Sr. Alexandre Anraku pelo fornecimento do tecido de Fibra de carbono, além disso, a instituição de ensino superior UNISOCIESC pelo ensaio lá realizado, em especial a coordenadora do curso de engenharia civil Dilarimar Maria Costa e o técnico do laboratório Luiz Ricardo por toda sua ajuda durante a execução dos ensaios. Da mesma forma ao laboratório de vibrações e acústica, em especial ao prof. Dr. Thiago Fiorentin e o aluno da pós-graduação Maikol Dreschler por seu tempo e disposição em colaborar e ao laboratório central de microscopia eletrônica (LCME), com ênfase na ajuda, tempo e simpatia do prof. Américo, ambos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina. Agradeço também a empresa Votorantim pelo fornecimento do cimento.

Após esses agradecimentos especiais, eu gostaria de retribuir com palavras o imenso apoio da minha família, principalmente meus pais, pela dedicação de uma vida na minha formação. Além disso, não posso esquecer os amigos durante a graduação que me ajudaram nesse trabalho, Felipe Hirata e Gustavo Ramos pelo apoio e parceria, semelhantemente os colegas da equipe InfraTEC, Denio Ferreira, Felipe Souza, Rúbia Meert que cederam seu tempo muitas vezes a me ajudar na execução dos corpos de prova, peneiramento de brita e areia, além das ideias e sugestões de soluções para os problemas apresentados no decorrer deste trabalho. Sem menos importância, à minha namorada Thayná Matos que dispôs seu tempo a me auxiliar na execução dos corpos de prova e outras atividades relacionadas a esse trabalho. Por fim, ainda gostaria de agradecer a aluna Yohana responsável pelo laboratório de construção sustentável e ao Prof. Daniel por sua ajuda indireta e direta, bem como sua disposição em sempre me auxiliar e responder minhas dúvidas.

Os agradecimentos aqui citados talvez não sejam suficientes, pois para uma conquista não há limites. Aos que não foram citados nessa nota, e que de alguma maneira participaram direta ou indiretamente dessa conquista sintam-se igualmente agradecidos.

O sucesso é uma consequência e não um objetivo (Flaubert, Gustave).

RESUMO

O concreto na engenharia civil é o material mais utilizado. Dessa forma busca-se constantemente a melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas. A adição de reforços ao concreto é uma das possibilidades estudadas para a melhoria de suas propriedades, onde a fibra de carbono como material de adição à mistura cimentícia pode ser uma opção em função da elevada resistência à tração e seu alto módulo de elasticidade, entre outras propriedades características. O objetivo deste trabalho é analisar a influência das propriedades físicas, mecânicas e morfológicas do concreto com a adição de fibra de carbono picotada como reforço. A fibra de carbono foi cortada com comprimento aproximado de 50 mm, sendo adicionada como reforço na proporção de 0,1; 0,3 e 0,5% (m/m) no concreto produzido. Seguindo metodologias descritas na ABNT e ASTM, foram realizados ensaios para a caracterização das propriedades físicas (índices físicos) e mecânicas (resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade), bem como uma análise morfológica do compósito produzido através de microscopia eletrônica de varredura. Os custos envolvidos na produção também foram quantificados. Os resultados mostraram que a adição de fibra de carbono ao concreto provocou uma diminuição da resistência à compressão na ordem de 10% e um aumento da resistência à tração de 12% quando foi utilizada 0,1% de fibra de carbono no concreto. Os valores de módulo de elasticidade se diferenciaram na ordem de 13% em relação à norma a qual foram comparados, e notou-se uma diminuição do módulo de elasticidade para as amostras com maior percentual de adição de fibra. Os resultados dos índices físicos não puderam ser validados e correlacionados com as propriedades mecânicas. A adição da fibra de carbono aumentou os custos de produção do concreto em até 0,16%. Pode-se concluir que a adição de fibra de carbono picotada ao concreto melhorou a resistência a tração e o módulo de elasticidade do compósito, mas não influenciou positivamente a tensão de compressão, de modo que a adição de fibra de carbono pode ser interessante em alguns casos dependendo da aplicação requerida para o concreto.

Palavras-chave: Compósito. Concreto. Fibra de Carbono. Adição.

ABSTRACT

Concrete in civil engineering is the most widely used material, in this way it is constantly searching to improve physical and mechanical properties. The addition of reinforcement to the concrete is one of the possibilities studied for the improvement of your properties, where the carbon fiber as addition material to the cementitious mixture may be an option due to its high tensile strength, high modulus of elasticity and between properties. This work has the objective to analyses the improvement of physical, mechanical and morphological properties of the concrete with the use of carbon fiber chopped as reinforcement, via addition. The carbon fiber will be cut with an approximate length of 50 mm and added as reinforcement in the proportion of 0,1; 0,3 e 0,5 % (m/m) in the concrete produced. Tests will be realized to characterize the physical (physical indexes) and mechanical properties (compressive strength, tensile and modulus of elasticity), as well as a morphological analysis of the composite by scanning electron microscopy. The costs involved in the production also were quantified. The results showed that the addition of carbon fiber to the concrete caused a decrease in compressive strength of around 10% and an increase in tensile strength of 12% when 0.1% of carbon fiber was used in the concrete. The values of modulus of elasticity differed by 13% in relation to the norm to which they were compared, and a decrease in the modulus of elasticity was observed for the samples with higher percentage of fiber addition. The addition of carbon fiber has increased concrete production costs by up to 0.16%. It can be concluded that the addition of carbon fiber to the concrete improved the tensile strength and modulus of elasticity of the composite, but did not positively influence the compression stress, so the addition of carbon fiber may be interesting in some cases depending on the application required for the concrete.

Keywords: Composite. Concrete. Carbon Fiber. Addition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das combinações possíveis em compósitos com diferentes matrizes.	17
Figura 2 – Comparação de propriedades físicas de materiais monolíticos e compósitos.	18
Figura 3 – Tipos de compósitos baseados no formato do reforço.	19
Figura 4 – Diferentes modelos de reforços.	20
Figura 5 - Resistência média de tração do concreto.	29
Figura 6 – Disposição do corpo-de-prova com as dimensões do friso.	30
Figura 7 – Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.	31
Figura 8 – Pontos de golpe e fixação do transdutor.	33
Figura 9 – Materiais utilizados.	39
Figura 10 – Equipamentos utilizados para moldagem dos CP's.	42
Figura 11 – Processo mecânico de mistura do concreto.	43
Figura 12 – Processo de finalização do CP.	44
Figura 13 – Adaptação do adensamento através do processo de vibração.	44
Figura 14 – Equipamentos e procedimento de compressão do corpo-de-prova.	45
Figura 15 – Procedimento de alocação do corpo-de-prova para ensaio.	46
Figura 16 – Tentativa de ensaio com corpo de prova cilíndrico.	47
Figura 17 – Procedimento de medição e marcação.	47
Figura 18 – Procedimento do ensaio de excitação por impulso.	48
Figura 19 – Procedimento de ensaio.	49
Figura 20 – Amostras recobertas de ouro/Equipamento do ensaio.	50
Figura 21 – Tensão de compressão em função da idade dos corpos de prova.	51
Figura 22 – Aumento da tensão de compressão conforme método de adensamento.	53
Figura 23 – Formato dos CP's para a Formulação F2 após implementação do processo de adensamento mecânico.	54
Figura 24 – Tensão de tração obtida por compressão diametral.	55
Figura 25 - Aumento da tensão de tração conforme método de adensamento.	56
Figura 26 – Módulo estático e dinâmico para formulações analisadas.	58
Figura 27 – Porosidade aberta média por formulação.	60
Figura 28 – Densidade aparente média por formulação.	60
Figura 29 – Absorção de água média por formulação.	61
Figura 30 – Zona de interface fibra de carbono e concreto.	62

Figura 31 – Aderência fibra de carbono e concreto.	63
Figura 32 – Presença de etringita.	63
Figura 33 – Zona de Transição com presença de Etringita.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de cimentos e suas composições em massa.	22
Tabela 2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.	24
Tabela 3 – Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.	24
Tabela 4 – Tipos de Cimentos e suas composições em massa.	25
Tabela 5 – Tolerância para idade de ensaio.	28
Tabela 6 – Propriedades das fibras de carbono.	35
Tabela 7 – Descrição técnica da fibra de carbono utilizada.	39
Tabela 8 – Massa específica absoluta e massa específica unitária dos agregados.	40
Tabela 9 – Traço Obtido pelo método CIENTEC.	41
Tabela 10 – Formulações com respectivas quantidades de materiais.	42
Tabela 11 – Resultados do ensaio de excitação por impulso.	57
Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio para a densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta para os CP's.	59
Tabela 13 – Quantitativos.	65
Tabela 14 – Orçamento das formulações.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

a/c – Água/Cimento

CP's – Corpos de Prova

CP – Concreto Portland

$E_{c,d}$ – Módulo de Elasticidade Dinâmico

$E_{c,i}$ – Módulo de Elasticidade Estático Inicial

E_{cs} – Módulo de Elasticidade Estático Secante

F1 – Formulação 1

F2 – Formulação 2

F3 – Formulação 3

F4 – Formulação 4

FC – Fibra de Carbono

f_{cd} – Resistência média à compressão

F_{ck} – Resistência característica a compressão

$f_{ct,m}$ – Resistência média à tração

$f_{ct,sp}$ – Resistência à tração por compressão diametral

GPa – Gigapascal

h – Horas

LCME – Laboratório Central de Microscopia Eletrônica

pH – Potencial Hidrogeniônico

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa – Megapascal

mm – Milímetros

NBR – Norma Brasileira

ZT – Zona de Transição

γ_c – Coeficiente de segurança do concreto

°C – Graus Celsius

μm – Micrometros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	16
2.1.1	Classificação dos compósitos.....	18
2.1.2	Características principais dos compósitos reforçados com fibras.....	19
2.2	CONCRETO	21
2.2.1	Constituintes do Concreto	21
2.2.1.1	Cimento Portland	21
2.2.1.2	Agregados	23
2.2.1.3	Água.....	25
2.2.2	Propriedades do Concreto.....	26
2.2.2.1	Trabalhabilidade.....	26
2.2.2.2	Resistência (Tração e Compressão)	27
2.2.2.3	Módulo de elasticidade	30
2.2.2.4	Porosidade	34
2.3	FIBRA DE CARBONO	35
2.3.1	Fibra de Carbono como material de adição	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	MATERIAIS	38
3.2	TRAÇOS	39
3.2.1	Traço referência	40
3.2.2	Formulações.....	41

3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	42
3.3.1	Execução dos corpos-de-prova.....	42
3.3.2	Compressão de corpos de prova cilíndricos.....	45
3.3.3	Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	45
3.3.4	Determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo ensaio de excitação por impulso.	46
3.3.5	Determinação das propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente, e porosidade aberta.	48
3.3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	51
4.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	54
4.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO PELO ENSAIO DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO.....	56
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE, E POROSIDADE ABERTA.....	59
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	61
4.6	QUANTITATIVOS E ORÇMENTÇÃO	64
5	CONCLUSÕES	66
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Inúmeras conquistas na engenharia civil ao longo dos anos se deram em função do estudo dos materiais, em específico, o Concreto, uma mistura de cimento, água, agregados (grãos e miúdos) e/ou aditivos/adições, que com o passar do tempo, assim como a engenharia, também teve evolução. Essa evolução se deu por alguns motivos, deve-se citar como um dos principais, a busca pela melhoria das propriedades mecânicas.

Para melhorar as propriedades mecânicas do concreto podem ser utilizados vários meios, como, por exemplo, adicionar mais ou menos água à mistura cimentícia, reforçar com armadura, adicionar sílica ativa, entre outros. Atualmente, muitas pesquisas, como o Estudo da Influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos (LACERDA; HELENE, 2005); Análise da Influência de Adição de Sílica ativa na resistência à compressão em concretos (GONÇALVES, 2016); Um Estudo sobre o Concreto de Alto Desempenho (SILVA, 2010), e outras, se concentram no estudo do emprego de diferentes aditivos e adições, pois estes vêm gerando resultados positivos.

A fibra de carbono é um material, segundo Nasseh (2007, p. 68), “[...] produzido a partir da oxidação controlada, carbonização e grafitação de precursores orgânicos de carbono, sendo a poliacrilonitrila a mais usual, pois fornece uma boa média de propriedades mecânicas de tração, compressão e módulo de elasticidade”.

Complementa Inagaki et al. (2014, p. 1, tradução nossa) “[...] que no campo da engenharia civil, esse material é usado como reforço do concreto com êxito em edifícios e pontes, expostos a água do mar para proteger da erosão dos saís”. A fibra de carbono como reforço estrutural do concreto apresenta pesquisa (FORTES, 2000) com resultados conhecidos e verificados, porém, como material de adição no concreto, apresenta poucos estudos.

De conhecimento da engenharia civil, e afirmado por Muley, Varpe e Ralwani (2015), a resistência à tração do concreto é aproximadamente um décimo da resistência à compressão. Eis que as estruturas de concreto armado se tornam interessantes pelo fato do aço resistir melhor que o concreto aos esforços de tração. Todavia, o aço não é o único material que junto ao concreto pode dar essa capacidade. A fibra de carbono apresenta uma resistência ainda maior que o aço, segundo Kendall (1997 apud BEBER, 2003), ficando em aproximadamente 5000 MPa comparados com 1500 MPa do aço protendido. Conforme Muley, Varpe e Ralwani (2015), a adição da fibra de carbono ao concreto realmente aumenta sua resistência à tração, porém, essa pode não ser a única melhoria dada pela adição.

As melhorias que essa adição pode trazer ao concreto podem ser quantificadas através de ensaios normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Um dos principais ensaios é o de resistência à compressão, pois conforme Neville e Brooks (2013, p. 3), “[...] a resistência à compressão tem várias outras propriedades que estão relacionadas a ela, como: massa específica, impermeabilidade, durabilidade, resistência à abrasão, resistência ao impacto, resistência à tração, entre outras”.

Contudo, é necessário sinalizar que mesmo a fibra de carbono apresentando vantagens em relação ao aço, também apresenta desvantagens, sendo a principal o custo elevado, variando de 1:20 à 1:90, dependendo da particularidade da fibra de carbono proposta (KENDALL, 1997 apud BEBER, 2003).

1.1 OBJETIVOS

Para verificar o possível melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição da fibra de carbono picotada, propõem-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades físicas, mecânicas e morfológicas do concreto com a adição de fibra de carbono picotada, bem como quantificar os custos envolvidos para a produção deste material compósito.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir as propriedades mecânicas resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade para os compósitos concreto/fibra de carbono picotada;
- Definir as propriedades físicas absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta.
- Analisar morfológicamente os compósitos desenvolvidos utilizando microscopia eletrônica de varredura;
- Verificar os custos envolvidos para a produção do material compósito concreto/fibra de carbono picotada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica. Entre os grandes temas que serão expostos temos primeiramente uma seção de materiais compósitos, em seguida uma seção referente ao concreto e outra para a fibra de carbono. Por fim, uma seção referente adição de fibra de carbono ao concreto.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Melhorar determinada propriedade de um material e ajustar a manufatura de um material dotando-o de propriedades adequadas às necessidades, dentre outros objetivos, pode ser alcançada a partir de materiais compósitos. Esse vocábulo, compósito, comumente utilizado na engenharia segundo Quinino (2015) “[...] deriva da adaptação do termo da nomenclatura inglesa *composite material*, que, por sua vez, advém do latim *compositu*, derivado do verbo *componere*, cujo significado principal é juntar, aglutinar ou compor”. (p.10).

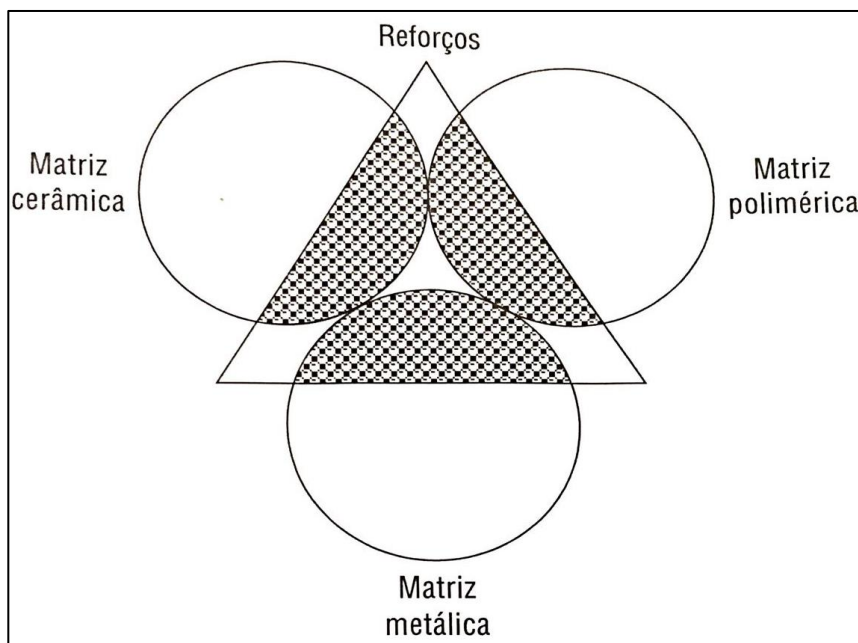
Gay (2015, p.3) afirma que, “Materiais compósitos não são novos, eles têm sido usados desde a antiguidade”. Esta afirmativa é reforçada por Bentur e Mindess (2007), que comentam que há aproximadamente 3500 anos atrás, tijolos reforçados com palha foram usados para construir uma colina de 57 metros de altura, sendo que o primeiro compósito fabricado amplamente foi o cimento amianto, em 1900, decorrente da invenção do processo Hatscheck.

Quanto à definição, ou seja, do que se tratam esses tipos de materiais, existem diversas, variando entre os autores. Porém, neste trabalho serão citadas as consideradas mais relevantes. Conforme Levy Neto e Pardini (2006), são materiais onde é possível distinguir uma fase de reforço, normalmente na forma filamentar, e outra aglutinante (matriz), a qual permite que os reforços transfiram esforços mecânicos entre si e trabalhem de forma integrada. Complementando, Gay (1991, apud FELIPE, 2008) define que são formados por diferentes materiais, sendo que quando analisados macroscopicamente, os mesmos são homogêneos. Estes materiais podem ser fibras, contínuas ou não, que oferecem resistência mecânica, e a matriz, que dá forma ao produto final. Smith e Hashemi (2012, p.452) definem como: “Um material compósito é formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais

micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, em sua essência, são insolúveis uns aos outros”.

Os materiais utilizados como matriz podem apresentar três naturezas distintas, entre as quais, cerâmica, metálica e polimérica. “Ou seja, não exibem simultaneamente resistência mecânica e à corrosão, ou não apresentam rigidez e tenacidade à fratura aliada à baixa massa específica” (LEVY NETO; PARDINI, 2006, p.2). Logo, a importância de se reforçar essas matrizes dá origem aos compósitos. A Figura 1 é uma representação gráfica deste conceito. Resumidamente, a matriz juntamente ao reforço apresentam propriedades superiores a cada componente individualmente.

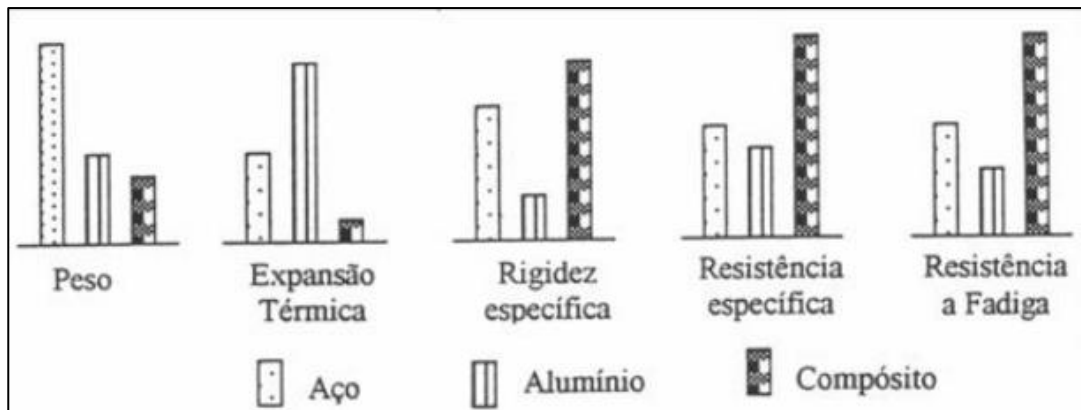
Figura 1 – Representação das combinações possíveis em compósitos com diferentes matrizes.



Fonte: Levy Neto; Pardini (2006).

Segundo Smith e Hashemi (2012, p.9), “Os materiais compósitos substituíram componentes metálicos principalmente na indústria aeroespacial e aviônica, na indústria automotiva, na construção civil e na indústria de material esportivo”. Isso se deve ao fato desses materiais apresentarem vantagens em relação aos materiais monolíticos tradicionais, como o aço e alumínio. Essa afirmação pode ser confirmada através da Figura 2, onde é possível observar graficamente que os materiais compósitos, além de serem mais leves, ainda apresentam maior resistência mecânica, resistência à fadiga e maior rigidez, além de menor expansão térmica.

Figura 2 – Comparação de propriedades físicas de materiais monolíticos e compósitos.



Fonte: Chawla (1987 apud Aquino, 2003).

Dirigindo-se especificamente à área da engenharia civil, o concreto por si só é considerado um material compósito, dadas às definições anteriores. A pasta de cimento Portland trata-se da matriz, enquanto que os reforços são constituídos pelos agregados (brita e areia). Além disso, conforme Quinino (2015), merecem destaques os compósitos: concreto armado, cimento amianto (fibrocimento) e o concreto fibroso.

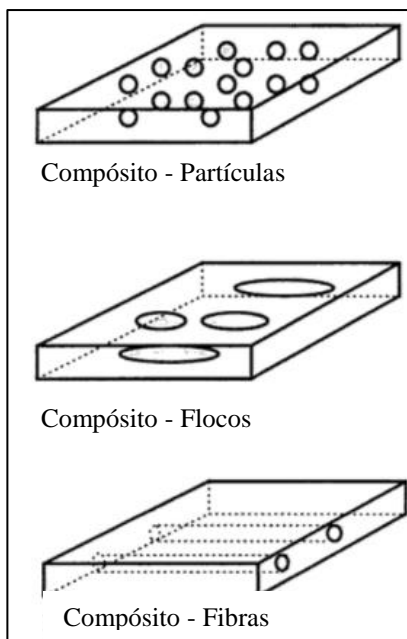
2.1.1 Classificação dos compósitos

Segundo Berthelot (1999), podem ser classificados pela forma dos componentes ou pela sua natureza. Em relação à forma, existem dois grandes grupos, os compósitos reforçados com fibras e os reforçados com partículas. Kaw (1997) cita, além dos dois grupos, mais um, compósitos reforçados com flocos. A Figura 3 ajuda a mostrar graficamente a diferença entre esses três.

Os compósitos reforçados com fibra, conforme Berthelot (1999), podem ser de fibras contínuas, curtas, picotadas, aleatórias, entre outras. Kaw (1997) complementa que esse tipo de reforço é geralmente anisotrópico (diferentes propriedades em diferentes direções), dado que as partículas são adicionadas aleatoriamente.

Quando o material é reforçado com partículas existem dois objetivos principais que Berthelot (1999) comenta – melhorar certas propriedades (rigidez, resistência a abrasão, aumentar a temperatura de operação) ou utilizar as partículas como enchimento, diminuindo o custo do material, sem perder as características.

Figura 3 – Tipos de compósitos baseados no formato do reforço.



Fonte: Kaw (1997).

Por fim, Kaw (1997) cita que os compósitos reforçados com flocos apresentam vantagens em maior força e menor custo. Porém, não podem ser facilmente orientados e apenas um número limitado de materiais está disponível para uso.

A classificação, quanto à natureza, refere-se à natureza da matriz. Existem os três tipos, já comentado anteriormente, metálica, cerâmica e polimérica (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Este trabalho se concentra na matriz cerâmica (pasta de cimento Portland) e no reforço com fibra (fibra de carbono).

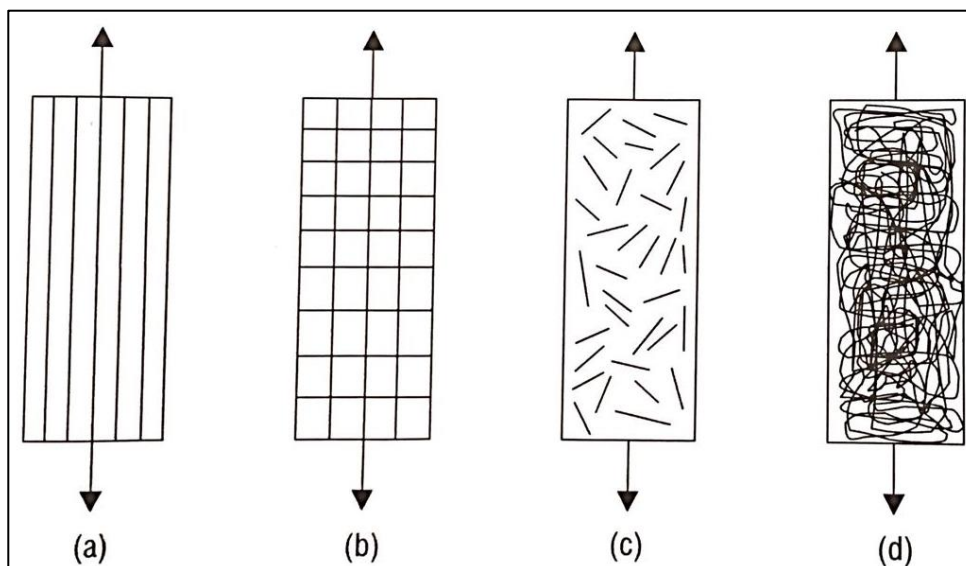
Essa matriz, segundo Quinino (2015), é caracterizada como frágil, sendo que a adição de fibras a matrizes de cimento permite considerável aumento da tenacidade dos elementos estruturais resultantes. Entre os objetivos almejados com a incorporação de fibras a esse tipo de matriz está a melhoria da resistência à flexão e à tração, a ampliação da resistência ao impacto, controle da fissuração e alteração do modo de ruptura, além de modificar a estrutura reológica do material.

2.1.2 Características principais dos compósitos reforçados com fibras

Os compósitos que apresentam fibras como reforço nem sempre têm as mesmas propriedades mecânicas, isto é, conforme a classificação apresentada na seção anterior. As

fibras adicionadas podem ser de diversos tipos, unidirecionais (Figura 4-a), bidirecionais (Figura 4-b), curtas, aleatórias (Figura 4-c) e contínuas (Figura 4-d).

Figura 4 – Diferentes modelos de reforços.



Fonte: Levy Neto; Pardini (2006).

Essa classificação é importante, dado que, se considerar um compósito fabricado de uma mesma matriz e de um tipo específico de fibra, com idênticas frações volumétricas e submetidos a esforços de tração longitudinais, os compósitos reforçados com fibras uni e bidirecionais tendem a ser mais eficazes estruturalmente. Porém, tal fato só se verifica para esforços mecânicos longitudinais. Já se os esforços são aplicados transversalmente, a maior resistência mecânica seria da fibra bidirecional, seguida da contínua, da aleatória e por fim da unidirecional. (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Características como desempenho estrutural e resistência mecânica são informações importantes, além do baixo custo. Muitas vezes, ao se melhorar determinada característica diminui-se outra. Segundo Levy Neto e Pardini (2006), em uma matriz de importância relativa entre desempenho estrutural e baixo custo em relação à construção civil, o baixo custo é um fator mais importante que o desempenho estrutural, logo, possivelmente as fibras uni e bidirecionais não são tão interessantes quando comparadas às aleatórias e contínuas.

Dessa forma ao se tratar da adição de fibras ao concreto sabe-se que se os custos envolvidos forem altos, talvez a solução não seja útil para o ramo da construção civil.

2.2 CONCRETO

O concreto é o principal componente a ser analisado no presente trabalho, é o material estrutural mais utilizado na construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 2008) e muito disseminado, podendo ser facilmente encontrado em qualquer obra. Na construção civil, o concreto de elevada resistência, tem por objetivo dar origem aos principais elementos de edificações, lajes, vigas, pilares e fundações. Segundo Neville e Brooks (2013), o concreto o material estrutural mais utilizado e em seguida vem o aço, algumas vezes se completam (Concreto Armado) e outras competem entre si. Para se ter noção do consumo deste material, Pedroso (2009 apud LIMA et al., 2014) relatou que é estimado que, anualmente, são consumidos 11 bilhões de toneladas de concreto, com um consumo de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano segundo a Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP).

Neville e Brooks (2013), comentam que em um sentido amplo o concreto é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Geralmente esse meio é o produto da reação entre cimento hidráulico e água. Os constituintes do concreto de importância para esse trabalho serão brevemente discutidos no decorrer do capítulo, a fim de entender o seu efeito sobre o produto final, o concreto.

2.2.1 Constituintes do Concreto

Nesta seção serão apresentados os materiais constituintes do concreto (cimento, agregados e água), bem como sua influência e motivo de estarem presentes no compósito. Em relação a adições, há uma seção sobre a fibra de carbono.

2.2.1.1 Cimento Portland

As primeiras utilizações de cimento conhecidas foram na Roma, baseado em um cimento hidráulico. Somente em 1824 o cimento moderno, conhecido por Cimento Portland, foi patenteado por José Aspdin (NEVILLE; BROOKS, 2013). O cimento Portland, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente, tendo como matérias-primas o calcário e a argila. A mistura formada é aquecida em um forno à temperatura de clínquerização (1450 °C) dando origem então ao clínquer, que após resfriado é finamente moído. A fim de evitar a pega instantânea do cimento é adicionado o gesso. Se este não for adicionado, o cimento ao entrar

em contato com água endurece quase que instantaneamente. Logo, para ter trabalhabilidade o gesso torna-se necessário. Algumas outras adições podem ser feitas também, como escórias de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos.

As escórias de alto forno tem a propriedade de ligante hidráulico muito resistente desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante a do clínquer, desta forma apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final.

Os materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico, se bem que de forma distinta. A reação acontece se, além da água, os materiais pozolânicos moídos em grãos finíssimos também forem colocados em presença de outro material (clínquer). Essa adição gera maior impermeabilidade (ABCP, 2002).

Por fim, os materiais carbonáticos servem também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro lubrificante. Quando presentes no cimento são conhecidos como filer calcário (ABCP, 2002).

É válido mostrar através da Tabela 1 os diferentes tipos de cimento em função das possíveis adições comentadas e suas composições em massa. Nessa tabela estão os principais tipos oferecidos no mercado.

Tabela 1 – Tipos de cimentos e suas composições em massa.

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clíquer + Gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material Carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Fonte: Adaptado de ABCP (2002).

2.2.1.2 Agregados

Agregados para Construção Civil são materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas conforme o uso, tais como, a pedra britada, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de rocha, além das argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros (LA SERNA; REZENDE, 2013). A importância dos agregados na mistura cimentícia pode ser observada segundo a afirmação de Neville e Brooks (2013), onde aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume do concreto é ocupado por agregados. Logo, sua qualidade é de extrema importância.

As propriedades mecânicas e físicas dos agregados não podem ser relacionadas diretamente com as do concreto, porém algumas de suas propriedades indiretamente atuam no desenvolvimento potencial do concreto, como: aderência, forma e textura influenciam essa propriedade, resistência mecânica (a resistência do concreto a compressão, por exemplo, não pode ser muito maior que a resistência da maior parte dos agregados nele contido), tenacidade (resistência à ruptura por impacto), dureza (resistência ao desgaste), porosidade e absorção (aderência entre eles e a pasta de cimento, estabilidade química, resistência à abrasão e massa específica), sanidade (estável ou instável), e impurezas (interferência no processo de hidratação) (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A NBR 7211 (ABNT, 2009a) especifica os requisitos exigíveis para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland. A norma só se destina aos agregados naturais (já encontrados fragmentados ou a partir da britagem de rochas). Porém, existem também os agregados artificiais (produzidos por algum processo industrial), os quais não serão discutidos neste trabalho.

O conhecimento da rocha e região da qual foi originada o agregado é uma informação importante, porque segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009a), quando os mesmos são provenientes de regiões litorâneas, ou extraídos de águas salobras ou ainda quando houver suspeita de contaminação natural (regiões onde ocorrem sulfatos naturais como a gipsita) ou industrial (água do lençol freático contaminada por efluentes industriais), o agregado pode apresentar potencial reativo. Logo, a fim de se garantir a segurança, os teores de cloretos e sulfatos não devem exceder os limites estabelecidos na norma técnica.

Os agregados podem ser classificados em dois tipos: graúdos e miúdos. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009a) a diferença se dá pelos materiais passantes em peneiras específicas, sendo o miúdo passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e retidos

na de 150 μm , enquanto que o gráudo são os passantes na peneira com abertura de malha de 75 mm e retidos na de 4,75 mm.

A distribuição granulométrica, isto é, a distribuição em percentagem dos diferentes tamanhos de grãos, deve atender os limites da norma citada. A Tabela 2 apresenta os limites referentes ao agregado miúdo enquanto na Tabela 3 os valores referentes ao agregado gráudo.

Tabela 2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 μm	15	35	55	70
300 μm	50	65	85	95
150 μm	85	90	95	100

Notas:
¹⁾O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
²⁾O módulo de finura da varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 3 – Limites da distribuição granulométrica do agregado gráudo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica (d/D) ¹ / Tipo				
	4,75/12,5 (Brita 0)	9,5/25 (Brita 1)	19/31,5 (Brita 2)	25/50 (Brita 3)	37,5/75 (Brita 4)
75 mm	-	-	-	-	0-5
63 mm	-	-	-	-	5-30
50 mm	-	-	-	0-5	75-100
37,5 mm	-	-	-	5-30	90-100
31,5 mm	-	-	0-5	75-100	95-100
25 mm	-	0-5	5-25	87-100	-
19 mm	-	2-15	65-95	95-100	-
12,5 mm	0-5	40-65	92-100	-	-
9,5 mm	2-15	95-100	-	-	-
6,3 mm	40-65	-	-	-	-
4,75 mm	80-100	-	-	-	-
2,36 mm	95-100	-	-	-	-

¹⁾Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado gráudo.

Fonte: Adaptado da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Por fim, existem ensaios especiais para atender às especificações dos agregados, porém, devem ser requeridos pelo cliente ou contratante.

2.2.1.3 Água

A qualidade da água é importante porque suas impurezas podem interferir na pega do cimento, afetar negativamente na resistência do concreto ou causar manchas em sua superfície, podendo ainda levar à corrosão das armaduras. Se a água potável contiver alta concentração de sódio e potássio, existe o risco de ocorrência de reação álcali-agregado. Todavia, por via de regra, água com pH entre 6,0 e 8,0 sem sabor salino ou salobro é adequada ao uso, e coloração escura ou odor não necessariamente implicam em dizer que existem substâncias deletérias (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A NBR 15900-1 (ABNT, 2009b) especifica os requisitos para a água ser considerada adequada ao preparo do concreto. A Tabela 4 apresenta um resumo dos limites máximos aceitáveis das principais impurezas contidas na água de amassamento.

Tabela 4 – Tipos de Cimentos e suas composições em massa.

IMPUREZA	TEOR MÁXIMO (mg·L ⁻¹)	PROCEDIMENTO DE ENSAIO
Íon Cloreto		
Concreto protendido	500	NBR 15900-6
Concreto armado	1000	
Concreto simples (sem armadura)	4500	
Sulfato	2000	NBR 15900-7
Álcalis	1500	NBR 15900-9
Material sólido	50000	NBR 15900-3

Fonte: Adaptado NBR 15900-1 (ABNT, 2009b).

A quantidade de água adicionada à mistura cimentícia também pode ser prejudicial, o excesso de água é negativo, visto que parte da água é consumida na mistura e outra parte é evaporada desde os primeiros dias de cura, gerando poros no concreto. Hummel (1966, p.23, tradução nossa) escreveu: "O grau de compactação ou o volume de poros do concreto se reflete em certo modo nas resistências à compressão e à flexo-tração, na absorção de água e na estabilidade contra o congelamento, em sua durabilidade, assim como nos processos de retração e dilatação". Todavia, pouca água não permite uma boa trabalhabilidade. Logo, o traço é baseado nas características do concreto que se deseja, sabendo que à melhoraria de determinada propriedade influencia outras.

2.2.2 Propriedades do Concreto

Nesta seção serão descritas e revisadas as propriedades importantes do concreto, essas propriedades são analisadas no estado fresco e endurecido.

2.2.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade no concreto deve ser associada ao seu comportamento reológico, caracterizado pela maior ou menor mobilidade da mistura fresca frente à ação da força da gravidade ou pela resposta a um estímulo externo, como a vibração ou compactação (RECENA, 2014). Já Neville e Brooks (2013) definem esse conceito como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total.

Na prática comum, Balbo (2009) informa que a trabalhabilidade é dada pela medida do concreto fresco que, para concretos convencionais, é geralmente correlacionada por um método prático chamado *slump test*, no português conhecido como abatimento de tronco de cone.

Alguns fatores, como quantidade de água, tipo e granulometria dos agregados, relação agregado/cimento, presença de aditivos (superplastificante, por exemplo), e finura do cimento, podem afetar a trabalhabilidade da mistura, porém entre eles, o principal é o teor de água (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Ao se falar em trabalhabilidade é importante também falar de outros dois conceitos que estão unidos de maneira direta, segregação e exsudação. O primeiro diz respeito ao movimento de partículas grosseiras do concreto em sentido descendente (separação das frações grossa e fina) resultando na perda de homogeneidade. Já a exsudação é o fenômeno concomitante com a segregação, isto é, tendência de movimento ascendente de partículas finas com água de amassamento (pasta de cimento na superfície). Entre as causas temos o transporte do concreto não misturado adequadamente, presença excessiva de finos, vibração intensa, utilização de concreto muito fluido. A fim de evitar esses problemas, devem-se utilizar baixas relações água/cimento, evitar excesso de vibração, etc. (BALBO, 2009).

2.2.2.2 Resistência (Tração e Compressão)

“A resistência do concreto é normalmente considerada a propriedade mais importante, embora em algumas situações outras propriedades, como durabilidade, impermeabilidade, estabilidade, são mais importantes” (NEVILLE; BROOKS, 2013, p.95).

Porém, uma propriedade como estabilidade está ligada indiretamente aos parâmetros de resistência do concreto (tração e compressão).

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), a resistência à compressão é a característica mais importante do concreto, e é obtida em ensaios normatizados pela ABNT, citados no decorrer do trabalho. Na falta de ensaios, a resistência à compressão (resistência de projeto ou resistência última do concreto), para concretos com 28 dias ou mais, pode ser dada pela Equação (1).

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

onde,

f_{ck} = resistência característica à compressão

γ_c = coeficiente de segurança do concreto (geralmente igual a 1,4).

Como relatado, a resistência à compressão é obtida por ensaios normatizados, sendo os corpos-de-prova (CP's) cilíndricos moldados segundo a ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015a), e a tensão de compressão obtida de acordo com a ABNT NBR 5739 (ABNT, 2007).

De acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015a), a altura dos CP's deve ser o dobro do seu diâmetro. São moldes de plástico, inertes e resistentes, para manter sua forma durante execução do ensaio, conforme recomenda a norma. Em função do seu diâmetro e do tipo de adensamento, a norma recomenda uma quantidade de camadas a serem adensadas. Após o adensamento da última camada deve ser feito o rasamento da superfície com a borda do molde com uma régua metálica. Durante a cura os CP's devem ser armazenados em locais protegidos de intempéries, sendo devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água. Antes de enviar os corpos de prova para o ensaio deve-se preparar suas bases, de modo a tornar as superfícies planas.

Referente ao ensaio que define o procedimento de obtenção da tensão de compressão, a NBR 5739 (ABNT, 2007) cita que primeiramente deve ser obtida o tamanho da secção transversal a partir da média de dois diâmetros com exatidão de $\pm 0,1$ mm, enquanto

que a altura deve ser medida sobre seu eixo longitudinal com precisão de 0,1 mm. O rompimento deve ser dado em uma idade especificada, sendo que as tolerâncias de tempo são observadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Tolerância para idade de ensaio.

IDADE DO ENSAIO	TOLERÂNCIA PERMITIDA (h)
24 h	0,5
3 dias	2
7 dias	6
28 dias	24
63 dias	36
91 dias	48

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007).

É posicionado então o corpo de prova na máquina, centralizado, com as faces limpas e secas. O carregamento de ensaio deve ser aplicado continuamente, com velocidade constante de carregamento de $(0,45 \pm 0,15) \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. O carregamento deve cessar após uma queda da força que indique a ruptura do CP (ABNT NBR 5739, 2007).

A resistência à compressão (f_c), em MPa, deve ser calculada, conforme consta na norma, pela Equação (2).

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (2)$$

onde,

F = Força máxima alcançada (N)

D = Diâmetro do CP (mm).

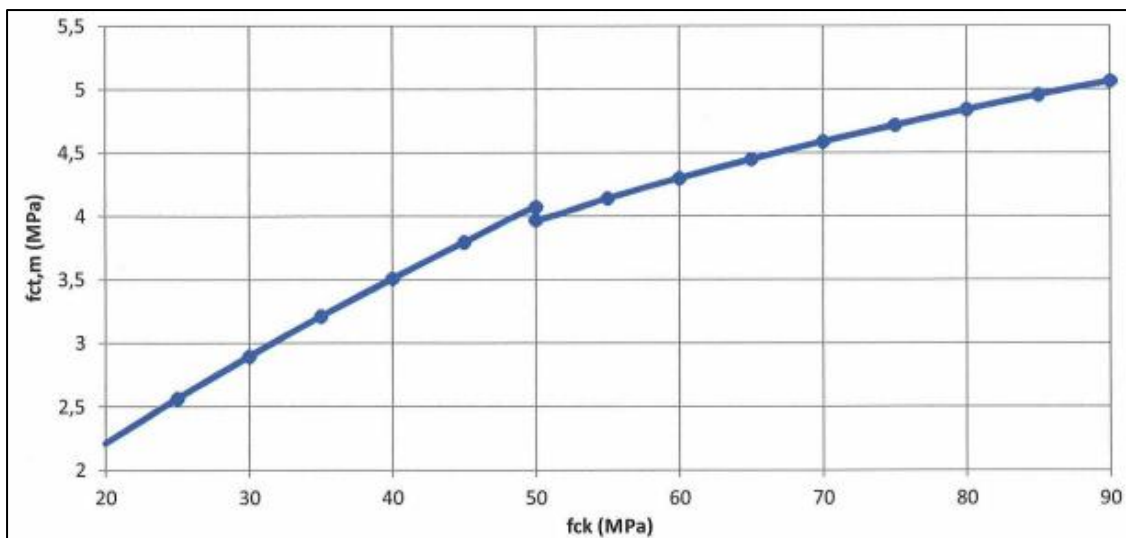
Como citado anteriormente na introdução, a resistência do concreto é muito maior referente às solicitações de compressão, dado que a resistência média à tração ($f_{ct,m}$) é cerca de 10% da resistência característica à compressão para f_{ck} até 50 MPa. Após esse valor, a $f_{ct,m}$ cresce mais lentamente em relação a f_{ck} , conforme Figura 5.

O gráfico da Figura 5 foi baseado nas Equações (3) e (4) apresentadas por Santos e Cerutti (2015), onde o uso das mesmas se dá na ausência de ensaios específicos.

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (\text{para: } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}) \quad (3)$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \times \ln(1 + 0,11 f_{ck}) \quad (\text{para: } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}) \quad (4)$$

Figura 5 - Resistência média de tração do concreto.



Fonte: Santos; Cerutti (2015).

Porém, existem alguns ensaios a fim de calcular a resistência à tração do concreto, entre eles, por exemplo, o ensaio de compressão diametral ou o ensaio de tração na flexão. Conforme Lopes Junior (2011), o ensaio de compressão diametral é conhecido por *Brazilian Test*, dado que o método de dosagem experimental e o método para calcular a resistência à tração foi elaborado pelo professor Fernando Lobo Carneiro.

O ensaio é descrito conforme a NBR 7222 - Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, e consiste na aplicação de uma carga na vertical sobre o corpo de prova entre duas placas a fim de se obter a resistência à tração por meio de uma compressão no plano diametral. A Força é aplicada até a ruptura do CP. A moldagem dos CP's é feita conforme a ABNT NBR 5738, sendo a resistência à tração calculada pela Equação (5) (ABNT NBR 7222, 2010).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \times D \times L} \quad (5)$$

onde,

F = Carga máxima obtida no ensaio (N)

D = Diâmetro do corpo de prova (mm)

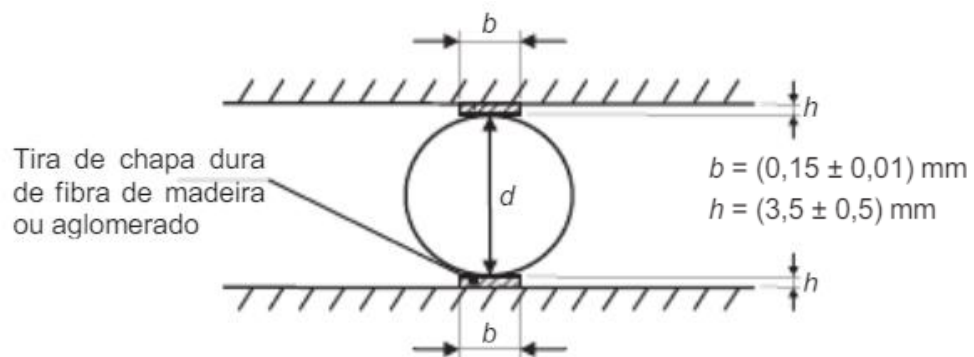
L = Altura do corpo de prova (mm).

A tensão de compressão máxima ocorre na superfície da amostra, imediatamente abaixo da aplicação das cargas. A distribuição de carga aplicada é um fator muito importante

para o sucesso do ensaio. Se a área de contato entre os pratos da máquina de ensaio e a superfície do corpo de prova for muito pequena – geralmente causada por irregularidades na superfície do corpo de prova – a carga aplicada será muito concentrada, levando a uma compressão máxima localizada, podendo ocorrer uma falha causada por tensões de cisalhamento (LOPES JUNIOR, 2011).

Para evitar esse problema, a norma NBR 7222 (2010) aconselha que a aplicação da carga adequada deva ser acompanhada da colocação de frisos de fibra de madeira ou aglomerado entre os pratos da máquina de ensaio e a peça, conforme Figura 6.

Figura 6 – Disposição do corpo-de-prova com as dimensões do friso.



Fonte: ABNT NBR 7222 (2010).

2.2.2.3 Módulo de elasticidade

No concreto estrutural as propriedades mais importantes são o limite de resistência e o módulo de elasticidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

O módulo de elasticidade é comumente obtido a partir de equações empíricas, conforme constam na NBR 6118 (ABNT, 2014). Para concreto de idade de 28 dias, o módulo de elasticidade estático inicial ($E_{c,i}$) é dado pela Equação (6).

$$E_{c,i} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (6)$$

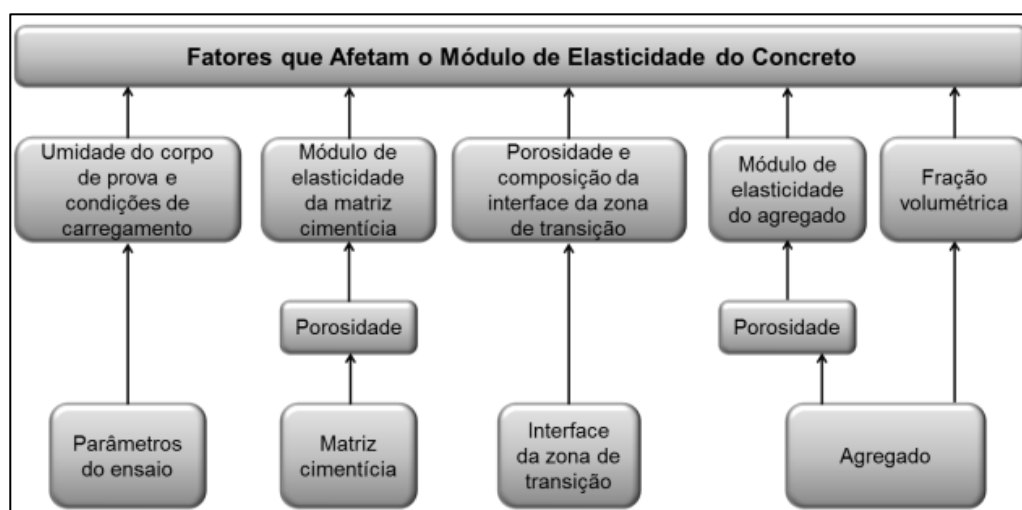
onde,

α_E = Parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade.

Outra forma de calcular é por meio do ensaio de compressão simples (NBR 8522, 2008) que exigem aparatos e cuidados especiais devido à pequena deformação do concreto

(ALMEIDA, 2012). Pacheco et al. (2014), complementam que o concreto é um material que apresenta um comportamento não linear quando submetido a tensões de compressão ou de tração devido à sua natureza visco-elástica de pseudo sólido. O diagrama tensão-deformação mostra que esse material, diferentemente dos materiais homogêneos, não segue a lei de Hooke. Esta importante propriedade do concreto varia, sendo afetada por uma série de fatores (Figura 7). Entre estes fatores, o mais importante é a relação a/c.

Figura 7 – Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Metha; Monteiro (2014 apud PACHECO et al., 2014).

Uma vez que a determinação dos módulos de elasticidade dos concretos é dada pela declividade da curva tensão-deformação, cuja curva para o concreto é não linear, três métodos para calcular o módulo de elasticidade estático são utilizados. Isso originou três tipos de módulo de elasticidade: Módulo secante, módulo tangente e módulo cordal (FREITAS, 2012). O módulo obtido na NBR 8522 (ABNT, 2008) é o módulo de deformação tangente inicial ($E_{c,i}$), porém no Anexo da norma é apresentado como se obtém o módulo secante ($E_{c,s}$). Ambos os procedimentos são destrutivos aos corpos-de-prova ensaiados.

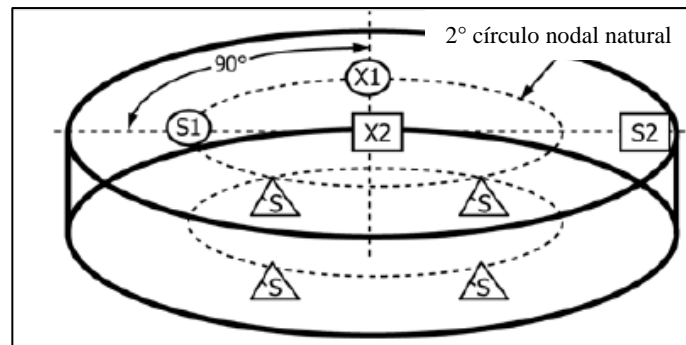
Todavia, existem outros ensaios capazes de determinar o módulo de elasticidade, conhecidos por ensaios dinâmicos, de caráter não-destrutivo, os quais são uma poderosa ferramenta aos projetistas, por apresentarem a vantagem de fornecer informações integradas e globais da estrutura a respeito da rigidez e do amortecimento e, além disso, podem ser repetidos e comparados ao longo do tempo (DIÓGENES et al., 2011).

O método dinâmico, conforme Almeida (2012), baseia-se na determinação da frequência natural de vibração do elemento a ser analisado quando o mesmo é submetido a vibrações longitudinais ou transversais ou torcionais. Duas técnicas experimentais dinâmicas

têm sido muito utilizadas: a da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através do material, e a da frequência ressonante. Referente a frequência ressonante, dois métodos a utilizam para a determinação da frequência natural: ensaios em que as vibrações podem ser geradas por vibrações mecânicas variáveis (método de ressonância forçada) ou por um impacto (método de vibrações livres). O segundo método de estímulo por impulso (impacto) consiste em obter as frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica provocada pelo impacto de um pulsador no corpo de prova e, com base na sua massa e dimensões, é calculado o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Nota-se que não existe uma normalização nacional sobre esse ensaio, sendo a ASTM E1876 (2015) a norma de referência para a sua realização (PACHECO et al., 2014).

Conforme a norma ASTM E1876 (2015), o ensaio de excitação por impulso pode ser realizado em amostras de geometria complexas, além de paralelepípedos, cilindros/hastes, ou discos. O trabalho focará em detalhar o procedimento para ensaiar corpos-de-prova com geometria de disco em temperatura ambiente. A norma recomenda que a espessura dos discos seja de 10 a 20 vezes menor que o diâmetro do mesmo. Deve ser medida a espessura em cinco locais distintos (duas bordas externas, dois raios médios e no centro), a tolerância é de 0,1% ou 0,01 mm para discos maiores, todavia o caso de uso de uma tolerância menos precisa deve ser anotado no relatório. O diâmetro deve ser medido em quatro locais do disco com intervalo de 45° ao redor da circunferência com a tolerância igual à aplicada à espessura. Os discos devem ser pesados e apoiados para o ensaio em quatro pontos igualmente dispostos. Para primeira vibração natural o transdutor deve ser localizado no ponto S1, a amostra deve ser golpeada no ponto X1 e devem ser realizadas cinco leituras consecutivas, a média dessas se caracteriza por $f1$. Se a variação for maior que 1% o operador deve rever a técnica. Se os ajustes não melhorarem a repetibilidade, o operador deve determinar a fonte da variação, podendo ser duas as causas: geometria ou não homogeneidade. Para segunda vibração natural o transdutor deve ser localizado no ponto S2, a amostra deve ser golpeada no ponto X2 e devem ser realizadas cinco leituras consecutivas, sendo a média dessas caracterizada por $f2$, seguindo os mesmos critérios de $f1$ para aceitação. Os pontos citados podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 – Pontos de golpe e fixação do transdutor.



Fonte: ASTM E1876 (2015).

O módulo de Young para o disco é calculada pela média dos módulos $E1$ e $E2$ que são determinados pelas frequências de ressonância f_1 e f_2 , conforme as Equações (7) a (9).

$$E1 = \frac{[37,6991 f_1^2 D^2 m (1 - \mu^2)]}{(K_1^2 t^3)} \quad (7)$$

$$E2 = \frac{[37,6991 f_2^2 D^2 m (1 - \mu^2)]}{(K_2^2 t^3)} \quad (8)$$

$$E = \frac{(E1 + E2)}{2} \quad (9)$$

onde,

f_1, f_2 = primeira e segunda frequência natural do disco, respectivamente (Hz)

D = média dos diâmetros do disco (mm)

m = massa do disco (g)

μ = coeficiente de Poisson (Tabelado)

K_1, K_2 = primeiro e segundo fator geométrico natural do disco, respectivamente

t = média da espessura do disco (mm).

O módulo de elasticidade dinâmico ($E_{c,d}$) é aproximadamente igual ao módulo tangente inicial ($E_{c,i}$) determinado no ensaio estático ou obtido empiricamente conforme a norma NBR 6118 (2014) e, portanto, maior do que o módulo secante estático. Desta forma, há alguns anos, pesquisadores procuram estabelecer a relação entre o módulo dinâmico e o estático, todavia essa relação não é facilmente determinada pela análise do comportamento físico, pois a heterogeneidade do concreto influencia os dois módulos de forma diferente e

assim alguns autores sugerem equações empíricas a fim de relacioná-los (DIÓGENES et al., 2011).

Conforme Diógenes et al. (2011), na comparação dos resultados obtidos experimentalmente entre os módulo estático (E_c) e dinâmico para CP's cilíndricos, a equação empírica que mais satisfatoriamente conseguiu estimar E_c a partir de $E_{c,d}$ foi a de Lyndon e Baladran (1986), representada na Equação (10).

$$E_c = 0,83 E_{c,d} \quad (10)$$

Essa equação é também citada e utilizada em outros estudos que tratam a respeito do tema, como por exemplo: (SILVA, 2007); (BEZERRA et al. 2009); (MILAŠINOVIĆ; GOLEŠ, 2017).

2.2.2.4 Porosidade

A porosidade é uma característica de fundamental importância no julgamento global da qualidade do concreto, visto ser responsável diretamente, tanto por sua resistência mecânica como por sua durabilidade (RECENA, 2014).

A presença de vazios dada pelos poros diminui a resistência, segundo Neville (1997), apresentando uma redução de 30% na resistência com 5% de vazios e uma redução de 10% de resistência com 2% de vazios. Conforme Recena (2014), esses vazios são dados pela existência de três estruturas diferenciadas na constituição da porosidade: 1) Porosidade capilar; 2) Porosidade gel; 3) Porosidade ar. A primeira torna possível um fluxo hidráulico nos dois sentidos (entrando e saindo) sem causar alterações de volume, por serem poros com diâmetros de grandes dimensões. A segunda é composta pela água passível de evaporação, podendo representar 20% do volume da pasta de cimento – são canais de menor diâmetro que causam grandes variações no volume do concreto. A terceira é formada por poros decorrentes da presença de pequenas bolhas de ar, que interrompem os canais capilares. O concreto com ar incorporado apresenta desta forma menor permeabilidade, porém existe um comprometimento direto em sua resistência mecânica.

Por fim, Pêsoa et al. (2012) afirmam que, sendo o concreto um material heterogêneo, a porosidade de sua matriz é um importante parâmetro para que se possa avaliar a resistência mecânica, grau de impermeabilidade, resistência à abrasão, etc.

2.3 FIBRA DE CARBONO

O primeiro cientista a patentear o uso de fibras de carbono foi Thomas Edison, em 1877, com a utilização de filamentos dessa fibra para produção de filamentos elétricos (NASSEH, 2007).

Fibras de carbono referem-se a fibras que contêm pelo menos 92% de carbono em sua composição. Podem ser curtas ou contínuas, sua estrutura pode ser cristalina, amorfa ou parcialmente cristalina. Quando cristalina é a mesma do grafite, sendo uma estrutura anisotrópica (CHUNG, 2012).

São produzidas normalmente a partir de três materiais orgânicos: rayon (polímero celulósico), poliacrilonitrila (PAN), e piche (alcatrão de petróleo ou de carvão). Passam por um processo de carbonização ou pirólise de um filamento orgânico a temperaturas que variam de 1000 °C e 3000 °C. O processo de produção envolve uma série de tratamentos, como estabilização, carbonização, grafitação e tratamento superficial (QUININO, 2015). Nasseh (2007) complementa que a maioria das fibras de carbono é atualmente produzida a partir do componente básico, PAN, e a sua cor é preta. Podem ser encontradas em quatro principais tipos e qualidades, dependendo de suas propriedades: Alta Resistência (*High Strength* - HS) ou Módulo Comercial, Módulo Intermediário (*Intermediary Modulus* - IM), Alto Módulo (*High Modulus* - HM) e Módulo Superior (*Ultra High Modulus* - UHM). A Tabela 6 apresenta algumas propriedades dos tipos de fibra citados.

Tabela 6 – Propriedades das fibras de carbono.

	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	Densidade (g·cm⁻²)	Módulo de Elasticidade Específico
Carbono HS	3500	160 - 270	1,8	90 - 150
Carbono IM	5300	270 - 325	1,8	150 - 180
Carbono HM	3500	325 - 400	1,8	180 - 240
Carbono UHM	2000	400+	2,0	240+

Fonte: Nasseh (2011).

Uma questão importante sobre este tipo de fibra, todavia, diz respeito ao seu elevado custo, que constitui um forte obstáculo a sua aplicação. Apesar disso, apresenta ainda muitas vantagens, que serão vistas a seguir.

2.3.1 Fibra de Carbono como material de adição

Chung (2012) afirma que as fibras de carbono são atrativas como material de adição quando comparadas com as fibras de vidro, pois essas são superiores na estabilidade química e não dissolvem no ambiente alcalino do concreto. Quinino (2015) complementa que a alta alcalinidade do cimento tende a provocar uma deterioração mais ou menos rápida do compósito. Todavia, conforme Chung (2012), essas não são as únicas vantagens da adição de fibra de carbono ao concreto, podendo ser citadas também as seguintes vantagens da adição:

- Aumento da resistência à flexão;
- Aumento da tenacidade;
- Aumento da durabilidade sob carregamento cíclico;
- Aumento da condutividade térmica;
- Melhora da durabilidade congelamento/descongelamento;
- Diminuição a retração;
- Diminuição a resistividade elétrica.

A única desvantagem, conforme Chung (2012), é a diminuição da resistência à compressão, que pode ser facilmente compensada com o uso de adições como sílica ativa.

Muley et al. (2015) estudaram a adição de 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,00% de fibra de carbono no concreto, e notaram que a trabalhabilidade diminui conforme a adição da fibra aumenta. Porém os autores se contrapõem com a afirmação de Chung (2012), pois, baseado em seus ensaios, a resistência à compressão também aumenta, inclusive nos primeiros dias. Além disso, constataram que os resultados dos testes de resistência à flexão mostram que o concreto não se comporta mais como um compósito frágil, comprovando que as fibras melhoram a ductilidade.

Em relação às características da fibra adicionada, Muley et al. (2015) concluíram que o comprimento da fibra, quando muito longa, diminui a trabalhabilidade. Em seu estudo, utilizaram um comprimento de 6 mm para as fibras de carbono picotadas.

Quinino (2015) utilizou um comprimento de fibra de 50 mm, e um concreto de 25 MPa. O traço empregado pelo autor foi de primeiramente 1 : 2,12 : 2,88, porém com ajustes chegou em 1 : 2,9 : 3,6 (Cimento Portland CP V-ARI: areia natural: agregado graúdo granítico), com relação água/cimento (a/c) igual a 0,66, todavia o estudo se concentrava em uma adição híbrida. O autor ainda afirma que a adição de fibras longas causa um maior efeito de perturbação no concreto (afastamento dos grãos de agregados).

A redução da trabalhabilidade foi notada também por Khalil e Abdulrazaq (2011), que em seu estudo usaram a fibra de carbono picotada como adição (0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5%) e concluíram também que a trabalhabilidade diminui, conforme o aumento da adição de fibra. Para um percentual de adição de 0,5%, a diminuição da trabalhabilidade chega a 68%.

O teor de fibras a ser adicionada é comentado por Quinino (2015). Segundo o autor, a capacidade de reforço está atribuída às fibras, logo, quanto maior o teor, maior será a quantidade de fibras que atuam diretamente. Por outro lado, a utilização de baixos teores em relação a um valor limite oferece poucas melhorias às propriedades mecânicas do compósito. Todavia a adição de grandes teores provoca diminuição da trabalhabilidade como citado.

Com a economia em mente, uma adição de 0,5% de fibra de carbono em relação ao peso do cimento é adequado para o concreto. Com uma razão de água cimento de 0,5 e um traço (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo) 1 : 1,5 : 2,49, a adição de fibra com 0,19% o aumento da resistência à flexão chega a 85% (CHUNG, 2012).

Quanto ao tamanho da fibra, Bastos (2017) comenta que a recomendação prática é que a fibra tenha comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima do agregado graúdo. Segundo ele, em concreto projetado aplica-se o agregado graúdo de dimensão 9,5 mm e a fibra não ultrapassa 35 mm de comprimento. Porém, segundo Santos (2012), a brita 1 é a mais utilizada pela construção civil, muito apropriada para fabricação de concreto para qualquer tipo de edificação de colunas, vigas e lajes, assim como em diversas aplicações na construção de edificações de grande porte. Conforme a Tabela 3, de dimensão máxima de 25 mm, logo o tamanho da fibra deve ser de no mínimo 50 mm de comprimento, segundo Bastos (2017).

3 METODOLOGIA

Este trabalho trata de uma pesquisa experimental, segundo Gil (2006), esse tipo de pesquisa privilegia a observação dos fatos ou dos fenômenos naturais sob condições estabelecidas pelo pesquisador. É um experimento ou situação criada em laboratório com a finalidade de observar, sob controle, a relação existente entre fenômenos ou situações, ou seja, busca saber se um fenômeno é a causa do outro – neste caso, estudar a influencia da adição da fibra de carbono ao concreto em relação às propriedades mecânicas e morfológicas do compósito.

Logo, no presente capítulo serão descritas todas as etapas experimentais realizadas para obtenção dos resultados finais. Primeiramente comentando a respeito dos materiais utilizados, caracterizando os agregados miúdos e graúdos, o tipo de cimento e o tipo e tamanho de fibra utilizados. Em seguida como se deu a obtenção do traço e então os ensaios normatizados pela ABNT, como os ensaios mecânicos de compressão e tração, ensaio de módulo de elasticidade pela ASTM, bem como o ensaio de índices físicos e o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.1 MATERIAIS

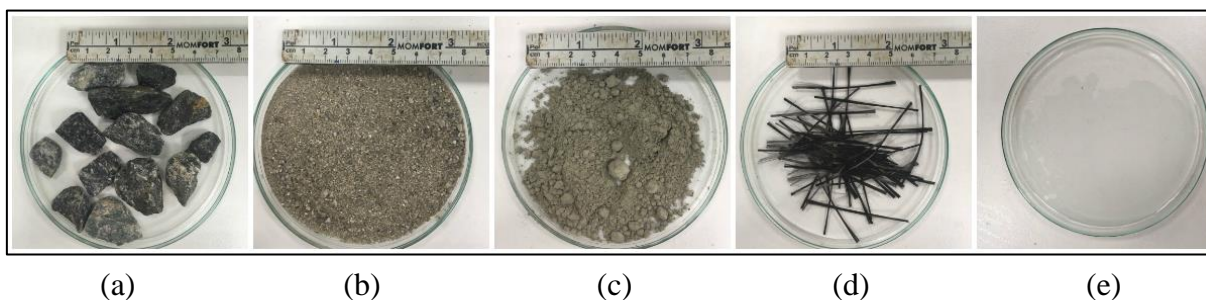
Os materiais utilizados nesse trabalho foram: Brita 1 (Figura 9-a) de origem granítica, areia média (Figura 9-b), cimento CP V-ARI (Figura 9-c), fibra de carbono (Figura 9-d), que tem suas características técnicas descritas na Tabela 7, cortada com comprimento igual à 50 mm, e a água (Figura 9-e).

Tabela 7 – Descrição técnica da fibra de carbono utilizada.

Fibra de Carbono - Módulo Intermediário (IM)¹			
Tração	σ l-90°	MPa	900
	σ t-0°	MPa	850
	E l-90°	GPa	90
	Et l-0°	GPa	90
	N		0,05
Compressão	σ l-90°	MPa	800
	σ t-0°	MPa	750
	E l-90°	GPa	80
	Et l-0°	GPa	75
Densidade	P	g·cm ⁻³	1,62
Notas:			
¹ Fibra de carbono – Tecido			

Fonte: Aniccasty (2017).

Figura 9 – Materiais utilizados.



Fonte: O Autor (2018).

3.2 TRAÇOS

Traço nada mais é do que um método de dosagem do concreto, Tutikian e Helene (2011), comentam que é o estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland e os procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, que pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais.

O método de dosagem escolhido pelo autor foi o método CIENTEC, o qual, segundo Recena (2011), tem os valores determinados como média de ensaios realizados em laboratório para os materiais da região do estado do Rio Grande do Sul, tendo como restrições experiências prévias para os materiais de outras regiões com o intuito de consubstanciar correções que certamente se farão necessárias.

3.2.1 Traço referência

Para o cálculo do traço referência, são utilizados valores de referência do método para massa específica e massa unitária conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Massa específica absoluta e massa específica unitária dos agregados.

Agregado	Massa Específica (kg·dm ⁻³)	Massa Unitária (kg·dm ⁻³)
Areia	2,63	1,50
Brita	2,64	1,29

Fonte: Recena (2011).

Assim, o cálculo da relação (a/c) é dado pela Equação (11) (RECENA, 2011, p.155). Considerando um f_{ck} de 30 MPa de resistência em 28 dias.

$$a/c = \frac{2,15 - \log f_{ck}}{1,27} = \mathbf{0,53} \quad (11)$$

Segundo Recena (2011) segue-se com o cálculo da relação cimento/agregados, tomando-se “m” como a soma da proporção de areia “a” mais a proporção de agregado graúdo “p”. Podemos dizer que a quantidade de água a ser empregada em 100 partes de materiais secos é dado por “H”, um valor tabelado em função do tipo de cimento e granulometria da brita, expressando-se matematicamente pela Equação (12) e Equação (13) e resultando em $m = 4,52$.

$$1 + m = \frac{100 \times a/c}{H} \quad (12)$$

$$1 + m = \frac{100 \times 0,53}{9,6} \quad (13)$$

Desta forma se “1+m” representa 100% de material seco, então a unidade “1” que representa o cimento, será, em termos percentuais o teor de cimento no concreto, dado por uma regra de três:

$$1 + m \rightarrow 100\%$$

$$1 \rightarrow \% \text{ Cimento}$$

Assim, temos que a percentagem de cimento é **18,12%**, e logo é possível calcular o teor de areia, expresso em percentagem da massa total de materiais secos, que será a diferença

de argamassa (α) que é um valor tabelado, conforme Recena (2011), em função da natureza da rocha e classificação granulométrica da brita – para este trabalho α vale 53%. Então o teor de areia é:

$$\%Areia = \alpha - \%Cimento = \mathbf{34,88\%} \quad (14)$$

Por fim o teor de brita, expresso em porcentagem total de materiais secos, será a diferença entre o teor total de materiais secos e o teor de argamassa:

$$\%Brita = 100\% - \alpha = \mathbf{47\%} \quad (15)$$

Para o traço unitário deve se dividir tanto a porcentagem de areia, quanto a de brita e água pelo teor de cimento, resumido na Tabela 9.

Tabela 9 – Traço Obtido pelo método CIENTEC.

Materiais	Traço	
	(%)	Massa
Cimento	18,12	1,00
Areia	34,88	1,93
Brita	47,00	2,59
Água	9,60	0,53

Fonte: O Autor (2018).

3.2.2 Formulações

Com o traço calculado, definiu-se as quatro formulações a serem comparadas no trabalho. Três delas contém porcentagens de adição de Fibra de Carbono (0,1 – 0,3 – 0,5%) e outra será somente concreto, sem nenhum aditivo ou adição, a formulação de referência neste caso. Como a adição de fibra de carbono (FC) é dada em função do volume de concreto e sabendo-se o volume do cilindro que molda os corpos de prova (10x20 cm), multiplica-se a porcentagem de FC pela sua densidade, conforme a Tabela 10, e na sequência pelo volume do molde, obtendo-se dessa forma a massa em gramas de FC que deve ser adicionada em cada formulação. A Tabela 10 resume as quatro formulações com a massa unitária de cada material para cada corpo de prova.

Tabela 10 – Formulações com respectivas quantidades de materiais.

Formulação	Materiais (g)	CP V-ARI		Areia		Brita 1		Água		Fibra de Carbono	
		1,00	(g)	1,93	(g)	2,59	(g)	0,53	(g)	%	(g)
F1	3800	688,53		1325,47		1786,00		364,80		0,10	2,54
F2	3800	688,53		1325,47		1786,00		364,80		0,30	7,63
F3	3800	688,53		1325,47		1786,00		364,80		0,50	12,72
F4	3800	688,53		1325,47		1786,00		364,80		-	-

Fonte: O Autor (2018).

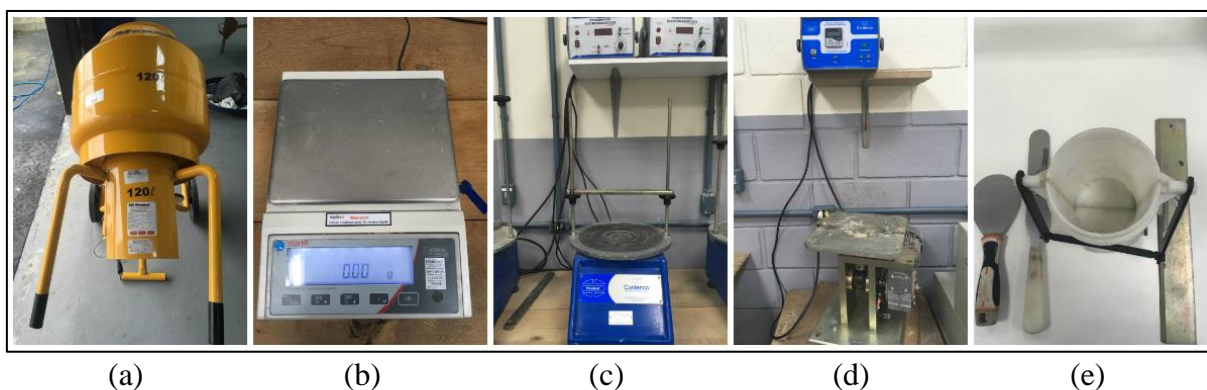
3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para este trabalho, a fim de analisar, quantificar e comparar os corpos-de-prova (CP's) de concreto com diferentes formulações serão feitos ensaios que utilizam as normativas da ABNT e ASTM. A seguir serão apresentadas as formulações, o processo de execução dos CP's e cada ensaio realizado.

3.3.1 Execução dos corpos-de-prova

Para moldagem e cura dos corpos-de-prova foi seguida a norma ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015a) para todas as misturas. Os equipamentos utilizados foram a betoneira (Figura 10-a), a balança de precisão 0,01g (Figura 10-b), o contador de golpes padrão (Figura 10-c), o peneirador eletromagnético (Figura 10-d) e as espátulas, régua e moldes (Figura 10-e).

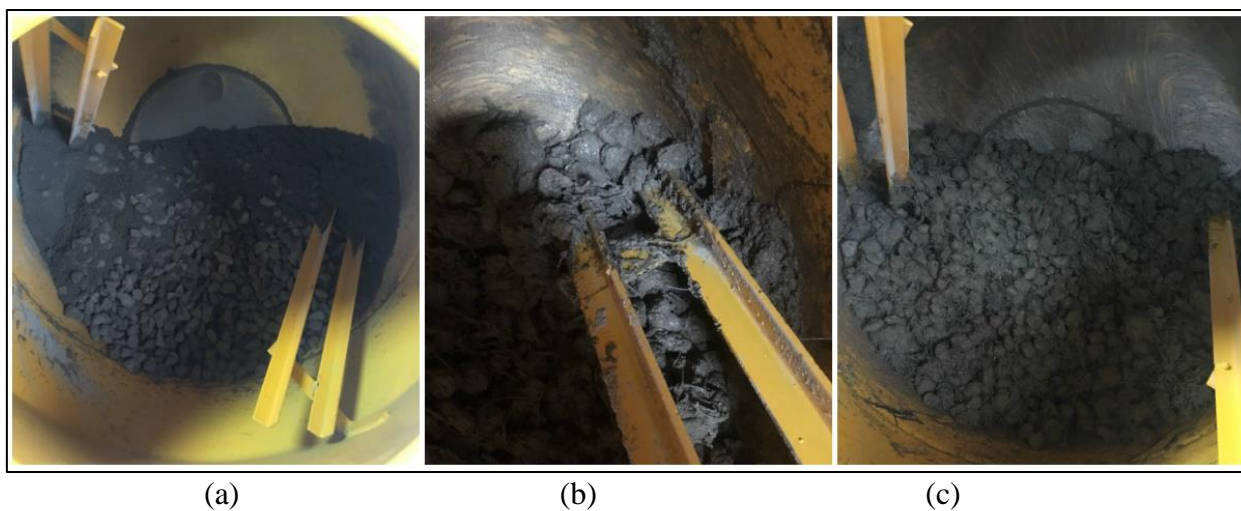
Figura 10 – Equipamentos utilizados para moldagem dos CP's.



Fonte: O Autor (2018).

Os moldes de 10x20 cm foram internamente revestidos com óleo (Semissintético 5W30). A mistura cimentícia foi preparada seguindo a sequência de mistura da brita, metade da água, areia e cimento, respectivamente (Figura 11-a) na betoneira, adicionando-se então a fibra de carbono. Cabe ressaltar que as fibras se acumularam nas hastes metálicas da betoneira na maioria das vezes (Figura 11-b), e nessas foi necessário uma mistura manual a fim de retirá-las e homogeneizá-las com o resto da mistura. Foi acrescentado o restante da água (Figura 11-c), onde se misturou por tempo suficiente, baseado no aspecto visual, em que a mistura apresentava-se homogênea, isto é, a cada percentual a mais de fibra dificultou-se a mistura e desta forma exigiu-se mais tempo de mistura. Com a mistura pronta adicionou-se em quatro camadas o concreto aos CP's, pois foi utilizado o adensamento manual com 50 golpes por camada. Finalmente executou-se o rasamento da superfície com a borda do molde (Figura 12-a), empregando-se para isso uma régua metálica. Desta forma, deixaram-se os CP's por 24h aproximadamente nos moldes (Figura 12-b), com uma lona sobre eles. Por fim, foram desmoldados os CP's, onde aguardaram em cura na temperatura ambiente até a realização dos ensaios.

Figura 11 – Processo mecânico de mistura do concreto.



Fonte: O Autor (2018).

Figura 12 – Processo de finalização do CP.



Fonte: O Autor (2018).

Nas formulações F2 e F3 notou-se que os corpos de prova ficaram mal adensados, logo foi necessário refazer as formulações utilizando vibração (adensamento mecânico) e o adensamento manual. Testou-se então essas formulações experimentalmente em relação há quanto tempo deveriam ser vibradas e quantos golpes deveriam ser dados, chegando-se a conclusão que as formulações F2 deveriam receber 50 golpes em cada camada e vibradas durante 3 minutos em uma frequência de 40% do aparelho, enquanto as formulações F3 deveriam receber 50 golpes em cada camada e vibradas durante 3 minutos em uma frequência de 80%. Utilizou-se o equipamento do peneirador eletromagnético para vibrar os corpos de prova e para isso necessitou-se de adaptação Figura 13.

Figura 13 – Adaptação do adensamento através do processo de vibração.

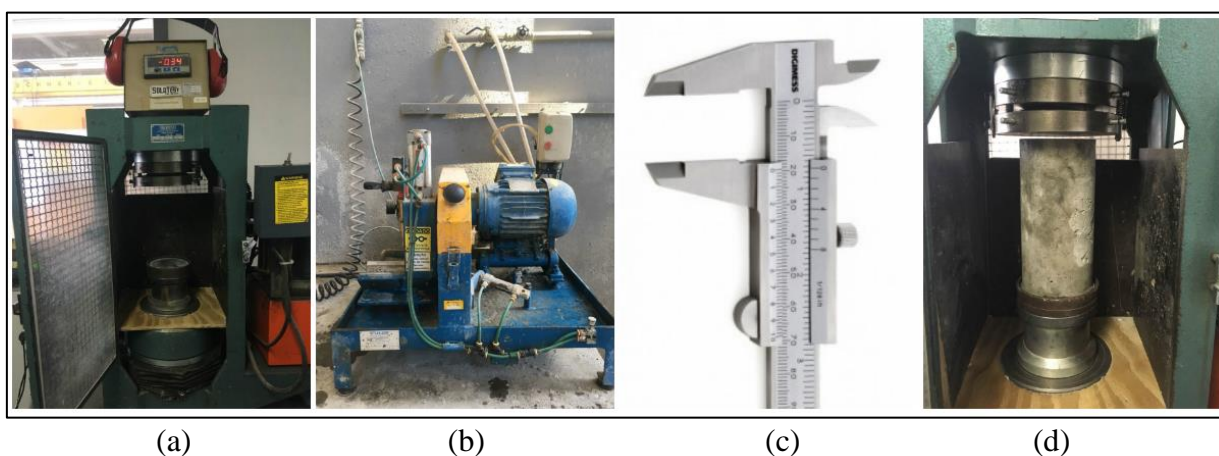


Fonte: O Autor (2018).

3.3.2 Compressão de corpos de prova cilíndricos

A compressão dos CP's foi realizada na empresa Perville Engenharia e Empreendimentos S.A, a qual possui uma prensa hidráulica da marca *Solotest* (Figura 14-a). Os corpos de prova tiveram primeiramente suas superfícies rasadas pela retifica (Figura 14-b) e seus diâmetros e alturas medidos pelo paquímetro da marca *Digimess* com precisão de 0,05 mm (Figura 14-c), conforme orienta a norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Com tudo pronto limpou-se e secou-se os pratos da máquina e as faces dos CP's, centralizando os CP's na máquina (Figura 14-d), para um carregamento constante de velocidade $(0,45 \pm 0,15) \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ foi levado ao rompimento. Finalmente obteve-se o valor da força máxima suportada e aplicando-se na Equação (2). Vale ressaltar que a relação h/d do corpo de prova foi verificada e corrigida quando necessário conforme consta na ABNT NBR 5739 (2007). Foram ensaiados corpos de prova em triplicata com idades de cura iguais a 7, 14 e 28 dias para cada formulação.

Figura 14 – Equipamentos e procedimento de compressão do corpo-de-prova.



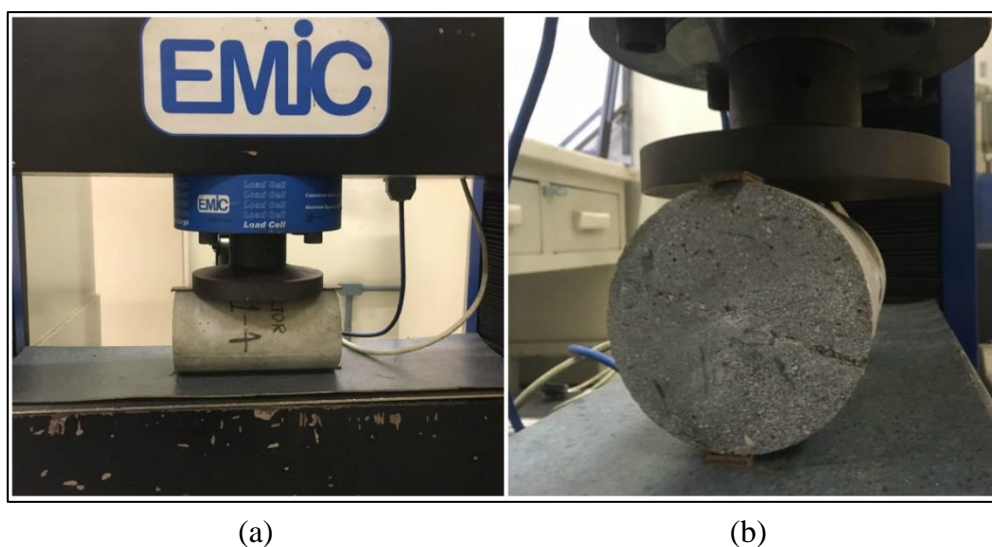
Fonte: O Autor (2018).

3.3.3 Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

Similarmente ao ensaio anterior, os CP's tiveram o mesmo preparo pré-ensaio (rasamento das faces e medições de diâmetros e alturas), porém estes foram ensaiados na instituição de ensino UNISOCIESC na máquina universal série 23 da marca EMIC. A norma NBR 7222 (ABNT, 2010) cita que quando o diâmetro, ou a maior dimensão dos pratos da máquina de ensaios, for menor que o comprimento do cilindro a ser ensaiado, deve ser

utilizada uma viga ou placa complementar de aço usinado, de forma a distribuir uniformemente, sobre todo o corpo de prova, as cargas aplicadas (Figura 15-a). Com o corpo de prova posicionado de forma que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas (Figura 15-b) recebam o carregamento e coincidam com o eixo de aplicação de carga, aplicou-se um carregamento com velocidade de $(0,05 \pm 0,02) \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ até sua ruptura segundo o que é recomendado pela norma citada. Foram ensaiados apenas corpos de prova com idade de cura igual a 28 dias para cada formulação.

Figura 15 – Procedimento de alocação do corpo-de-prova para ensaio.



Fonte: O Autor (2018)

3.3.4 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo ensaio de excitação por impulso

Primeiramente para o presente ensaio tentou-se utilizar o corpo de prova cilíndrico (Figura 16), seguindo a normativa ASTM E-1876 (2015), porém após algumas tentativas percebeu-se que a força para excitar os CP's que deveria ser aplicada pelo martelo era muito alta, dada a robustez dos corpos de prova, podendo levar a fratura da ponta do martelo. Este ensaio iria ser aplicado em corpos de prova com idade de 28 dias.

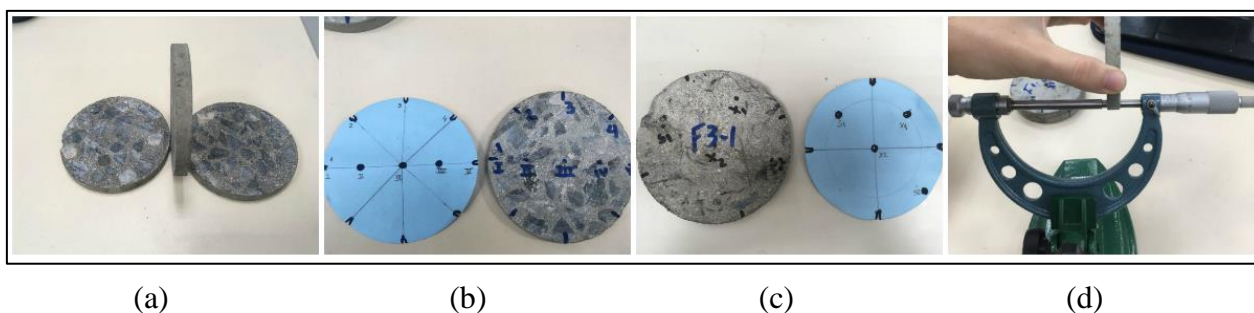
Figura 16 – Tentativa de ensaio com corpo de prova cilíndrico.



Fonte: O Autor (2018).

Desta forma os CP's que deveriam ser ensaiados foram levados a uma marmoraria na qual foi cortado um pedaço de 1,0 cm de espessura (Figura 17-a) conforme orienta a norma ASTM E-1876 (2015). Criaram-se então dois gabaritos (Figuras 17-b e 17-c) para marcar os pontos que deveriam ser medidos e os pontos em que deveriam ser alocados o transdutor e os pontos que deveriam ser excitados. Após marcação dos pontos, os diâmetros foram medidos com o paquímetro da marca *Digimess* com precisão de 0,05 mm e suas espessuras medidas pelo micrômetro (Figura 17-d) da marca *Insize* com precisão de 0,01 mm.

Figura 17 – Procedimento de medição e marcação.



(a)

(b)

(c)

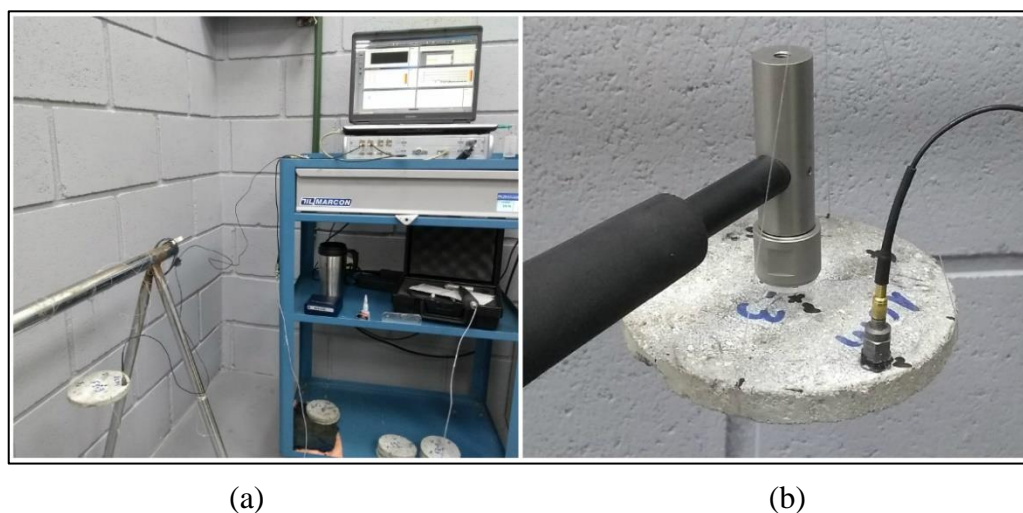
(d)

Fonte: O Autor (2018).

Os discos foram originados das triplicatas dos corpos de prova que sofreram a compressão aos 28 dias de cada formulação, desta forma obteve-se um número total de 12 discos. A idade de cura do concreto de cada um deles varia, sendo o valor máximo 39 dias e o valor mínimo 32 dias.

Com as marcações feitas, pesaram-se os corpos de prova na balança e procedeu-se a realização do ensaio (Figura 18-a). Primeiramente, fixaram-se o disco sob quatro fios de nylon com intervalos igualmente espaçados e o transdutor no ponto S1. Golpeou-se então a amostra no ponto X1, sendo realizadas cinco medições. Após, fixou-se o transdutor no ponto S2 e golpeou-se a amostra no ponto X2 (Figura 18-b), igualmente sendo realizadas cinco medições. Para cada disco (amostra) repetiu-se esse procedimento.

Figura 18 – Procedimento do ensaio de excitação por impulso.



Fonte: O Autor (2018).

3.3.5 Determinação das propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente, e porosidade aberta.

Para a obtenção das propriedades físicas (absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta) foram utilizados fragmentos dos mesmos corpos de prova do ensaio anterior (excitação por impulso) com máximos 38 e mínimos 31 dias de cura, variando entre formulações. Foram utilizados três fragmentos de cada um dos doze corpos de prova, totalizado 36 fragmentos (Figura 19-a).

O método segue o princípio de Arquimedes, segundo Rossetto (2017), consiste em: a) condicionar o corpo de prova em estufa à aproximadamente (103 ± 1) °C, conforme Figura 19-b, durante 24 horas, e realizar sua pesagem (m_s); b) imergir os corpos de prova em água durante 72 horas para que todos os poros sejam preenchidos e fazer a pesagem imersa (m_i), visível na Figura 19-c; c) pesagem da amostra com sua superfície seca (m_{ss}).

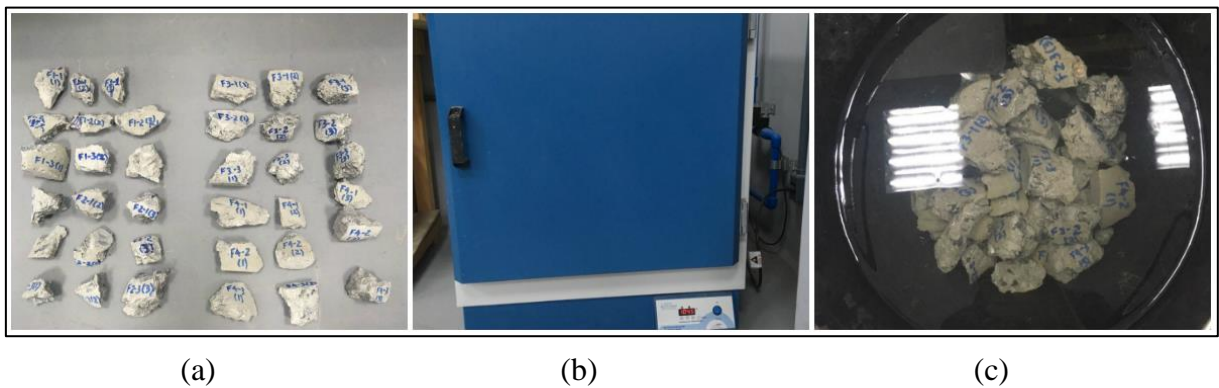
Com base nas medições de massa realizadas é possível obter as propriedades físicas utilizando as Equações (14) a (16).

$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{SS} - m_S}{m_S} \times 100 \quad (14)$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{m_S}{m_{SS} - m_i} \quad (15)$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{m_{SS} - m_S}{m_{SS} - m_i} \times 100 \quad (16)$$

Figura 19 – Procedimento de ensaio.



Fonte: O Autor (2018).

3.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturas de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Segundo Freitas Jr. (2013), o estudo da microestrutura permite entender o comportamento do concreto, além de servir como ferramenta de análise de patologias e análise de durabilidade.

O ensaio foi realizado no laboratório central de microscopia eletrônica (LCME) da UFSC, que contava com os equipamentos necessários para realização. Primeiramente foi utilizado dois fragmentos de corpos de prova distintos, para as formulações 1, 2 e 3 de aproximadamente um centímetro, escolheu-se os corpos de prova de maneira aleatória. Recobriu-se de ouro então esses seis pedaços (Figura 20-a) para que pudessem ser analisados no microscópio (Figura 20-b).

Figura 20 – Amostras recobertas de ouro/Equipamento do ensaio.



(a)

(b)

Fonte: O Autor (2018).

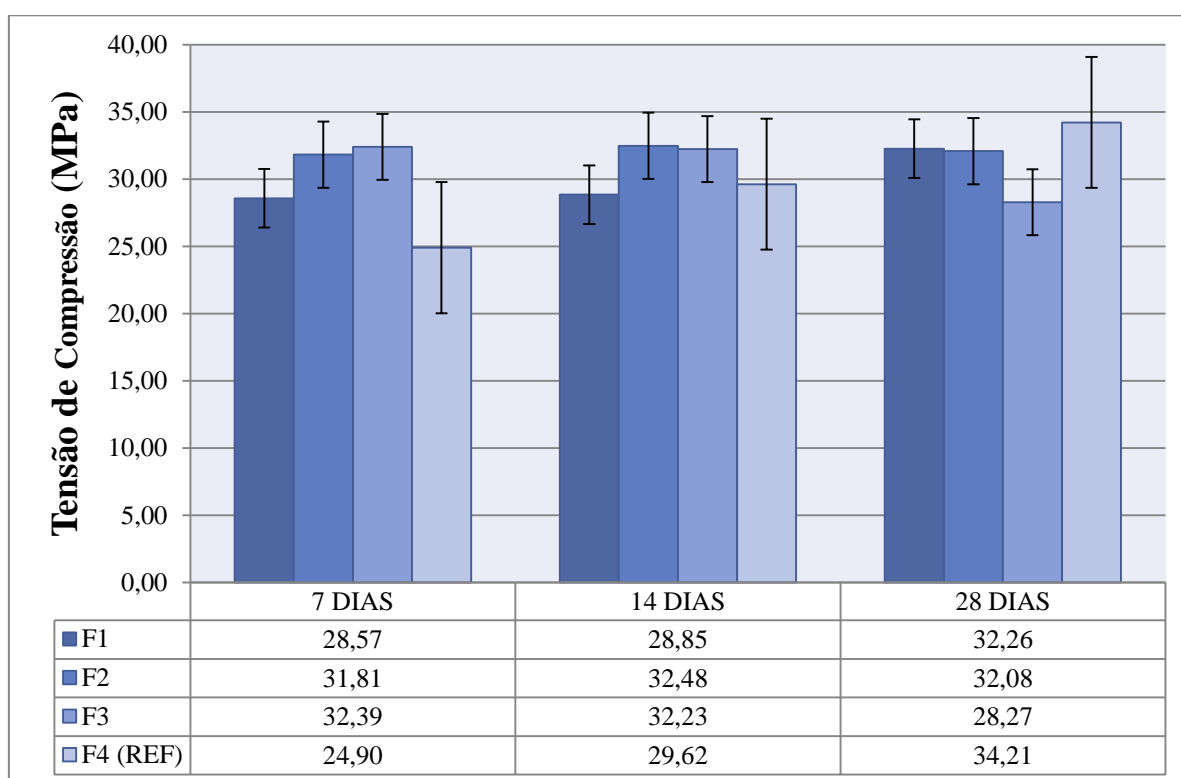
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios propostos bem como as discussões referentes aos ensaios realizados.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

O ensaio de resistência à compressão fornece o valor da força máxima que o corpo de prova suportou antes de romper, essa força pode ser dada nas unidades de Newton (N), quilograma-força (kgf), entre outras. Sabendo a área da seção transversal de cada corpo de prova previamente medida, calcula-se a tensão suportada. Desta forma os resultados do ensaio são apresentados na Figura 21, em um gráfico de tensão de compressão expressa em Megapascal determinada em função da idade de cura dos corpos de prova no momento do ensaio.

Figura 21 – Tensão de compressão em função da idade dos corpos de prova.



Fonte: O Autor (2018).

Os valores calculados referentes à tensão de compressão podem ser observados na região inferior da Figura 21, sendo que os mesmos são correspondentes a média, uma vez que

o ensaio foi realizado em triplicata, sendo possível observar também o desvio padrão de cada formulação.

Ao analisar a Figura 21, observa-se uma tendência da formulação do concreto referência (F4) de crescimento da tensão de compressão. Nota-se ainda que para essa formulação foi alcançado 72,77% da resistência à compressão aos 7 dias, obtendo um valor máximo para a resistência a compressão aos 28 dias de cura, com valor médio de 34,21 MPa.

Em relação às formulações contendo adição de fibra de carbono, esperava-se para a tensão de compressão valores menores que o obtido para o CP de referência, conforme observado por Chung (2012), que afirma que o concreto com adição de fibra de carbono tem diminuição da resistência à compressão. De fato observou-se tal constatação, todavia, ocorreu um fato interessante entre as mesmas, um comportamento muito característico para cada uma delas e não um comportamento comum para todas as formulações contendo a fibra. Na formulação F1, contendo 0,1% de adição de FC, a resistência à compressão cresceu ao longo dos dias, chegando a um máximo de 32,26 MPa aos 28 dias, alcançando 88,56% da sua resistência já aos 7 dias de cura.

Contudo, as formulações F2 e F3 não tiveram um crescimento progressivo ao longo dos dias. A formulação F2, contendo 0,3% de FC, apresentou sua resistência máxima aos 14 dias, com um valor médio de 32,48 MPa, apresentando nos seus primeiros 7 dias 97,96% de sua resistência, porém aos 28 dias sofreu um pequeno decréscimo em relação a máxima resistência alcançada, cerca de 1,23%, todavia em função do desvio padrão mostrado na Figura 21 deveria ser feito um estudo estatístico para verificar se o decréscimo pode ser afirmado. Por fim, a formulação F3, contendo 0,5% de FC alcançou sua máxima resistência aos 7 dias e depois foi sofrendo uma queda não linear de sua resistência à compressão, chegando a uma tensão de 28,27 MPa aos 28 dias, um decréscimo de 12,72% em relação a máxima tensão alcançada (32,39 MPa).

Ao perceber esse comportamento muito característico, deve-se atentar de que as mesmas formulações foram feitas em betonadas diferentes para cada idade de rompimento, isto porque não havia moldes suficientes para a realização de todos os CP's simultaneamente. Buchaim (2001) explica que o concreto tem um comportamento heterogêneo, e baseado em tal afirmação, fazer os CP's em betonadas diferentes pode ter influenciado diretamente nos resultados.

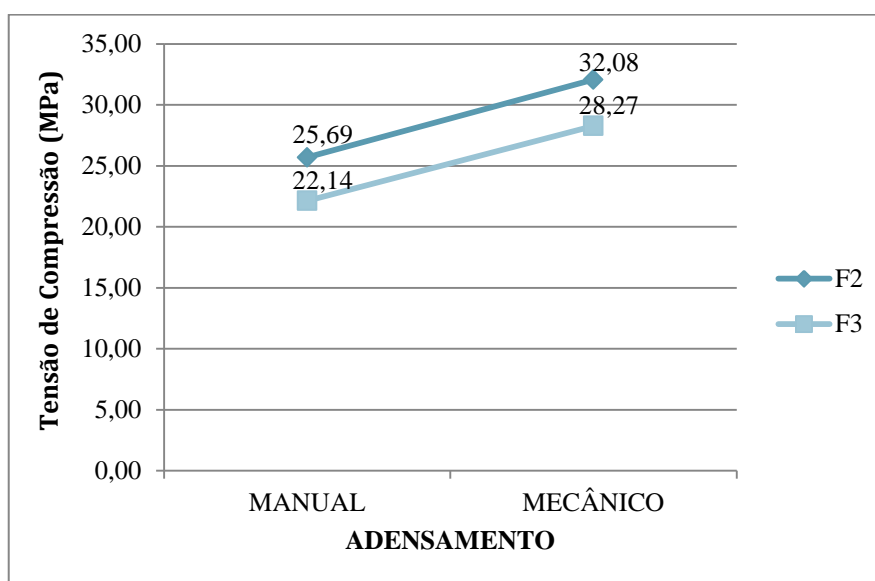
Ainda referente à análise de compressão suportada pelos CP's, vale relembrar a ocorrência comentada na metodologia, em que as formulações F2 e F3 foram ensaiadas duas vezes aos 28 dias, isto porque os primeiros CP's de ambas as formulações ficaram muito mal

adensados, de tal modo que novos CP's foram moldados utilizando um adensamento mecânico (vibração). Como as formulações para os diferentes dias de ensaio foram feitas em betonadas separadas, para as idades de 7 e 14 dias já se utilizou o adensamento mecânico.

Neste item é justificado também o porque da escolha do adensamento manual inicialmente. Como não foi realizado o *slump* do concreto, conforme recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2015a), em função da quantidade insuficiente de fibra de carbono, não havia como saber se o adensamento deveria ser manual ou mecânico, como não havia equipamento específico no laboratório para vibração, optou-se pelo adensamento manual.

Porém, percebeu-se o mesmo não era suficiente para o total adensamento dos corpos de prova, de modo que se adaptou o peneirador eletromagnético para realizar o adensamento mecânico. A implementação do adensamento mecânico trouxe uma melhoria significativa à resistência suportada pelos CP's, conforme observado na Figura 22.

Figura 22 – Aumento da tensão de compressão conforme método de adensamento.



Fonte: O Autor (2018).

A formulação F2 adensada mecanicamente apresentou uma melhoria de 24,84% em relação aos resultados de tensão à compressão obtida no CP que foi adensado manualmente, aumentando tensão de compressão de 25,59 Mpa para 32,08 MPa. Já a melhoria do adensamento na formulação F3, com 0,5% de fibra de carbono, foi de 27,72% em relação ao CP que foi adensado manualmente, com valores de 22,14 para 28,27 MPa, respectivamente.

A Figura 23 apresenta a diferença entre os CPs para a Formulação F2 após a implementação do processo de vibração, percebendo-se a redução dos vazios e também não sendo mais possível a visualização do agregado graúdo.

Figura 23 – Formato dos CP's para a Formulação F2 após implementação do processo de adensamento mecânico.

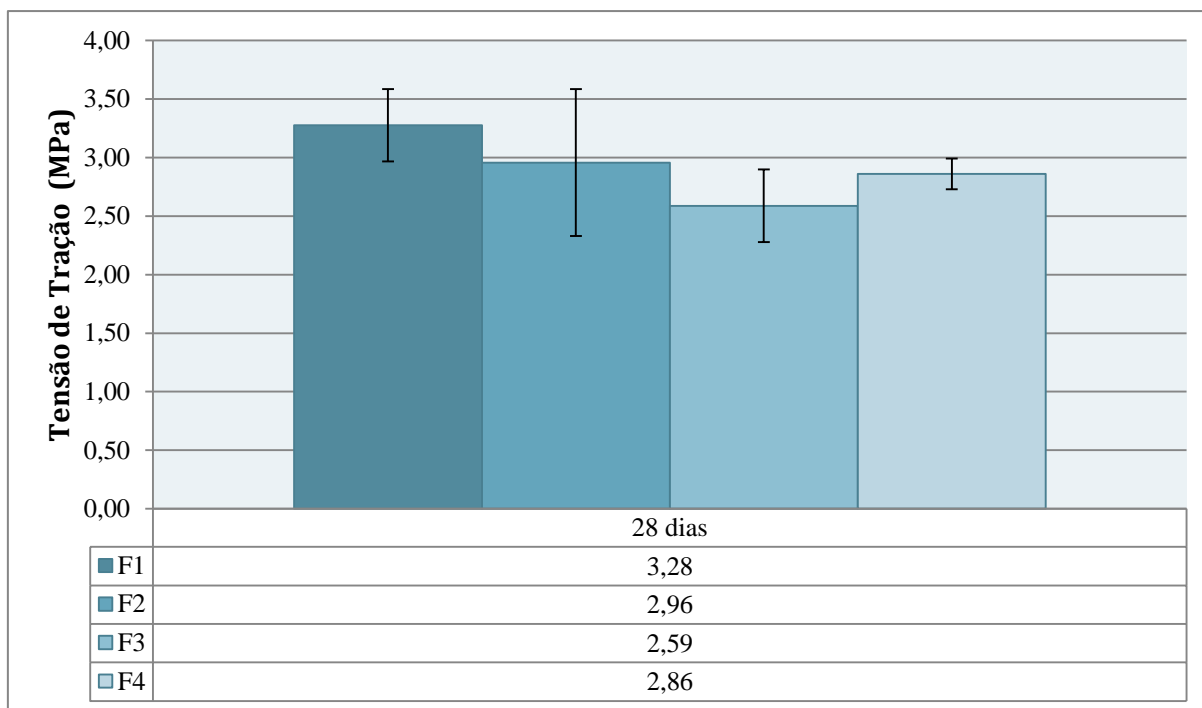


Fonte: O Autor (2018).

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.

Similarmente ao ensaio anterior, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral fornece o valor da força máxima que o corpo de prova suporta antes de seu rompimento. Com os valores de tensão calculados construiu-se um gráfico da tensão de tração (Figura 24). O ensaio de tração foi realizado utilizando-se apenas os CP's das três formulações contendo fibra de carbono e a formulação de referência aos 28 dias de idade de cura, considerando que a tensão de tração não apresenta elevados valores quando comparada a compressão, por exemplo, logo não existe a necessidade de analisar em diferentes idades. É possível observar também o desvio padrão das formulações no topo das barras da Figura 24.

Figura 24 – Tensão de tração obtida por compressão diametral.



Fonte: O Autor (2018).

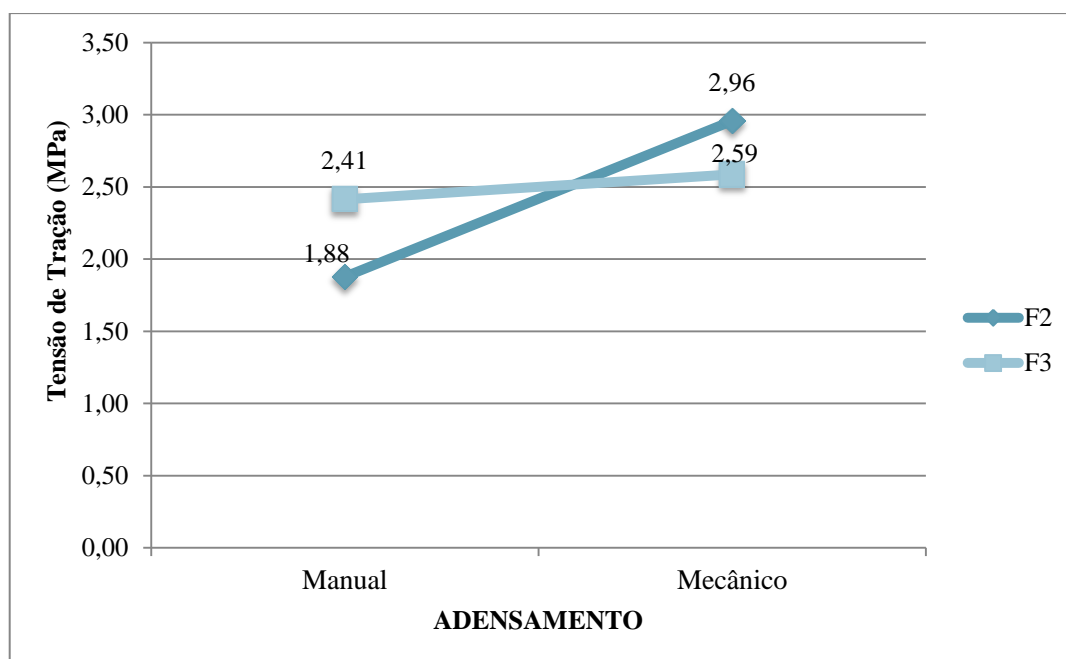
Dadas as propriedades da fibra de carbono, principalmente sua elevada resistência à tração, esperava-se valores superiores para as formulações de concreto com sua adição. Para o concreto referência F4 esperava-se um valor para a tensão de tração próximo a 3,0 MPa, conforme Figura 6, pois o concreto utilizado foi desenvolvido para ter uma resistência de compressão característica (f_{ck}) de 30 MPa. Conforme esperado, encontrou-se uma tensão de 2,86 MPa. Em relação às formulações com adição de fibra de carbono, a que apresentou a maior resistência à tração foi a F1, com 3,28 MPa, um aumento de 12,80%, enquanto a F2 apresentou um aumento de 3,28% e a F3 uma redução de 10,50% em relação a resistência à tração da formulação referência. Tais observações podem ser explicadas, conforme Metha e Monteiro (2008), que para teores baixos e moderados de fibra, isto é, menor ou igual a 2%, a contribuição mais importante do reforço ao concreto não é para a resistência, mas para a tenacidade e flexão. Desta forma, como a resistência à tração foi obtida do ensaio por compressão diametral, seu aumento não foi tão elevado.

Além disso, segundo Metha e Monteiro (2008), entende-se que a zona de transição (ZT) do concreto é considerada como a fase limitante da resistência no concreto, e com o aumento da adição de fibra de carbono as mesmas tendem a alocar-se com maior frequência nessas regiões, sendo que sua aderência pode representar um fator limitante para a resistência

do compósito. Desta maneira, o estudo do interior do concreto, como por exemplo, a microscopia eletrônica, pode tornar-se uma importante ferramenta de análise dessas regiões.

Foi analisado também a influencia do adensamento similarmente a seção anterior, apenas para as formulações F2 e F3. Tal influencia pode ser observada na Figura 25.

Figura 25 - Aumento da tensão de tração conforme método de adensamento.



Fonte: O Autor (2018).

A formulação F2 adensada mecanicamente apresentou uma melhoria de 57,45% em relação aos resultados de tensão à tração obtida no CP que foi adensado manualmente, aumentando tensão de compressão de 1,88 Mpa para 2,96 MPa. Já a melhoria do adensamento na formulação F3, foi de 7,47% em relação ao CP que foi adensado manualmente, com valores de 2,41 para 2,59 MPa, respectivamente.

4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO PELO ENSAIO DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO

O ensaio realizado não é recomendado em corpos de prova com geometria de discos quando está se analisando um material compósito reforçado por fibras em função da sua anisotropia nas propriedades mecânicas. Porém, foi a única maneira de se realizar o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dos CP's. Isto ocorreu porque ao se ensaiar com o corpo de prova cilíndrico, devido ao mesmo apresentar uma elevada robustez, a energia que

deveria ser impactada pelo martelo para gerar a excitação, isto é, a força do golpe, era tal que poderia quebrar a ponta do martelo.

Ressalta-se também os problemas de dimensão dos discos devido ao fato que foram cortados na marmoraria, os mesmos apresentavam um desvio padrão de espessura e diâmetro maior do que o considerado pela norma do ensaio ASTM E-1876 (2015).

Os resultados referentes ao ensaio podem ser visualizados na Tabela 11, o termo FY-X tem o valor de Y referente a formulação e o valor de X referente ao corpo de prova, neste caso a amostra F1-1 significa o primeiro corpo de prova da formulação 1.

A Tabela 11 apresenta o módulo de elasticidade dinâmico, segunda coluna, para todos os discos ensaiados. Na terceira coluna é apresentado o valor médio, sendo que as amostras F2-3 e F3-3 foram descartadas afim de não comprometer os resultados em função de o valor obtido estar muito fora do esperado. Por fim, a penúltima coluna apresenta o desvio padrão e a última o coeficiente de variação em porcentagem para cada formulação.

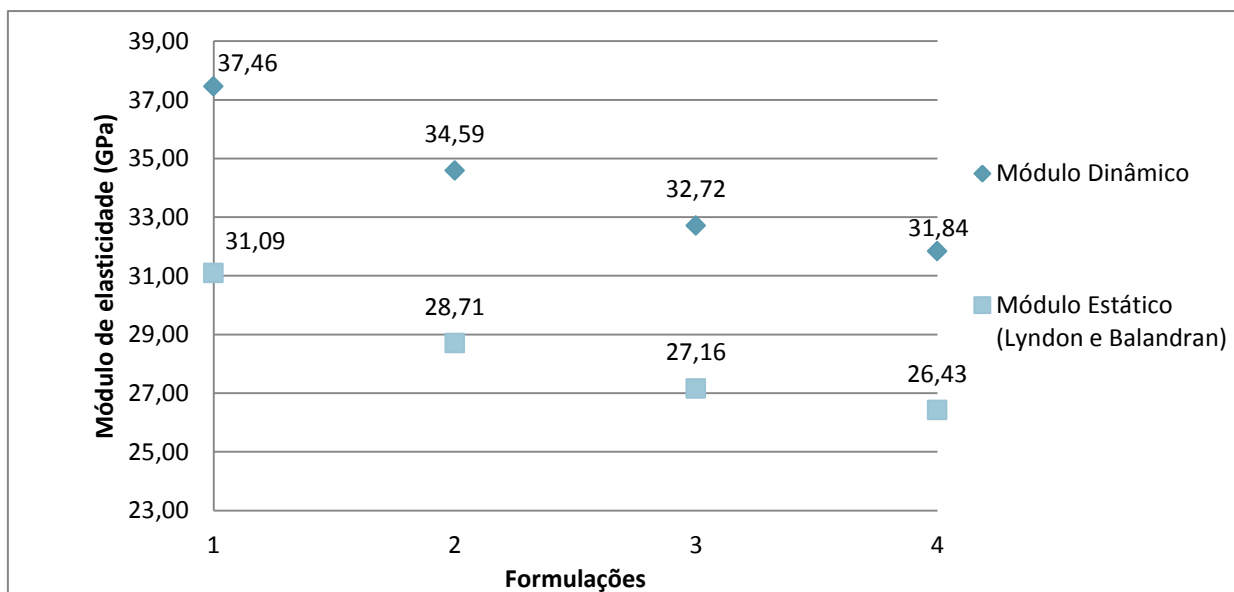
Tabela 11 – Resultados do ensaio de excitação por impulso.

Amostra	$E_{c,d}$ (GPa)	$E_{c,d}$ (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
F1-1	39,6385	37,46	2,00	5,33%
F1-2	37,0358			
F1-3	35,7170			
F2-1	37,5285	34,59	4,15	12,01%
F2-2	31,6554			
F2-3	18,8546			
F3-1	32,2827	32,72	0,61	1,88%
F3-2	33,1527			
F3-3	27,3660			
F4-1	31,3659	31,84	0,85	2,68%
F4-2	32,8233			
F4-3	31,3262			

Fonte: O Autor (2018).

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), quando o ensaio de módulo de elasticidade não é feito, seu valor pode ser calculado, de modo que foi obtido 30,67 GPa referente ao módulo de elasticidade estático inicial. Logo, para a formulação F4 esperava-se obter um valor próximo. Todavia, foi preciso primeiro converter os valores referentes ao módulo estático dinâmico para o módulo de elasticidade estático utilizando-se a formulação de Lyndon e Baladran (1986), conforme apresentado anteriormente, sendo os resultados obtidos observados na Figura 26.

Figura 26 – Módulo estático e dinâmico para formulações analisadas.



Fonte: O Autor (2018).

A partir da análise dos resultados, notou-se uma tendência para a redução dos módulos de elasticidade conforme o aumento da adição de fibra de Carbono. Logo, a formulação que obteve o maior valor de E_c foi a F1, com um valor de 31,09 GPa, enquanto a formulação que apresentou o menor valor para o módulo estático foi a formulação referência (F4) com um valor de 26,43 GPa, sendo a diferença entre as duas de 15,02%. Vale ressaltar que as formulações foram ensaiadas com diferentes idades. A formulação F1 estava com 39 dias, a F2 com 37 dias, a F3 com 35 dias e por fim a F4 com 32 dias no ensaio. Desta forma, observa-se um aumento do módulo conforme a maior idade de cura dos corpos de prova, porém este não pode ser afirmado como motivo principal ao fato observado já que as idades estavam muito próximas. Observa-se também, novamente a influencia da fibra, quanto maior seu teor de adição menor o módulo obtido e dessa forma entra-se na questão levantada na seção anterior do estudo da aderência da fibra à matriz.

Além dos possíveis erros derivados do ensaio, isto é, por não ser recomendado em discos em tal aplicação, tem se os erros relativos as dimensões dos corpos de prova, e entende-se que a equação que correlaciona o módulo dinâmico com o módulo estático de Lyndon e Baladran (1886) por se tratar de uma equação geral para diferentes tipos de concreto também possa participar de uma parcela do erro.

Logo, os resultados para o módulo estático tangente inicial obtidos continham três possíveis fontes de erros. De fato, isto se verificou quando se comparou com o resultado que esperava-se obter segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) na falta de ensaios. Considerando que

a equação apresentada na norma seja de fato uma referência a seguir em projetos, o erro utilizando o ensaio de excitação por impulso e a equação de Lyndon e Baladran (1986) para correlacionar foi de 13,84% para o concreto referência. Já em relação aos concretos com adição não é possível fazer essa comparação, pois a NBR 6118 (ABNT, 2014) não apresenta nenhuma equação específica para módulo de elasticidade de concretos com adição de fibras.

4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE, E POROSIDADE ABERTA

Os ensaios desse item são de caráter físico diferente dos apresentados até agora, que eram mecânicos. Todavia, a absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta são parâmetros que estão interligados com parâmetros mecânicos.

Desta forma, para os resultados obtidos nesses ensaios, tentou-se relacionar com os resultados obtidos nos ensaios anteriores, pois conforme Neville (2017), a porosidade está diretamente conectada à resistência a compressão, por exemplo.

Primeiramente é apresentada a Tabela 12 com todos os resultados obtidos para esses três parâmetros. Com os resultados, tentou-se correlacionar com os resultados dos outros ensaios. Porém não foi possível obter correlações e nem mesmo um entendimento do comportamento dos diferentes percentuais de adição de fibra ao concreto nos ensaios físicos realizados.

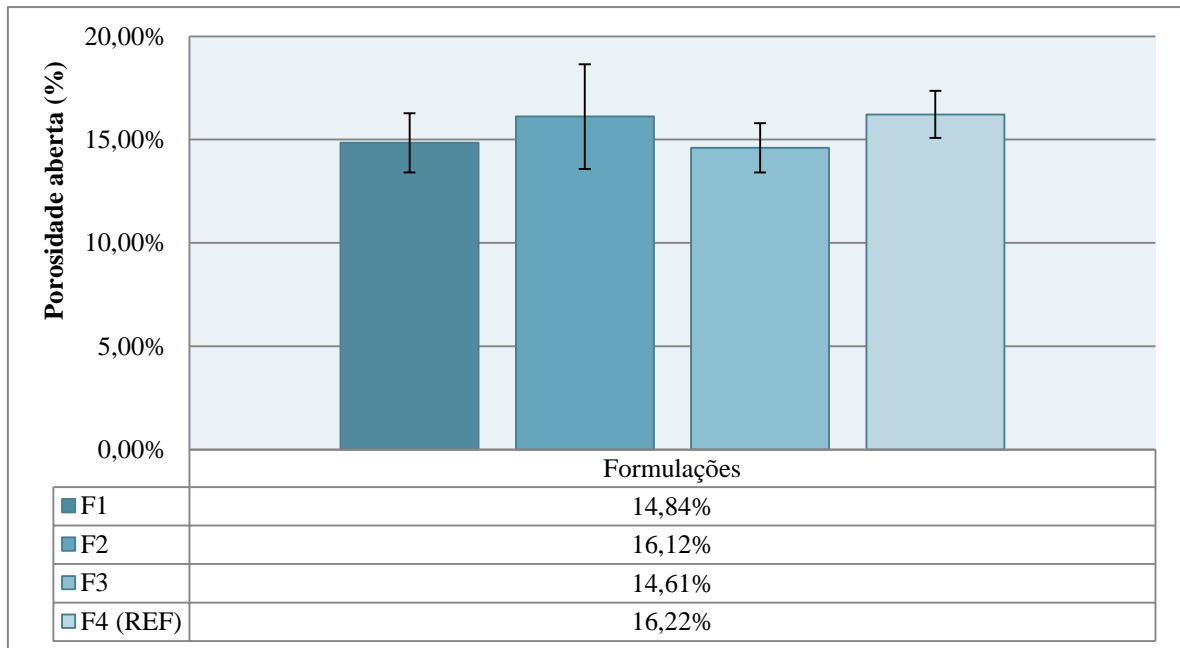
Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio para a densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta para os CP's.

Amostra	Densidade Aparente		Absorção de Água		Porosidade Aberta	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
F1	2,224	0,086	0,067	0,008	0,148	0,014
F2	2,164	0,101	0,075	0,016	0,161	0,025
F3	2,258	0,077	0,065	0,007	0,146	0,012
F4 (REF)	2,224	0,066	0,073	0,007	0,162	0,011

Fonte: O Autor (2018).

As Figuras 27, 28 e 29 apresentam os resultados obtidos de forma gráfica para a porosidade aberta, densidade aparente e a absorção de água, respectivamente

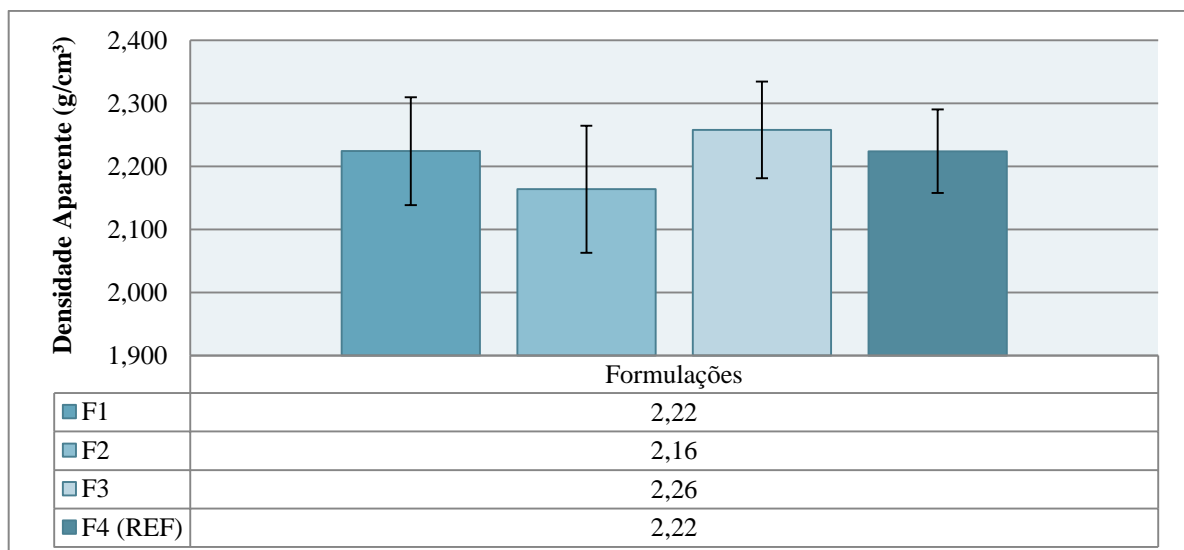
Figura 27 – Porosidade aberta média por formulação



Fonte: O Autor (2018).

Conforme Figura 27 a formulação com maior teor de porosidade aberta foi a referência com 16,22%, enquanto que a com menor teor foi a que apresentava 0,5% de FC com 14,61%.

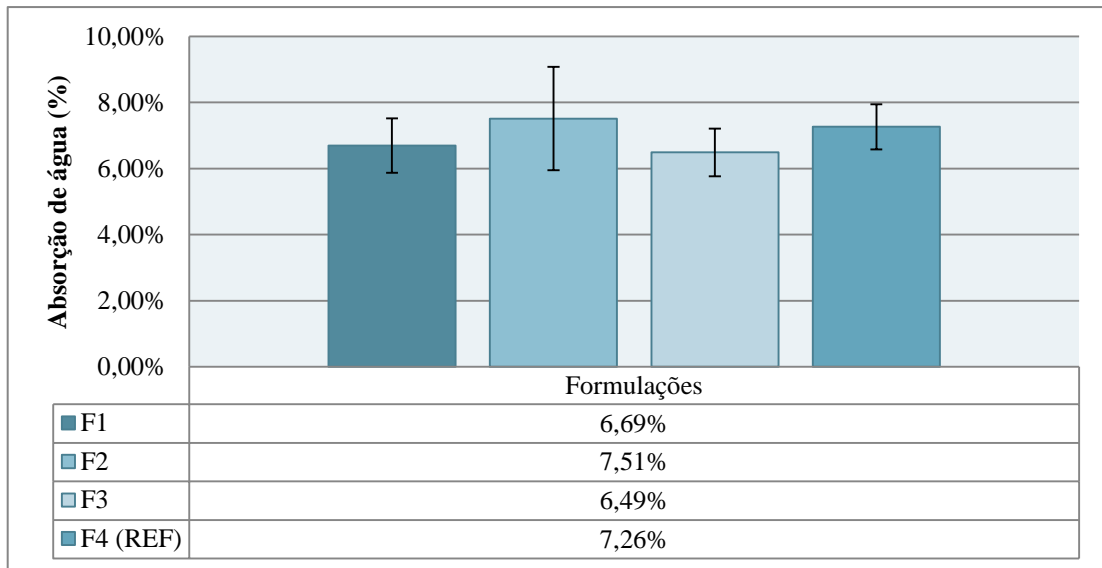
Figura 28 – Densidade aparente média por formulação.



Fonte: O Autor (2018).

Pela Figura 28 é possível observar que a formulação que obteve a maior densidade aparente foi a que apresentava 0,5% de FC (F3) com um valor de $2,26 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ enquanto que a formulação com a menor foi a com 0,3% de FC (F2) apresentando um valor de $2,16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Figura 29 – Absorção de água média por formulação.



Fonte: O Autor (2018).

Analisando a Figura 29, observa-se que a formulação que teve a maior absorção de água foi a F2 com 7,51%, enquanto a que teve a menor absorção foi a F3 com 6,49%.

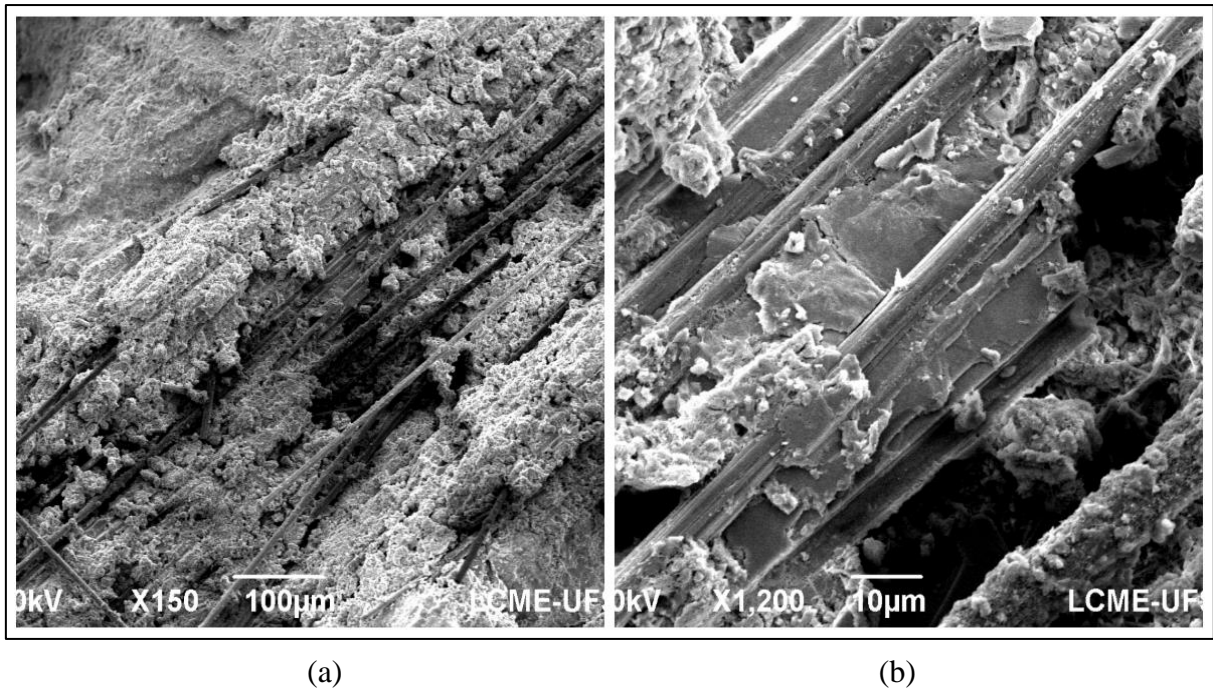
Uma possível causa para o não entendimento desses outros dois parâmetros está na metodologia do ensaio. Como o ensaio foi baseado em pequenos pedaços do corpo de prova, talvez os mesmos não descrevam o real comportamento do compósito, ou foram corpos de prova mal escolhidos. Outra questão seria uma melhor análise estatística, isto é, porque todas as afirmações referentes aos resultados das imagens não pode ser afirmadas com total certeza dado que teria que ser feito o estudo estatístico com o desvio padrão.

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Conforme comentado anteriormente, a realização do ensaio de microscopia pode apresentar uma grande contribuição no entendimento dos outros ensaios realizados, como o de resistência à tração, por exemplo.

Desta forma, ao analisar as amostras focou-se nas zonas de interface fibra de carbono e concreto para verificação da aderência e vazios. Notou-se que na maioria dos corpos de prova as fibras estavam aglomeradas em regiões específicas, e não dispersas sob toda a região analisada, como mostrado na Figura 30-a e Figura 30-b, a primeira com um aumento de 150 vezes e a segunda com um aumento de 1200 vezes. A Figura é referente a uma amostra da formulação 3, contendo 0,5% de FC.

Figura 30 – Zona de interface fibra de carbono e concreto.

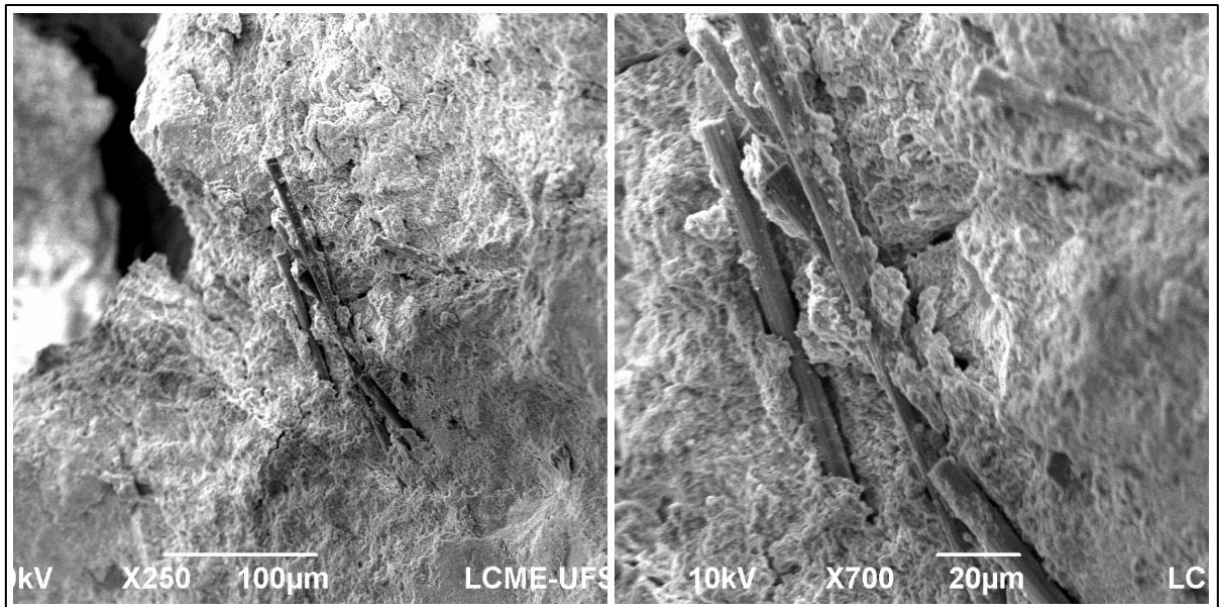


Fonte: O Autor (2018).

Todavia, a Figura 31 mostra uma região em que a fibra de carbono não se encontra tão aglomerada quando comparada com a Figura 30, e mais facilmente visualizada a aderência da FC a pasta de cimento. Os aumentos estão na ordem de 250 e 700 vezes, respectivamente. Porém vale ressaltar que tal Figura é referente a uma amostra da formulação 1 contendo 0,1% de FC.

Desta forma, observa-se que as regiões em que a fibra está aglomerada em maior quantidade foram regiões com mais vazios deixados e dificuldade da aderência da FC ao concreto e essa condição foi dada em função da formulação F3 apresentar maior teor de fibra e logo maior tendência da aglomeração da mesma, em contrapartida, as regiões com menores quantidades de FC foram as regiões com menores quantidades de vazios e com melhor aderência das fibras ao concreto e essa condição foi dada em função da formulação F1 apresentar menor teor de fibra e assim menor tendência de aglomeração das mesmas.

Figura 31 – Aderência fibra de carbono e concreto.



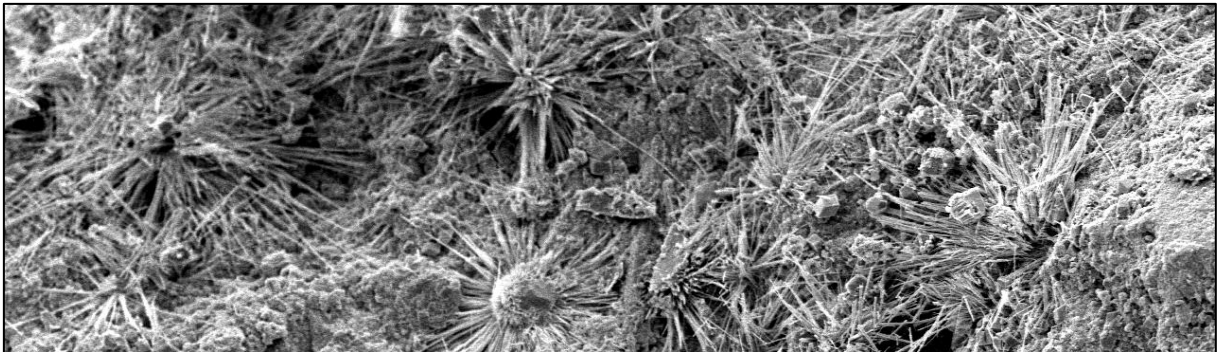
(a)

(b)

Fonte: O Autor (2018).

Na Figura 32 notam-se os cristais de etringita. O aumento utilizado é de 250 vezes na Figura apresentada.

Figura 32 – Presença de etringita.

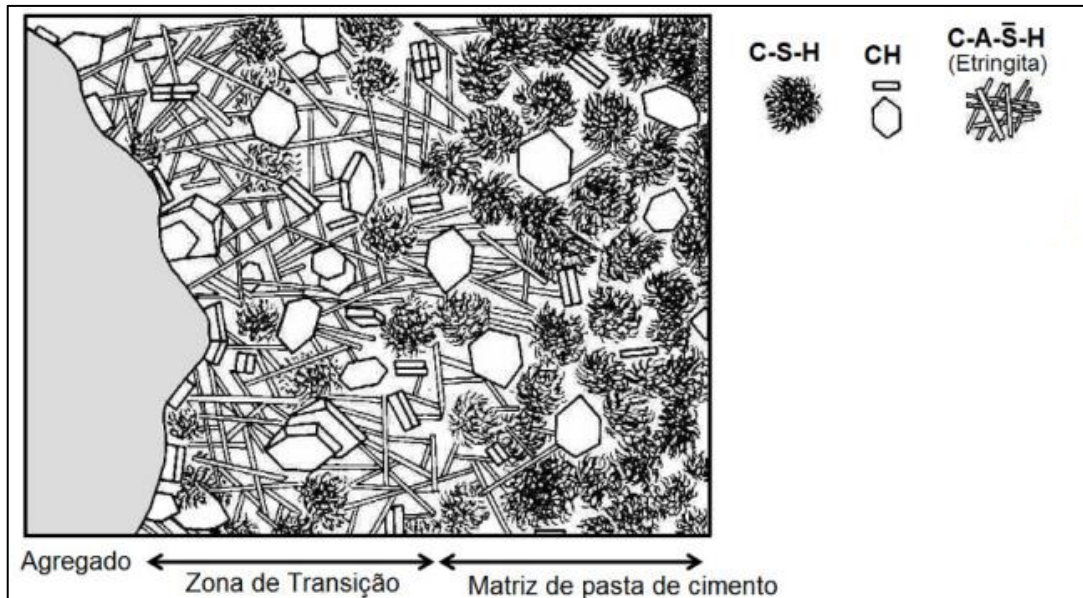


Fonte: O Autor (2018).

No estudo da microestrutura do concreto, três fases são de grande importância: agregado, matriz da pasta de cimento e uma interface bem definida entre essas, denominada interface pasta agregado ou Zona de Transição (ZT). A interface é o ponto mais importante no estudo, pois essa zona é o ponto fraco do concreto em relação à sua resistência mecânica (DUART, 2008). Freitas Jr. (2013) complementa que as rupturas iniciam na ZT, e que a baixa resistência mecânica da ZT é dada em função da concentração de etringita (cristais grandes e

porosos com baixa resistência mecânica), como pode ser observada na representação da Figura 33 e que são visíveis na Figura 32.

Figura 33 – Zona de Transição com presença de Etringita.



Fonte: Metha e Monteiro (2008).

Conforme Melo (2010), a etringita é um dos produtos cristalinos resultantes da hidratação do cimento Portland. Normalmente, ela se forma nas primeiras idades (etringita primária). Entretanto, eventualmente poderá vir a se formar ou recristalizar em materiais cimentícios endurecidos (etringita tardia) quando, sob condições propícias de temperatura, umidade e alcalinidade, são disponibilizados sulfatos, aluminatos e água em concentrações adequadas para promover as reações. Neste caso, ela pode causar deterioração da matriz cimentícia se a quantidade ou tamanho dos cristais formados forem suficientes para provocar pressão local e expansão. Por isso, a sua formação em pastas, argamassa ou concretos endurecidos poderá ter efeito deletério.

4.6 QUANTITATIVOS E ORÇAMENTAÇÃO

Primeiramente definiram-se os quantitativos para em seguida orçar o valor de cada formulação, por exemplo, e verificar a diferença entre elas. Na Tabela 13 é possível observar na primeira coluna os materiais utilizados no trabalho, em que unidade de medida são vendidos e então seu custo por unidade.

É possível observar ainda na quarta coluna o consumo dos materiais, sendo que a diferença entre as fibras de carbono é respectivamente seu diferente consumo em cada formulação, e por fim o custo total que trata-se do custo unitário multiplicado pelo consumo de material, ressalta-se que foram utilizadas mais casas decimais do que a moeda brasileira apenas para verificar principalmente a diferença entre o custo das fibras de carbono para as diferentes formulações.

Tabela 13 – Quantitativos.

Materiais	Unidade	Custo	Consumo	Custo Total (R\$)
Cimento CPV - ARI	kg	0,68	0,6885	0,4668
Brita 1	m ³	90,95	0,0013	0,1160
Areia Média	m ³	80,00	0,0009	0,0716
Fibra de Carbono (F1)	m ²	160,00	1,27235E-06	0,0002
Fibra de Carbono (F2)	m ²	160,00	3,81704E-06	0,0006
Fibra de Carbono (F3)	m ²	160,00	6,36173E-06	0,0010

Fonte: O Autor (2018).

Após essa tabela inicial, elaborou-se uma segunda (Tabela 14) contendo a orçamentação por de cada formulação executada, primeiramente referente a apenas um corpo de prova, em seguida o custo total, refere-se ao custo total do que foi usado no trabalho, referente à 60 corpos de prova. Por fim, sabendo quanto foi usado em massa de cada material para os 60 corpos de prova, fez-se o cálculo do preço por quilograma de cada formulação.

Tabela 14 – Orçamento das formulações.

FORMULAÇÕES	Custo (R\$/corpo de prova)	Custo Total (R\$)	(R\$/kg)
F1	0,6547	39,28	0,1722892
F2	0,6551	39,31	0,1723964
F3	0,6555	39,33	0,1725035
F4 (REF)	0,6545	39,27	0,1722356

Fonte: O Autor (2018).

Percebeu-se então uma diferença de valores no custo total, porém na casa centesimal, logo a fim de verificar essa diferença de uma melhor forma, traduziu-se essa diferença para porcentagem e dessa forma observa-se que a formulação 1 em relação a formulação 4 (referência) apresenta um aumento de 0,03%, a formulação 2 em relação a referência um aumento de 0,09% e a formulação 3 em relação a referência 0,16%.

5 CONCLUSÕES

Os objetivos principais dessa pesquisa foram alcançados, os quais eram o estudo da melhoria das propriedades mecânicas, o entendimento das propriedades físicas e a análise morfológica utilizando MEV.

Os custos envolvidos para produção do concreto com adição de fibra de carbono, representaram um acréscimo de 0,03%, 0,09% e 0,16% dos custos totais comparados ao concreto referência, para as formulações um, dois e três, respectivamente.

Contrapondo-se aos custos envolvidos, a resistência à compressão do compósito reduziu quando comparada ao concreto referência, como esperado baseado nas afirmações de Chung (2012) e diferenciando-se das informações levantadas no trabalho de Muley et al. (2015), que era similar ao trabalho aqui proposto, porém com menor comprimento e diferente tipo de fibra de carbono, além da menor relação a/c, que tendem a diferenciar bastante os resultados. A porcentagem de adição que apresentou a maior resistência à compressão foi a de 0,5% de fibra de carbono, com 32,39 MPa aos 7 dias de cura, porém com um comportamento de perda de resistência ao longo dos dias de cura. Isto pode ter ocorrido devido ao fato de os corpos de prova de mesma formulação não terem sido feitos todos em uma betonada para o rompimento em diferentes idades, aumentando desta maneira as chances de desvio padrão entre as amostras de mesma formulação. A única formulação, além da referência que apresentou um comportamento regular de ganho de resistência foi à formulação contendo 0,1% de FC.

Em relação aos resultados obtidos na resistência à tração, a F1 apresentou um ganho de 12,80%, a F2 um ganho de 3,28% e a F3 um decréscimo de 10,50% em relação ao concreto referência (2,86 MPa). As reduções da resistência a tração conforme o aumento da porcentagem de adição da FC podem ser explicadas com a ajuda do ensaio de MEV, onde a formulação com maior porcentagem de FC tem tendência a acumular as fibras em maiores quantidades e em mais regiões no interior do corpo de prova, desta forma aumentando os vazios e diminuindo a aderência.

O módulo de elasticidade obtido por ensaio dinâmico, conforme ASTM E-1876 (2015) não é recomendado em corpos de prova com geometria de discos quando está se analisando um material compósito reforçado por fibras. Logo, além dos erros derivados do ensaio, tiveram-se o erro das dimensões dos corpos de prova, e possivelmente da equação que correlaciona o módulo dinâmico com o módulo estático de Lyndon e Baladran (1886). A diferença em relação ao valor obtido da Equação (6) foi de 13,84% para o concreto referência,

já em relação ao concreto com adição não é possível definir, pois a NBR 6118 (ABNT, 2014) não apresenta nenhuma equação para esse tipo de compósito. Notou-se a diminuição do módulo conforme maior adição de fibra dado possivelmente pela maior probabilidade de vazios gerados e pior aderência.

Com relação aos índices físicos não indicam nenhum comportamento previsto e para sua análise torna-se necessário realizar novos ensaios para verificar a validade dos mesmos ou uma análise de variância.

Por fim, mesmo não sendo realizado nenhum ensaio que pudesse indicar índices de *trabalhabilidade*, percebeu-se durante a execução de todos os corpos de prova a diminuição desta propriedade conforme o aumento da adição de FC, e notou-se de maneira prática que o adensamento mecânico teve que ser implementado para as formulações contendo 0,3 e 0,5% de fibra de carbono.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, propõem-se os seguintes estudos:

- Analisar a influência de diferentes comprimentos de fibra de carbono;
- Comparar os resultados/custos para uso de diferentes tipos de fibra;
- Comparar os resultados de módulo de elasticidade em ensaios estáticos e dinâmicos;
- Avaliar o módulo de elasticidade para os corpos de prova com a mesma idade;
- Determinar os resultados de módulo de elasticidade para corpos de prova prismáticos e comparar com os resultados obtidos com corpos de prova na forma de disco;
- Comparar os resultados de resistência à tração pelo ensaio de flexão;
- Estudar o uso de diferentes tipos de fibra no mesmo concreto.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Sílvio Martins. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. 213 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: < <https://goo.gl/SedtxS> >. Acesso em: 04 jun. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken: ASTM International, 2015. 17 p.

AQUINO, Regina Coeli Martins Paes. **Desenvolvimento de compósitos de fibras de piaçava da espécie attalea funifera mart e matriz de resina poliéster**. 2003. 151 f. Tese (Doutorado) – em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, 2003.

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do Cimento Portland. **Boletim técnico**, São Paulo, n.106, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT 2007, 2007. 9 p.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT 2008, 2008. 16 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT 2009, 2009a. 9 p.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT 2009, 2009b. 11 p.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT 2014, 2014. 238 p.

_____. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT 2015, 2015a. 9 p.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Concreto com fibras**. Bauru: Vídeo, 2017. 61 slides, color. Disponível em: <www.feb.unesp.br/pbastos/c.especiais/Concreto%20Fibras.ppt>. Acesso em: 30 set. 2017.

BEBER, Andrei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2013. 289 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-

graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2. ed. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2007. 601 p.

BERTHELOT, Jean-marie. **Composite materials: Mechanical behavior and structural analysis**. New York: Springer, 1999. 645 p.

BUCHAIM, Roberto. **A influência da não-linearidade física do concreto armado na rigidez à flexão e na capacidade de rotação plástica**. 2001. 259 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-02102001-155513/pt-br.php>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

CHUNG, Deborah D. L. **Carbon fiber composites**. Newton: Butterworth-heinemann, 2012. 215 p.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2007. 60 p.

DIÓGENES, H. J. F. et al. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 5, p.803-813, 28 nov. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/riem/v4n5/07.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DUART, Marcelo Adriano. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FELIPE, Renata Carla T. S. **Materiais compostos**. Rio Grande do Norte, 2008. (Apostila).

FORTES, Adriano Silva. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. 2000. 224 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FREITAS, Renan Pereira. **Controle de qualidade em concreto endurecido: Ensaios mecânicos**. 2012. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/engenhariacivil/files/2012/10/TFC-FIM.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

FREITAS JUNIOR, José de Almendra. **Materiais de Construção**. Curitiba: Vídeo, 2013. 74 slides, color. Disponível em: <<https://goo.gl/Zqc65h>>. Acesso em: 30 set. 2017.

GAY, Daniel. **Composite materials: Design and applications**. 3. ed. Boca Raton: Crc Press, 2015. 598 p.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 2006.

GONÇALVES, Luzan Beiriz et al. Análise da influência de adição de sílica ativa na resistência à compressão em concretos. **Cadernos de Graduação: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 3, n. 3, p.41-53, 2016.

HUMMEL, Alfred. **Prontuario Del Hormigon**. 2. ed. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1966.

INAGAKI, Michio et al. **Advanced materials science and engineering of carbon**. Pequim: Butterworth-heinemann, 2013.

KAW, Autar K.. **Mechanics of composite materials**. Boca Raton: Crc Press, 1997. 331 p.

KHALI, Wasan I.; ABDULRAZAQ, Akar. Mechanical properties of high performance carbon fiber concrete. **Eng. & Tech. Journal**, Baghdad, v. 29, n. 5, p.906-924, 2011.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. R. L. Estudo da influência da substituição de cimento portland por metacaulim em concretos. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, n. 419, 20 p., 2005.

LA SERNA, H.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. p. 602-635. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais>>. Acesso em: 11 out. 2017.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 336 p.

LIMA, Caio Ivson Vasconcelos et al. CONCRETO E SUAS INOVAÇÕES. **Cadernos de Graduação**, Maceió, v. 1, n. 1, p.31-40, maio 2014.

LYNDON, F. D.; BALADRAN, R. V.. **Some observations on elastic properties of plain concrete**, **Cement and Concrete Research**, v.16, No.3, pp. 314-24. 1986.

LOPES JUNIOR, Genilson de Souza. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas de um compósito cerâmico reforçado com produtos da combustão do carvão mineral**. 2011. 56 f. Monografia (Especialização) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <<http://www.repositoriobib.ufc.br/000020/00002039.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2018.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M.. **CONCRETO: MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MELO, Sandra Kurotusch de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MILAŠINOVIĆ, D.D; GOLEŠ, D. Rheological-dynamical parameters for concrete using non-destructive testing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 5., 2017, Subotica. Anais... Subotica: Conference Proceedings International Conference, 2017. 10 p. Disponível em: <<http://www.gf.uns.ac.rs/~zbornik/doc/NS2017.028.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

MULEY, Prashant; VARPE, Shrikant; RALWANI, Rahul. Chopped Carbon Fibers Innovative Material for Enhancement of Concrete Performances. **International Journal Of Scientific Engineering And Applied Science**, Mumbai, v. 1, n. 4, p.164-169, jul. 2015. Disponível em: <<http://ijseas.com/volume1/v1i4/ijseas20150422.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2017.

NASSEH, Jorge. **Barcos: métodos avançados de construção em composites**. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2007. Disponível em: <goo.gl/A7tixB>. Acesso em: 10 set. 2017.

_____. **Manual de Construção de Barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh Barracuda Advanced Composites, 2011. 660 p.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.

Pacheco et al. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC), 56, 2014, Natal. Anais...Natal: IBRACON, 2014. 14 p. Disponível em: <<http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/269.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2018.

PESSÔA, J.R.C. et al. Estudo de Propriedades do Concreto através de Microtomografia por Raio X e Scanner Comercial. **Littera Docente & Discente**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, out. 2012.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 216 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 4. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2011. 260 p.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Retração do concreto**. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2014. 151 p.

ROSSETTO, Matheus. **Desenvolvimento de geopolímeros com a incorporação do lodo de estações tratamento de água**. 2017. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

Santos et al. Relações do módulo de elasticidade dinâmico, estático e resistência à compressão do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. Anais... Minas Gerais: IBRACON, 2009. 10 p. Disponível em: <<https://goo.gl/MyeQYb>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

SANTOS, Altair. **Para cada tipo de concreto, um tipo de brita**. 2012. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/para-cada-tipo-de-concreto-um-tipo-de-brita/>>. Acesso em: 13 maio. 2018.

SANTOS, S.H.C.; CERUTTI, R.M. Impactos no projeto estrutural da versão 2014 da norma brasileira ABNT NBR 6118. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 4, p.557-566, ago. 2015.

SILVA, Fabrício Martins. **Análise experimental das relações do módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto em relação à idade**. 2007. 65 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Departamento Acadêmico de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<https://goo.gl/7zcCLf>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

SILVA, Renilton do Nascimento. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho**. 2010. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2010.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre: Amgh, 2012. 707 p.1

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 12.