



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA - CCEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS

ANGELA MARIA DE MENEZES SANTOS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE QUITOSANA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO CIMENTÍCIO**

Recife

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA - CCEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS

ANGELA MARIA DE MENEZES SANTOS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE QUITOSANA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO CIMENTÍCIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Materiais Não Metálicos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Patrícia Maria de Albuquerque Farias.

RECIFE

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Arabelly Ascoli CRB4-2068

S237a Santos, Angela Maria de Menezes
Avaliação da influência da adição de quitosana nas propriedades mecânicas de um compósito cimentício / Angela Maria de Menezes Santos. – 2019.
75 f.: il., fig., tab.

Orientadora: Patrícia Maria de Albuquerque Farias
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCEN. Ciência de Materiais. Recife, 2019.
Inclui referências e anexos.

1. Compósito. 2. Concreto. 3. Cimento Portland. 4. Quitosana.
I. Farias, Patrícia Maria de Albuquerque (orientadora). II. Título.

620.11 CDD (22. ed.) UFPE-FQ 2019-59

ANGELA MARIA DE MENEZES SANTOS

**“AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE QUITOSANA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO CIMENTÍCIO”**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em
Ciência de Materiais da Universidade Federal de
Pernambuco como requisito para obtenção do título
de Mestre.

Aprovado em 13/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Patrícia Maria Albuquerque de Farias (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) / Escola Politécnica de Pernambuco
(POLI/UPE)

Prof. Dr. Severino Alves Júnior
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Recife

2019

Dedico este trabalho:

Ao meu Deus.

Aos meus pais, Damião e Valdizia.

Aos meus irmãos, Rose, Alexson, Dayana,

Alessandra e Lígia.

À minha sobrinha, Ana Heloíse.

À Família Cunha de Menezes.

Aos meus queridos amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a *Deus*, autor da minha vida e minha fortaleza, pela disposição, saúde, pela capacidade que me concedeu para que eu pudesse compor este trabalho e por todas as conquistas alcançadas.

Aos meus amados pais, *Damião e Valdizia*, os quais sempre me apoiaram com todo o carinho, amor, dedicação e esforço. Pai e mãe muito obrigada!

Aos meus queridos irmãos, *Rose, Alexson, Dayana, Alessandra e Lígia*, pelo apoio, companheirismo, carinho, amizade e torcida; e à minha linda sobrinha, *Ana Heloyse*.

À Família *Cunha de Menezes (Tia Antônia, Tio Cilas, Quelita, Cilinhas e Aninha)*, por me acolher com tanto carinho; especialmente à *Tia Antônia*, ao *Tio Cilas e Quelita*, por todo o cuidado e amor com minha pessoa.

À minha orientadora *Prof^a Dr^a Patricia Maria de Albuquerque Farias*, à qual sou grata pela confiança e paciência durante a elaboração deste trabalho. Obrigada pelos ensinamentos durante esta caminhada e amizade!

Ao co-orientador externo *João Ricardo Pereira Silva*, por seus ensinamentos, por sua dedicação na elaboração deste trabalho, pela amizade e pela ajuda a superar as dificuldades.

Ao *Prof. Dr. Eduardo Falcão*, por seus ensinamentos, apoio e amizade, bem como ao seu grupo de pesquisa.

Ao *Prof. Dr. Eduardo Padrón Hernández*, por sua colaboração.

Ao *Prof. Dr. Severino Alves Junior*, por sua contribuição e amizade.

Ao meu amigo *Janilson*, pela motivação, força e amizade ao longo desta jornada. E por sua ajuda com análise de infravermelho.

À minha querida amiga *Ana Candida de Almeida Prado*, pela motivação, incentivo, pelo apoio, ajuda e amizade.

Aos meus amigos queridos da UFCA, pela força, torcida e apoio: *Sheilla, Tereza, Josevaldo, Vanya, Samuel, Simone, Natália, Consuelo e Kerollayne*.

Aos meus queridos amigos e parceiros de caminhada, pela força, motivação e amizade: *Raelson, Leonardo, Ana Lígia, Jean Pierre, Batista, Italcly*.

Aos meus queridos colegas e amigos da UFPE, pela amizade e companheirismo: *Lhaira, Daiane, Danilo, Karina, Edielen, Ewerton, Shara, Laurertan, Sanderson, Ricardo Tadeu, Eriverton, Pedro, Lucas, Henrique, Karol, Maysa, Aluiz, Thiago, Simone, Adriana*.

Ao *Programa de Pós-graduação em Ciências de Materiais (PPGMTR)*.

À *Universidade Federal de Pernambuco*, pela concessão deste sonho.

À indústria *Cimento Elizabeth*, pelo fornecimento de Cimento Portland CP V.

Ao SENAI de Água Fria, Recife – PE pela disponibilidade de uso de laboratórios para preparação e caracterização mecânica das amostras.

Ao técnico de laboratório no SENAI, *Felipe Cleyton* pela contribuição com a produção e ensaios das amostras.

Ao técnico de laboratório de solos do CTG, *Gutenberg*, por suas contribuições.

Ao técnico de laboratório de MEV do Departamento de Física, *Sérgio*, pela contribuição com as análises de micrografias.

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho.

“O temor do SENHOR é o princípio do saber”
(BÍBLIA, Provérbios 1,7).

RESUMO

O concreto de cimento portland é um compósito cerâmico, que se constitui no material de construção mais usado mundialmente, estima-se um consumo de 19 bilhões de toneladas métricas por ano. Todavia, esse material é extremamente frágil, assim como a maioria das cerâmicas; o limite de resistência à tração do concreto é aproximadamente 10 vezes menor do que a sua resistência à compressão. Estudos vêm mostrando o potencial de aplicação de quitosana em materiais cimentícios. Esse biopolímero é derivado da desacetilação da quitina, segundo polissacarídeo natural mais abundante, proveniente principalmente de carapaças de crustáceos. Nesse contexto, o presente trabalho visou o desenvolvimento de um compósito de concreto composto por Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI) contendo quitosana e à avaliação da influência da adição desse biopolímero nas propriedades mecânicas do concreto. Inicialmente, foram formulados e produzidos corpos-de-prova de amostras de argamassa com percentuais de quitosana (0% a 1%). Posteriormente, foi realizado teste de resistência mecânica à compressão axial. Depois disso, foram formulados e produzidos corpos-de-prova de amostras de concreto (padrão e com 0,1% de quitosana); posteriormente foi realizada a avaliação das propriedades mecânicas desses corpos-de-prova para o compósito e o biopolímero, bem como a avaliação das fases formadas, as quais foram investigadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), acoplada à espectroscopia de raios - X por dispersão de energia (EDS), difratometria de raios-X (DRX) e Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os resultados mostraram-se favoráveis à adição do biopolímero quitosana (0,1%), sendo positivos para o melhoramento das propriedades mecânicas (resistência mecânica à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade). Assim, conforme esses resultados indicam, a formulação de concretos à base de adição de quitosana ao cimento podem representar significativos ganhos de qualidade para o concreto de cimento Portland. Além disso, inserir esse biopolímero no setor de construção civil potencialmente pode trazer benefícios outros, tais como a redução de impacto ambiental, devido ao uso de matérias-primas de fonte renovável.

Palavras-Chave: Compósito. Concreto. Cimento Portland. Quitosana. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Portland cement concrete is a ceramic composite, which is the most commonly used construction material worldwide, estimated to consume 19 billion metric tons per year. However, this material is extremely fragile, like most ceramics; the tensile strength limit of the concrete is approximately 10 times lower than its compressive strength. Studies have shown the potential of chitosan application in cementitious materials. This biopolymer is derived from the deacetylation of chitin, according to the most abundant natural polysaccharide, mainly from crustacean shells. In this context, the present work aimed at the development of a concrete composite composed of Portland cement of high initial resistance (CP V - ARI) containing chitosan and the evaluation of the influence of the addition of this biopolymer on the mechanical properties of the concrete. Initially, specimens of mortar samples with percentages of chitosan (0% to 1%) were formulated and produced. Subsequently, a mechanical strength test was performed to axial compression. After that, specimens of concrete samples (standard and 0.1% chitosan) were formulated and produced; the evaluation of the mechanical properties of these specimens was carried out for the composite and the biopolymer, as well as the evaluation of the formed phases, which were investigated by scanning electron microscopy (SEM), coupled to X - ray diffraction (EDS), X - ray diffractometry (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The results were favorable to the addition of the chitosan biopolymer (0.1%), being positive for the improvement of the mechanical properties (mechanical resistance to compression, tensile strength and modulus of elasticity). Thus, as these results indicate, the formulation of chitosan-based concrete to cement may represent significant gains in quality for Portland cement concrete. In addition, inserting this biopolymer into the construction industry could potentially bring other benefits, such as reduced environmental impact, due to the use of renewable source materials.

Key words: Composite. Concrete. Portland Cement. Chitosan. Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de cimento portland a seco.....	24
Figura 2 - Estutura química da quitina e da quitosana.	30
Figura 3 - Matérias-primas usadas no trabalho: A) areia (agregado miúdo); B) brita (agregado graúdo); C) cimento CP V (aglomerante); D) aditivo superplastificante; e) biopolímero (quitosana).....	34
Figura 4 - Fluxograma das etapas da metodologia do trabalho.....	36
Figura 5 - Corpos-de-prova da amostra padrão e com adição de quitosana.....	38
Figura 6 - Corpos-de-prova da amostra padrão e com adição de quitosana após capeamento com enxofre.....	39
Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão axial dos corpos-de-prova, aos 28 dias de idade.	39
Figura 8 - Misturador mecânico (betoneira) usado na produção dos corpos-de-prova de concretos.....	41
Figura 9 - Corpos-de-prova de concreto em estado fresco.....	42
Figura 10 - Máquina de ensaios mecânicos emic (modelo pc200cs), capacidade de 2000 KN.	43
Figura 11 - Ensaio de resistência mecânica à compressão axial das amostras de concreto (padrão e 0,1% de quitosana) após a ruptura com 28 dias de idade.	44
Figura 12 - Ensaio de resistência mecânica à tração por compressão diametral das amostras de concreto (padrão e 0,1% de quitosana) aos 28 dias de idade.....	46
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo (areia).	50
Figura 14 - Curva granulométrica do agregado graúdo (brita).....	51
Figura 15 - Resistência mecânica à compressão axial do concreto em relação ao teor de quitosana.	54
Figura 16 - Resistência mecânica à tração por compressão diametral em relação ao teor de quitosana	56
Figura 17 - Módulo de elasticidade do concreto em relação ao teor de quitosana.....	58
Figura 18 - Micrografia eletrônica da amostra de concreto padrão (0% de quitosana), com aumento de 4000 X. A) etrengita; B) C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e C) portlandita	59

Figura 19 - Micrografia eletrônica da amostra de concreto com adição de 0,1% de quitosana, com aumento de 4000 X. A) etrengita; B) vazios.	60
Figura 20 - Espectro do eds da amostra de quitosana.	61
Figura 21 - Espectro do eds da amostra de concreto padrão.	61
Figura 22 - Espectro do eds da amostra de concreto com adição de 0,1% de quitosana.	62
Figura 23 - Difractogramas das amostras de quitosana e concreto (padrão e com adição de 0,1% de quitosana).	63
Figura 24 - Espectro de absorção no infravermelho das amostras de concreto (padrão e com adição de 0,1% de quitosana).	64
Figura 25 - Resistência mecânica à compressão em relação à adição de quitosana.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento portland.....	24
Tabela 2 - Composição das amostras de concreto.....	41
Tabela 3 - Composição granulométrica da areia.	50
Tabela 4 - Composição granulométrica da brita.....	51
Tabela 5 - Principais características dos agregados utilizados para produção das amostras de concreto.....	52
Tabela 6 - Resistência mecânica à compressão com a adição de quitosana.....	53
Tabela 7 - Resistência mecânica à compressão axial em relação ao teor de quitosana.....	54
Tabela 8 - Resistência mecânica à tração na compressão diametral em relação ao teor de quitosana.	56
Tabela 9 - Módulo de elasticidade em relação ao teor de quitosana.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição dos tipos de cimento portland.	27
Quadro 2 - Métodos de ensaios e caracterizações dos agregados.	37
Quadro 3 - Resumo dos ensaios mecânicos realizados e representação das normas de seus métodos empregados.	42
Quadro 4 - Principais características do cimento portland (ari-cp v) utilizado na produção das amostras.	52

LISTA DE ABREVIACOES

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	Relação gua/Cimento
CA(OH)₂	Hidróxido de Cálcio (Portlandita)
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CPS	Corpos-de-Prova
DRX	Difração de raios -X
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy - Espectroscopia de Energia Dispersiva
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPA	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PH	Potencial Hidrogeniônico
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	19
1.2	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	20
1.2.1	Propriedades Mecânicas do Concreto de Cimento Portland.....	21
1.2.2	Cimento Portland	22
1.2.2.1	<i>Produção e composição de Cimento Portland.....</i>	22
1.2.2.2	<i>Hidratação do Cimento Portland.....</i>	25
1.2.2.3	<i>Tipos de Cimento Portland.....</i>	26
1.2.3	Agregados	28
1.2.4	Aditivos.....	29
1.3	QUITOSANA.....	30
1.3.1	Produção.....	31
1.3.2	Propriedades e aplicações	31
1.4	APLICAÇÃO DE QUITOSANA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	32
2	OBJETIVOS	33
2.1	OBJETIVO GERAL.....	33
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	34
3.1.1	Cimento (Aglomerante).....	34
3.1.2	Agregados	35
3.1.3	Biopolímero	35
3.1.4	Água de Amassamento	35
3.1.5	Aditivo Superplastificante	35
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.2.1	Caracterização dos Agregados	37
3.2.2	Caracterização do Cimento Portland (ARI-CP V).....	37

3.2.3	Produção dos Concretos.....	40
3.2.4	Caracterização Mecânica dos concretos.....	42
3.2.5	Análise de Microestrutura	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	49
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (ARI-CP V).....	52
4.2.1	Principais características do cimento portland.....	52
4.2.2	Resistência Mecânica à Compressão do Cimento Portland (ARI-CP V).....	53
4.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	53
4.3.1	Resistência Mecânica à Compressão Axial	53
4.3.2	Resistência Mecânica à Tração por Compressão Diametral	55
4.3.3	Módulo de Elasticidade	57
4.4	ANÁLISE DE MICROESTRUTURA DO CONCRETO	58
4.4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	58
4.4.2	Espectroscopia de raios - X por Dispersão de Energia (EDS).....	60
4.4.3	Difratometria de raios - X (DRX)	62
4.4.4	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	64
5	CONCLUSÕES	66
6	PERSPECTIVAS	68
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXO A - FICHA TÉCNICA DO CIMENTO PORTLAND CP V - ARI	74
	ANEXO B - RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COMPOSTA POR CIMENTO PORTLAND (CP V) COM ADIÇÕES DE QUITOSANA.....	75

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos representam uma geração de materiais em que cientistas e engenheiros têm combinado vários metais, cerâmicas e polímeros para produzir materiais com combinações de propriedades (CALLISTER, 2010).

O concreto é um tipo de compósito cerâmico; é o material de construção civil mais utilizado no mundo, de uso essencial na infraestrutura, principalmente devido à sua facilidade de uso (facilmente moldável e aplicável), boas propriedades mecânicas, durabilidade e especialmente devido ao seu baixo custo comparado a outros materiais de construção (MEYER, 2009). Estima-se que sua produção seja responsável por cerca da metade da extração total de recursos não renováveis do planeta, consumindo grandes quantidades de calcário, argila, areia, brita e combustíveis fósseis, a cada ano (BITTENCOURT, 2016).

O cimento é o aglutinante primário do concreto, sendo o segundo material mais utilizado, com produção anual de aproximadamente 600 milhões de toneladas (FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012). Todavia, os processos utilizados na produção de cimento atribuem um impacto negativo ao meio ambiente. Mundialmente, a produção desse material representa aproximadamente 5% das emissões globais de CO₂, que é um dos gases de efeito estufa que acelera o aquecimento global (HOSSEINI; SHAO; WHALEN, 2011).

Por outro lado, o concreto de Cimento Portland, como um material estrutural, tem algumas limitações e desvantagens, isto é, ele é relativamente fraco e extremamente frágil, assim como a maioria das cerâmicas; o seu limite de resistência à tração é aproximadamente 10 vezes menor do que a sua resistência à compressão (METHA; MONTEIRO, 2014; CALLISTER, 2010). Assim, normalmente, o concreto é reforçado com barras de aço. Contudo, sua baixa resistência à tração pode levar à formação de fissuras, que é um dos problemas mais destrutivos em aplicações de concreto, já que essas fissuras podem colocar em risco a durabilidade do concreto, podendo ocasionar à corrosão do reforço (WANG *et al.*, 1997). Uma alternativa de eliminar, ou melhorar essas inadequações pode ser, por exemplo, o uso de reforço e/ou a incorporação de aditivos. O reforço de concreto tem sido amplamente estudado, com tentativas de produzir materiais estruturais mais fortes, mais rígidos e mais resistentes através da adição de fibras de vidro, aço, carbono e materiais poliméricos (HARRIS, 1999).

Devido a esses fatos, nos últimos anos, pesquisadores continuamente estudam e criam alternativas no campo da construção civil, tanto novos métodos ou como materiais de construção são intensamente investigados a fim de encontrar uma melhor eficiência aliada à sustentabilidade, com menos impacto prejudicial ao meio ambiente (OLIVIA *et al.*, 2018).

Segundo Bezerra (2016), os polímeros organizam melhor a microestrutura de concreto, agem envolvendo os produtos hidratados do cimento Portland, proporcionando-lhes melhoria nas propriedades mecânicas. Eles propiciam a redução da permeabilidade, diminuição da quantidade de poros grandes, dificultam a propagação de fissuras, etc. Da mesma forma, os biopolímeros apresentam desempenho similar, buscando a melhor organização para microestrutura do concreto.

Os biopolímeros são polímeros sintetizados usando monômeros naturais provenientes de plantas ou outros organismos. Esses materiais têm ganhado bastante significância quanto ao seu uso, visto que, são uma classe de polímeros abundantes na natureza, gerados de fontes renováveis, e de baixo custo. (MIRANDA, *et al.*, 2012). Sua aplicação em misturas de concreto e argamassa, tem sido estudada intensivamente. Os biopolímeros como polissacarídeos, celulose, amido, quitina, quitosana, são totalmente sustentáveis e biodegradáveis (OLIVIA *et al.*, 2018).

A quitosana é um biopolímero, derivado da desacetilação da quitina que é o segundo polissacarídeo natural mais abundante, proveniente principalmente de carapaças de crustáceos (CHEN, LI, XU *et al.*, 2005). É um produto renovável, de baixo custo, biodegradável, de grande importância econômica e ambiental (AZEVEDO *et al.*, 2007). Estudos veem mostrando potencialidade de aplicação de quitosana em materiais cimentícios. A quitosana aumenta a viscosidade, reduz a porosidade e melhora a resistência de pastas de cimento portland (BEZERRA; FERREIRA; CASTRO-GOMES, 2011), e absorve metais pesados (LASHERAS-ZUBIATE *et al.*, 2012).

Neste contexto, o presente trabalho é justificado com base na hipótese de que a combinação de propriedades do biopolímero com concreto tem a finalidade de obter um composto sustentável, que poderá trazer um aumento na eficiência do produto final. Isto impactará na maior qualidade do produto, trazendo melhoria para o setor da construção civil, aliado a benefícios ambientais com a redução de impacto ambiental referente ao uso de matérias-primas não renováveis usadas na produção de concreto, além da utilização da quitosana que é uma fonte renovável de materiais provenientes de crustáceos residuais do setor alimentício. Nesta perspectiva, a proposta do presente trabalho consiste em produzir um

compósito de concreto composto por Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI) contendo Quitosana e avaliar sua influência em nas propriedades mecânicas.

1.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Há milênios, o homem já era ciente de que a combinação de materiais poderia ser vantajosa. No Egito, os Israelitas produziram tijolos compostos de argila reforçados com palha. Este é um dos primeiros exemplos de aplicação de materiais compósitos, em que alguns acreditam que a palha foi usada a fim de atenuar as rachaduras na argila após ficar seca (KAW, 2006).

Compósito é um material estrutural que consiste em dois ou mais constituintes combinados a um nível macroscópico e não são solúveis entre si; são constituídos por duas fases: fase matriz, material base em que é incorporada a fase reforço (CALLISTER JR., 2010; SUONG, 2009). Os materiais da fase matriz são geralmente contínuos e o material da fase reforço é disperso, podendo ter a forma de fibras, partículas ou flocos. As fases, matriz e dispersa e/ou reforço, são quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta (ASHBY, 2007; KAW, 2006).

A fase matriz tem a finalidade de proporcionar forma estrutural ao material, transferindo o esforço mecânico para a fase reforço, permitindo que esta fase possa agir isoladamente impedindo a propagação de trincas, e melhora o acabamento superficial (SUONG, 2009). Já a fase reforço, por sua vez, tem a função de suportar o esforço aplicado à matriz proporcionando resistência, rigidez, estabilidade térmica e também outras propriedades estruturais (MALLICK, 2007).

Considera-se um compósito, como qualquer material multifásico que exiba uma proporção de propriedades de ambas as fases constituintes (matriz, fase contínua, e reforço, fase dispersa), em que melhores combinações de propriedades são criadas através de uma combinação de dois ou mais materiais distintos, a saber, os metais, cerâmicas e polímeros (MALLICK, 2007). Suas propriedades estão funcionalmente relacionadas às propriedades das fases constituintes, suas quantidades relativas e a geometria (forma, tamanho, distribuição e orientação) da fase dispersa (CALLISTER JR., 2010).

A classificação de materiais compósitos consiste em três divisões principais: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais. Sendo que, geralmente, a classificação quanto ao tipo de material está relacionada ao material que constitui a fase matriz, isto é, um compósito cerâmico, polimérico ou metálico (MALLICK, 2007).

O concreto é um exemplo clássico de um material compósito do tipo cerâmico/cerâmico, é composto por partículas de areia e agregados de tamanhos graduados envolvidos em uma matriz de cimento Portland hidratado. Há vários anos, estes materiais são bem conhecidos e Cientistas de Materiais aprenderam a aperfeiçoar suas propriedades por meio do controle da sua microestrutura; isto é, a quantidade, a forma e a distribuição da ‘fase de reforço’ (HARRIS, 1999).

1.2 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O Concreto é um compósito muito usado na indústria da construção civil, estima-se que, mundialmente, o consumo de concreto seja da ordem de 19 bilhões de toneladas métricas por ano (BUCKNER, 2014; METHA; MONTEIRO, 2014).

Trata-se de um material construtivo amplamente disseminado, usado na construção de habitações, rodovias, pontes, usinas hidrelétricas e nucleares, e até em plataformas móveis de extração de petróleo (BITTENCOURT, 2014).

Segundo Metha e Monteiro (2014), o concreto é um compósito comum, cujas fases matriz e dispersa são constituídas por materiais cerâmicos. Esse material consiste em um corpo sólido composto por partículas de agregados ligadas entre si através da pasta de cimento portland que é um meio de ligação ou aglutinante. A pasta de cimento possui uma microestrutura heterogênea, constituída por produtos das reações de hidratação do cimento com a água: silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 sulfoaluminatos de cálcio (etringita) e monossulfatos. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade (BUCKNER, 2014). Embora seja o mais recente dos materiais de construção de estruturas, pode-se considerá-lo como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida (HELENE; ANDRADE, 2010).

Os tipos de concreto mais conhecidos são aqueles feitos com cimentos portland e o asfáltico, em que os agregados da fase dispersa são a brita e a areia. O concreto asfáltico é usado, principalmente, como material de pavimentação, enquanto que o concreto de Cimento Portland é aplicado como material estrutural de construção (CALLISTER JR., 2010)

No concreto, a mistura do Cimento Portland com a água forma uma pasta mais ou menos fluida, variando com a adição de água, que envolve as partículas de agregados (areia e brita), a fim de obter um material que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado capaz

de ser moldado em formatos geométricos diversos; com o tempo, essa mistura endurece, adquirindo resistência mecânica com capacidade de obter um excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição (HELENE; ANDRADE, 2010).

Na composição do Concreto, além dos seus componentes principais (cimento, água e agregados), é possível a inserção de outros materiais como aditivos, fibras, pigmentos, agregados especiais e adições minerais (NEVILLE; BROOKS, 2013). A tecnologia do concreto busca a proporção ideal entre os diferentes constituintes, para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade requeridas para o concreto (HELENE; ANDRADE, 2010).

1.2.1 Propriedades Mecânicas do Concreto de Cimento Portland

O concreto é principalmente utilizado de maneira a explorar sua boa resistência à compressão, assim, quando uma estrutura de concreto é projetada, assume-se que este material é resistente a esforços de compressão e não resistente a esforços de tração. Dessa forma, entre os principais fatores utilizados para avaliar-se a qualidade do concreto, usa-se a resistência à compressão, a qual pode ser usada para obter outras propriedades mecânicas (HASSOUN; AL-MANASEER, 2015; NEVILLE; BROOKS, 2013).

De acordo com a composição do concreto é possível atingir valores bem variados para resistência à compressão. A norma brasileira regulamentadora de projeto de estruturas de concreto armado, NBR 6118 (ABNT, 2014), exige um valor de resistência mecânica à compressão para concretos de no mínimo de 20 MPa.

O concreto é um material frágil, portanto, não resiste a grandes esforços de tração (HASSOUN; AL-MANASEER, 2015). Embora a resistência à compressão do concreto seja sua propriedade comumente avaliada em um projeto estrutural, todavia para alguns fins, a resistência à tração é de interesse como, por exemplo, em projetos de rodovias e lajes de aeródromos (NEVILLE, 2011). De maneira geral, a resistência à tração do concreto é de aproximadamente 10% do valor da resistência à compressão. Os ensaios mais comumente aplicados para a avaliação da resistência à tração do concreto são os ensaios por compressão diametral e o ensaio de tração na flexão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Uma das propriedades elásticas mais importantes do concreto é seu módulo de elasticidade. Esta propriedade é uma medida de rigidez, ou da resistência do material à deformação, ou seja, é a mudança de tensão em relação à deformação na faixa elástica, que

pode ser obtido a partir de um teste de compressão em cilindros de concreto (HASSOUN; AL-MANASEER, 2015; NEVILLE, 2011).

As propriedades do concreto de Cimento Portland são resultantes das reações químicas entre os compostos do Cimento Portland e da água. Para entender as propriedades do cimento, é importante conhecer seu processo de fabricação, composição química e mineralógica e reatividade dos seus compostos constituintes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

1.2.2 Cimento Portland

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), o Cimento Portland é o material de construção de vasto uso no mundo. Foi inventado por Joseph Aspdin, um construtor inglês, que o patenteou em 1824. Nessa época, na Inglaterra, era comum a construção com pedra de Portland, uma ilha que fica localizada no sul desse país. Aspdin registrou esse nome em sua patente, devido à semelhança na cor e na dureza a essa pedra de Portland. Por esta razão o cimento é chamado *Cimento Portland*.

O principal uso do Cimento Portland é na produção de argamassa e concreto com a finalidade de ligar partículas inertes de agregados (areia e/ou pedras) (CALLISTER JR, 2010). As propriedades e características do concreto e argamassa dependem da qualidade e das propriedades de seus materiais constituintes. Dentre eles, quimicamente, o cimento é o mais ativo. Ele é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado (revestimento, viga, laje, etc.) (ABCP, 2002).

O Cimento Portland é um pó fino que desenvolve propriedades aglomerantes resultantes de reações químicas entre seus minerais constituintes e a água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Após um determinado tempo, o Cimento Portland endurece e não se decompõe mais, mesmo que seja novamente submetido à ação da água (ABCP, 2002). Deve-se ressaltar que o processo pelo qual ocorre o endurecimento do cimento não é de secagem, mas sim de hidratação em que a água participa da reação de ligação química. Por isso o Cimento Portland é denominado cimento hidráulico porque sua dureza se desenvolve com as reações químicas com a água (CALLISTER JR, 2010).

1.2.2.1 Produção e composição de Cimento Portland

A matéria-prima para produção do Cimento Portland deve conter cálcio e sílica em formas e proporções adequadas, formando os silicatos de cálcio que são os constituintes primários desse material (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1997).

O cimento portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o seu principal componente e está presente em todos os tipos de Cimento Portland. As matérias-primas do clínquer são o calcário e a argila, provenientes de jazidas que, em geral, ficam situadas nas proximidades das fábricas de cimento (ABCP, 2002). A rocha calcária é uma fonte natural de carbonato de cálcio (CaCO_3) e as argilas são fontes preferenciais de sílica (SiO_2), além de minerais argilosos que contêm alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2011). As adições são matérias-primas que adicionadas ao clínquer, variam para cada tipo de cimento, definindo seus diferentes tipos disponíveis no mercado. Essas adições são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (ABCP, 2002; NEVILLE; BROOKS, 2013).

A produção do cimento Portland pode ser por via úmida ou via seca. No processo de produção por via úmida, a moagem e homogeneização realizadas com 30 a 40% de água. Todavia, as fabricas modernas preferem o processo por via seca, que é energeticamente mais eficiente do que o processo por via úmida (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No processo de fabricação do Cimento Portland, inicialmente, as matérias-primas são submetidas às operações de britagem, moagem e mistura, com o propósito de obter uma mistura (farinha) homogeneizada, antes do tratamento térmico, para facilitar a formação dos compostos desejados (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1997).

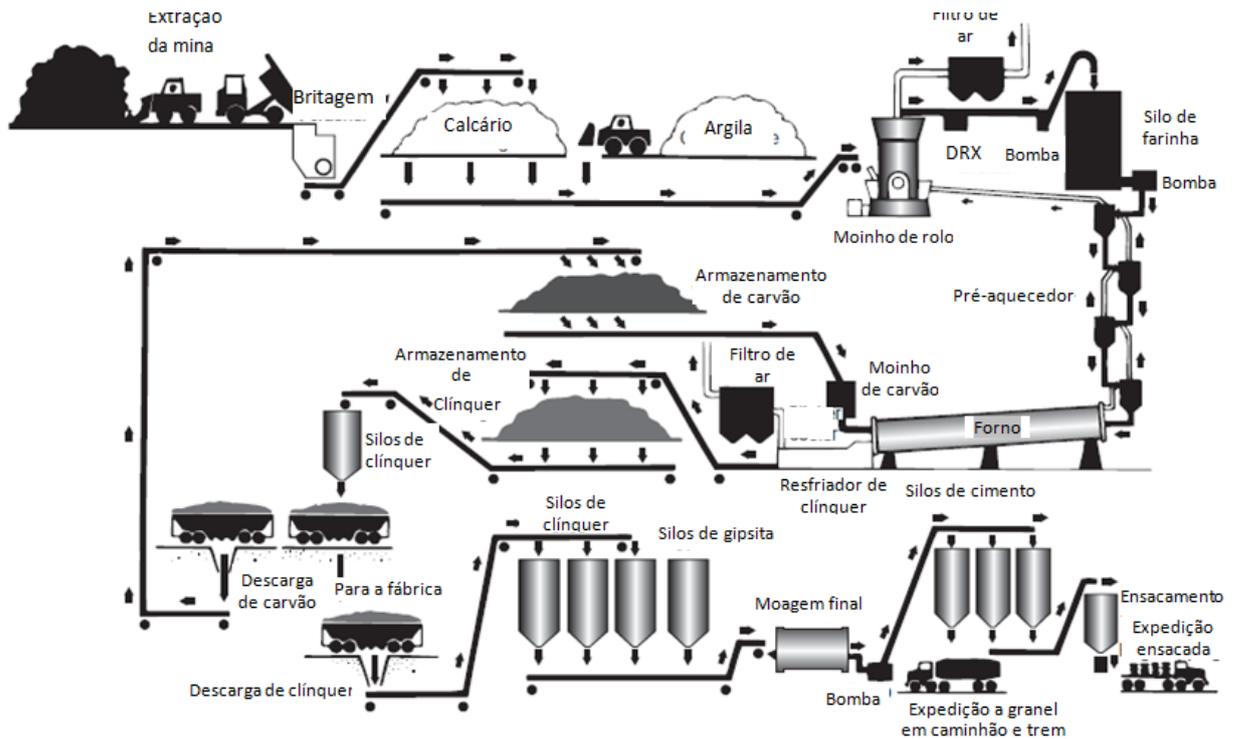
A principal etapa do processo de produção do Cimento Portland é a operação de clínquerização, em que a mistura de calcário e argila, em proporções adequadas, é submetida ao aquecimento, em forno rotativo, cuja temperatura interna chega a alcançar $1450\text{ }^\circ\text{C}$. Com o calor intenso, ocorre fusão parcial da mistura e são produzidos os nódulos de clínquer, que têm a forma de pelotas. Após o clínquer sair do forno, ainda incandescente, é submetido a um resfriamento brusco para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó (TAYLOR, 1997; ABCP, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A operação final do processo de produção de Cimento Portland é a pulverização do clínquer em partículas de diâmetro médio de 10 e 15 μm . Essa etapa é realizada em moinhos de bolas, em que o clínquer é misturado com cerca de 5% de gipsita (fonte de gesso) e finamente moído, formando o cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O gesso tem a função de controlar as reações iniciais de pega do cimento, isto é, o início do endurecimento quando este é misturado com água. Caso o gesso não fosse adicionado à moagem do clínquer, quando o cimento entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que

tornaria seu uso nas obras inviável. Por esta razão o gesso está presente na composição de todos os tipos de Cimento Portland (TAYLOR, 1997; ABCP, 2002).

Na Figura 1 está ilustrado esquematicamente o fluxograma do processo de fabricação do Cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de Cimento Portland a seco.



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014.

Os principais compostos que constituem o Cimento Portland estão listados na Tabela 1, juntamente com suas composições e abreviaturas.

Tabela 1 - Principais compostos do Cimento Portland.

Nome do composto	Óxido	Abreviatura	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	CaO	C	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcio	SiO	S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	Al_2O_3	A	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferraluminato tetracálcico	Fe_2O_3	F	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, (2014).

Taylor (1997) relata que o clínquer normalmente contém quatro fases principais, denominadas de fase alita, belita, aluminato e ferrita. Além destas, várias outras fases, como sulfatos alcalinos e óxido de cálcio, normalmente estão presentes em quantidades menores.

A Alita é o silicato tricálcico (C_3S), em Cimentos Portland é a fase constituinte mais importante para o desenvolvimento de resistência pois reage rapidamente com água, em idades de até 28 dias (TAYLOR, 1997).

Já Belita, que é o silicato dicálcico (C_2S), reage de forma mais lenta com água, contribuindo pouco com a resistência durante os primeiros 28 dias. Todavia, colabora substancialmente para o aumento adicional de resistência que ocorre em idades posteriores a este período. Sendo que, após um ano, a resistência obtida por alita pura e belita pura, tem condições comparáveis (TAYLOR, 1997).

Os silicatos de cálcio C_3S (o silicato tricálcico) e C_2S (silicato dicálcico) são os compostos mais importantes, porque são eles os responsáveis por atribuir resistência à pasta de cimento portland hidratada. Estes silicatos contêm pequenas impurezas de óxidos presentes no clínquer que exercem um forte efeito nas propriedades dos silicatos hidratados (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O Aluminato Tricálcico (C_3A) é uma fase que contribui pouco ou praticamente nada para a resistência, exceto nas primeiras idades; reage com a água rapidamente, podendo causar reações indesejáveis, a menos que um agente de controle de pega, o gesso, seja adicionado (NEVILLE; BROOKS, 2013; TAYLOR, 1997).

A fase Ferrita, o ferroaluminato tetracálcio (C_4AF) está presente em pequenas quantidades no cimento; comparando-se com os demais compostos, não afeta significativamente seu comportamento (NEVILLE; BROOKS, 2013). Esse composto possui uma taxa de reação com a água pouco variável, decorrente provavelmente de sua composição ou devido a outras características, mas em geral, essa reação é alta inicialmente e intermediária entre as fases alita e belita, em idades posteriores (TAYLOR, 1997).

1.2.2.2 Hidratação do Cimento Portland

O cimento portland anidro (pó) não aglomera os agregados (areia e rocha), mas quando misturado à água, adquire a propriedade de adesão. Isso ocorre devido às reações químicas entre a água e cimento, em que seus compostos constituintes (C_3S , C_2S , C_3A , CA_4F) se hidratam, formando produtos de hidratados, que com o tempo obtêm-se uma massa sólida e resistente (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2011).

No processo de hidratação do cimento portland ocorrem dois mecanismos de reação entre os seus constituintes e a água: a incorporação direta de algumas moléculas de água, ou seja, hidratação propriamente dita, e a hidrólise, isto é, quebra e dissolução de determinados componentes do cimento, como, por exemplo, o gesso que disponibiliza íons sulfato ao sistema (NEVILLE, 2011).

Os aluminatos (C_3A e CA_4F) hidratam mais rapidamente em relação aos silicatos (C_3S , C_2S). A hidratação dos aluminatos resulta nos produtos de hidratação, etringita e monossulfato. A etringita torna-se instável e é gradualmente convertida em monossulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1997).

Cerca de 70% do silicato de tricálcio (C_3S) reage com a água caracteristicamente em 28 dias, seus produtos resultantes são hidróxido de cálcio (CH) ou portlandita, e o silicato de cálcio hidratado, chamado CSH que tem as propriedades de um gel rígido. O silicato bicálcio C_2S se comporta semelhantemente, mas menos hidróxido de cálcio (CH) é formado e a reação de hidratação é mais lenta, aproximadamente 30% tipicamente reagindo em 28 dias (TAYLOR, 1997).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) o processo de hidratação do cimento portland inicia quando este reage com a água. No sistema de água e cimento, a água livre é responsável por atribuir plasticidade. A perda gradual da água livre, resultante da formação dos produtos de hidratação, faz com que a pasta de cimento e água enrijeça e, finalmente atinja a pega e o endurecimento. O enrijecimento corresponde à perda da consistência da pasta plástica de cimento, a pega é a solidificação dessa pasta plástica, e o endurecimento é o fenômeno do ganho de resistência com o tempo.

Neville e Brooks (2013) citam que a mistura que compõe o concreto após o lançamento deve ser seguida pela cura em um ambiente adequado durante os primeiros estágios do endurecimento, a fim de obter um material de boa qualidade. A cura é a denominação dos procedimentos utilizados para promoverem a hidratação do cimento, e assim, ocorrer o desenvolvimento da sua resistência. Eles consistem em controlar a temperatura e o movimento de dentro para fora do concreto e vice-versa, os quais afetam tanto a resistência como a durabilidade (NEVILLE, 2011).

1.2.2.3 Tipos de Cimento Portland

Na denominação dos tipos de cimentos, as iniciais *CP* são correspondentes à abreviatura de Cimento Portland, as quais são seguidas dos algarismos romanos de *I* a *V*, que estão relacionados ao tipo de cimento, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland

(ABCP, 2002). A composição e as adições feitas no processo de produção dos cimentos Portland podem ser classificados conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Composição dos tipos de cimento Portland.

Tipos de Cimento Portland	Composição (% de massa)					Norma da ABNT
	Sigla	Clinker + Gesso	Escória de Alto-Forno (E)	Material Pozolânico (Z)	Material Carbonático (F)	
Comum	CPI	100	-			NBR 5732
	CPI-S	99 - 95	1 - 5			
Composto	CPII-E	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10	NBR 11578
	CPII-Z	94 - 76	-	6 - 14	0 - 10	
	CPII-F	94 - 90	-	-	6 - 10	
Alto-Forno	CPIII	65 -25	35 - 70	-	0 -5	NBR 5735
Pozolânico	CPIV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
Alta resistência Inicial	CPV - ARI	100 - 95	-	-	0 - 5	NBR 5733

Fonte: ABCP, (2002); MEHTA; MONTEIRO, (2014).

O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) é uma variedade do cimento portland comum, como o próprio nome indica, apresenta a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias após sua aplicação (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2011; TAYLOR, 1997).

Esta característica de atingir alta resistência é decorrente da utilização de uma dosagem específica de calcário e argila utilizada na produção do clínquer, obtendo uma maior quantidade de C_3S (alita), aliada ao menor tamanho de partícula devido a uma moagem mais fina do cimento, que favorece uma maior área superficial (700 a $900 \text{ m}^2 / \text{kg}$), de modo que o cimento, ao reagir com a água, desenvolve elevadas resistências com maior velocidade. (ABCP, 2002; NEVILLE; BROOKS, 2013; TAYLOR, 1997). Isto porque a alta finura propicia uma rápida hidratação e, por conseguinte, a uma alta taxa de geração de calor em idades iniciais, com rápido desenvolvimento de resistência. Entretanto, há pouco ganho de resistência após os 28 dias (NEVILLE, 2011; TAYLOR, 1997).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2018), esse tipo de cimento é o mais adequado para aplicações em que é requisitada, fundamentalmente, uma elevada resistência às primeiras idades, como na indústria de pré-moldados e, especialmente, de concreto protendido.

1.2.3 Agregados

Os agregados constituem a fase dispersa do concreto, pelo menos $\frac{3}{4}$ (três quartos) de seu volume é ocupado por agregados, assim, sua qualidade é de considerável importância, visto que as suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e desempenho estrutural do concreto (NEVILLE, 2011). Anteriormente, os agregados eram tidos como materiais inertes, de baixo custo, dispersos na pasta de cimento com a finalidade de produzir um grande volume de concreto. Entretanto, eles não são inertes, visto que suas propriedades físicas, térmicas e algumas vezes as químicas influenciam no desempenho do concreto, como por exemplo, melhorando sua estabilidade dimensional e durabilidade em relação à pasta de cimento hidratada (NEVILLE; BROOKS, 2013).

As partículas de agregados, normalmente, são de baixo custo, comparadas ao cimento que é relativamente caro; elas atuam como um material de enchimento para reduzir o custo global do concreto produzido (CALLISTER JR., 2010).

Entretanto, segundo Mehta e Monteiro (2014), o fator econômico não é a única razão para o uso de agregados, pois esses materiais conferem consideráveis vantagens técnicas ao concreto. As características dos agregados relevantes na composição do concreto incluem a composição granulométrica, porosidade, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substância deletérias presentes.

A classificação principal dos agregados está relacionada ao seu tamanho de partícula: agregado miúdo e agregado graúdo, sendo estes normalmente chamados de areia (com dimensão não maior que 4 mm) e brita, pedra britada, (com pelo menos 5 mm de tamanho), respectivamente, (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2011).

A alternativa, usada visando boa qualidade do concreto, é obter pelo menos dois grupos de agregados de tamanho distintos. Desta forma, é natural acrescentar a maior quantidade possível de agregado ao concreto preservando, ao mesmo tempo, sua trabalhabilidade (ASHBY; JONES, 2007). A forma ideal de fazer isso é graduar os agregados de modo que fiquem bem compactados, em que as partículas finas de areia devem preencher os espaços vazios entre as partículas de brita (ASHBY; JONES, 2007).

1.2.4 Aditivos

No decorrer dos últimos 40 anos, a tecnologia do concreto progrediu consideravelmente com a utilização de aditivos (AITCIN; FLATT, 2016). A razão do grande crescimento do uso de aditivos é o reconhecimento de que eles têm a capacidade de conferir benefícios físicos e econômicos significativos ao concreto, como por exemplo, o uso de concreto sob circunstâncias em que anteriormente existiam dificuldades consideráveis, ou mesmo insuperáveis. Com a utilização de aditivos é possível o uso de uma gama mais ampla de materiais na mistura do concreto (NEVILLE, 2011).

Os aditivos são adicionados à mistura de concreto em pequenas quantidades no momento em que são misturados, a fim de modificar as propriedades do concreto fresco e endurecido (AITCIN; FLATT, 2016; BEZERRA, 2016). Esses materiais possuem uma composição variada, desde surfactantes e sais solúveis a polímeros e minerais solúveis. Geralmente são usados no concreto para melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou retardar o tempo de pega, controlar o desenvolvimento da resistência e aumentar a durabilidade do concreto em determinadas condições de exposição (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo a NBR 11768 (ABNT, 2011), os tipos de aditivos químicos para concreto são: redutor de água, plastificantes; alto redutor de água, superplastificantes; incorporador de ar; acelerador de pega; retardador de pega e acelerador de resistência.

Tendo em vista que a aplicação de aditivos é possível alterar uma ou várias propriedades do concreto, assim, o uso desses materiais não é mais um problema econômico, mas trata-se de uma questão de desenvolvimento, ciência, durabilidade e sustentabilidade (AITCIN; FLATT, 2016).

Vale ressaltar que, denominadas adições minerais são materiais finamente moídos utilizados, em forma de pó, como adições ou substituição de parte do cimento Portland, os quais são produzidos a partir de fontes naturais ou de alguns subprodutos industriais (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013).

A adição de polímeros à pasta cimentícia, normalmente, propicia a migração do polímero para as interfaces entre as partículas de cimento, favorecendo a formação de compósitos cimentícios microestruturais (NOBREGA, 2009).

Segundo Bezerra (2016), a adição de polímeros, assim como de biopolímeros, modifica algumas propriedades mecânicas do concreto, como módulo de elasticidade, resistência mecânica e resiliência. Isso ocorre devido uma melhor organização da

microestrutura do concreto, reduzindo a permeabilidade, diminuindo a quantidade de poros grandes, dificultando a propagação de fissuras.

A adição de quitosana em concreto é capaz de aumentar sua resistência à compressão em até 30%. No entanto, é necessário avaliar a quantidade a ser usada, porque as propriedades reológicas podem ser prejudicadas, visto que a quitosana é levemente solúvel em água (Bezerra, 2006).

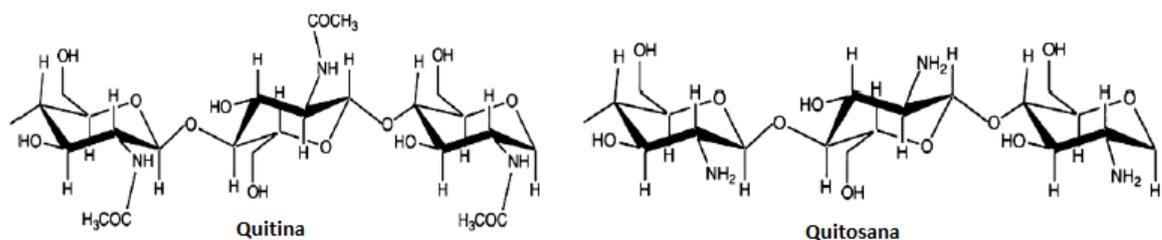
1.3 QUITOSANA

A quitosana é um biopolímero natural, hidrofílico, amino catiônico, composto por unidades β -1,4 D-glucosamina ligadas a resíduos de N-acetilglucosamina, originado a partir da reação de desacetilação parcial da quitina (N-desacetilação), denominação usual para o polímero β -(1-4) 2-acetamido-2-deoxi-D-glicose (N-acetilglucosamina) (CAMPOS-TAKAKI, 2005). Sua precursora, a quitina é um polissacarídeo linear, considerado um dos biopolímeros mais abundantes na natureza, depois da celulose, em quantidade produzida anualmente (SENEL; MCCLURE, 2004). Este biopolímero é encontrado em insetos, moluscos e na parede celular de fungos, sendo proveniente principalmente de carapaças de crustáceos. Sua produção comercialmente é obtida dos resíduos das indústrias de processamento de crustáceos do setor alimentício, em que diariamente toneladas desse material são descartadas (CHEN; LI; XU *et al.*, 2005).

No estado sólido, a quitosana é um polímero semicristalino, possui baixa cristalinidade que é proporcional ao grau de desacetilação (GD), isto é, quanto mais desacetilada a quitosana menos cristalina ela se apresenta (CAMPANA-FILHO, 2007).

A quitina e quitosana têm estrutura química similares (Figura 2), diferem nas suas estruturas nos grupamentos funcionais: aminoacetilado (NH) no caso da quitina e (NH₂) no caso da quitosana (MOHANASRINIVASAN, 2013).

Figura 2 - Estrutura química da quitina e da quitosana.



Fonte: Mohanasrinivasan (2013).

A quitina é insolúvel na maioria dos solventes testados, enquanto que a quitosana é solúvel em soluções aquosas diluídas de ácidos orgânicos e inorgânicos e insolúvel em meios neutros e alcalinos (GOOSEN, 1996; SINGLA; CHAWLA, 2001)

1.3.1 Produção

A produção industrial de quitosana ocorreu por volta de 1971, no Japão e Estados Unidos (EUA) que são países líderes do mercado mundial. No Brasil, a comercialização em larga escala de quitina e quitosana ocorreu por volta de 1993 (ABRAM, 2004)

A quitina pode ser facilmente obtida a partir das cascas de crustáceos, ou da parede celular dos fungos do gênero *mycelia*. Geralmente sua produção está associada à indústria alimentícia, que diariamente descarta toneladas desse material (AZEVEDO, 2007).

O processo para obtenção da quitosana se inicia pela extração de proteínas de crustáceos (carapaças de caranguejo, cascas de camarão): a matéria-prima bruta passa por um processo de lavagem abundante em que banhos ácidos retiram todo o conteúdo mineral das cascas dos crustáceos, seguido do processo de desproteínização em banhos básicos, ocorre uma leve desacetilação, originando a quitina, que em seguida passa pelo processo químico de desacetilação, resultando a quitosana que é quimicamente conhecida como seu derivado N-desacetilado (SPIN-NETO et al., 2008). Para ser considerada como quitosana, deve ter grau de desacetilação superior a 75% e solúveis em ácidos como o acético e o fórmico (RAVI-KUMAR, 2000).

1.3.2 Propriedades e aplicações

Devido às suas características, a quitosana vem despertando grande interesse de cientistas, devido ser um material polimérico com propriedades peculiares como, biodegradabilidade, biocompatibilidade, atóxicidade, adsorção, complexação metálica, atividade antibacterial, carreamento de fármacos, anticarcinogênico, além ser produzido por fonte natural renovável.

A quitosana, devido às suas características, tem aplicações em diversas áreas como: agricultura, indústria de alimentos, indústria têxtil, indústria farmacêutica, médica, agricultura, tratamento de água residuais, biotecnologia, indústria alimentícia, indústria de cosméticos e biomateriais (TONHI; PLEPIS, 2002).

Segundo Azevedo (2007), o potencial de aplicação da quitosana é multidimensional, passando desde aplicações na área alimentícia como em nutrição, produtos farmacêuticos, agricultura, biotecnologia e ciência dos materiais.

1.4 APLICAÇÃO DE QUITOSANA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.

Estudos vêm mostrando o potencial de aplicação de quitosana em materiais a base de cimento portland.

Mignon *et al.* (2016) desenvolveram, caracterizaram e analisaram o potencial de autocura de polímeros superabsorventes (SAPs) baseados em polissacarídeos metacrilados (alginato e quitosana) combinados com monômeros básicos (DMAEMA e DMAPMA). Estes autores verificaram que, embora a quitosana combinada com DMAPMA proporcione uma redução de resistência à compressão, todavia, apresenta um promissor comportamento de auto-selagem e cura, que futuramente poderá ser eficiente para selar e curar rachaduras no concreto.

Bezerra *et al.*, (2011) estudaram a influência da adição de látex e quitosana em concretos e, verificaram que a resistência à tração, a resiliência e a tenacidade foram maiores em relação ao concreto referencial.

Lasheras-Zubiate e colaboradores (2011), em seu estudo verificaram que a quitosana propicia o aumento de viscosidade de uma pasta cimentícia, possui a capacidade de absorção e complexação de metais pesados (Pb, Cu, Zn, Cd, Mo e Cr), e ocasiona retardamento no processo de hidratação que está relacionado a uma interação da quitosana com partículas de cimento.

Bezerra (2006) analisou a incorporação de quitosana em pastas de cimento, em que foram obtidos excelentes resultados: aumento de 30% na resistência à compressão, ganho de impermeabilidade e preenchimento de porosidade.

Nóbrega (2009) relata que a inclusão do biopolímero quitosana promoveu a redução da mobilidade da água, fazendo com que a distribuição dos produtos de hidratação do cimento Portland fosse uniforme, o que resultou na presença de todos os hidratos em todas as regiões da microestrutura do concreto.

Melo *et al.*, (2007), desenvolveram uma pasta cimentante à base de cimento Portland classe G e quitosana (1 a 5% BWOC), verificaram que o compósito obtido é adequado à produção de poços de petróleo, em que foram observados incrementos de até aproximadamente 40% aos valores de resistência à compressão e de até aproximadamente 91% aos de resistência à tração e estabilidade térmica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo produzir um compósito de concreto composto por Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI) com adição de quitosana e avaliar sua influência nas propriedades mecânicas.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

Para avaliar a influência da quitosana nas propriedades mecânicas deste compósito cimentício foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

Preparar e avaliar a resistência mecânica de corpos-de-prova de argamassa a fim de verificar o teor ideal de quitosana, em relação à massa do cimento, para produzir corpos-de-prova de concreto;

- Preparar os corpos-de-prova de concreto (amostras padrão e com adição 0,1% de quitosana em relação à massa do cimento) para realizar as caracterizações;
- Caracterizar mecanicamente os corpos-de-prova de concreto por meio dos ensaios de resistência mecânica à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade;
- Caracterizar os corpos-de-prova de concreto e a quitosana, por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia de raios - X por dispersão de Energia (EDS), por difração de raios - X (DRX) e por Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os principais materiais utilizados no presente trabalho foram: cimento Portland CP-V ARI, areia, brita, aditivo superplastificante e água potável e destilada. Estes materiais estão ilustrados na Figura 2.

Figura 3 - Matérias-primas usadas no trabalho: A) areia (agregado miúdo); B) brita (agregado graúdo); C) cimento CP V (aglomerante); D) aditivo superplastificante; E) biopolímero (quitosana).



Fonte: Próprio autor.

3.1.1 Cimento (Aglomerante)

Neste trabalho, foi utilizado como material aglomerante o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI), fornecido pela empresa ELIZABETH, fabricado de acordo com as recomendações da Norma Técnica Brasileira - NBR 5733/5737. Foi escolhido o CP V

– ARI por este tipo de cimento possuir baixo teor de adições, em relação a outros cimentos comercializados no Brasil.

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados neste trabalho, agregados miúdo (areia) e graúdo (brita), são comercializados na região metropolitana de Recife – PE.

3.1.3 Biopolímero

Foi usado o Biopolímero quitosana, produzido pela POLYMAR, localizada em Fortaleza, CE. De acordo com o certificado de análise enviado pela empresa, a quitosana usada apresenta grau de desacetilação de 85% e pH 8,4. Este material foi adicionado às amostras, em relação à massa do cimento portland.

3.1.4 Água de Amassamento

Para a confecção dos corpos de prova de concreto foi utilizada água potável, proveniente de reservatório de água da Escola Técnica - SENAI de Água Fria em Recife (PE).

3.1.5 Aditivo Superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante MC-POWERFLOW 4001, fornecido pela empresa MC BAUCHEMIE, localizada em Vitória de Santo Antão, PE. Este material é um produto líquido; pronto para uso; de acordo com o certificado de análise enviado pela empresa, possui densidade de $1,09\text{g/cm}^3$ e pH 4, e atende os requisitos da ABNT.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental, conforme os objetivos supracitados, a fim de avaliar a influência de um biopolímero, a quitosana, nas propriedades mecânicas de um compósito cimentício composto por Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI).

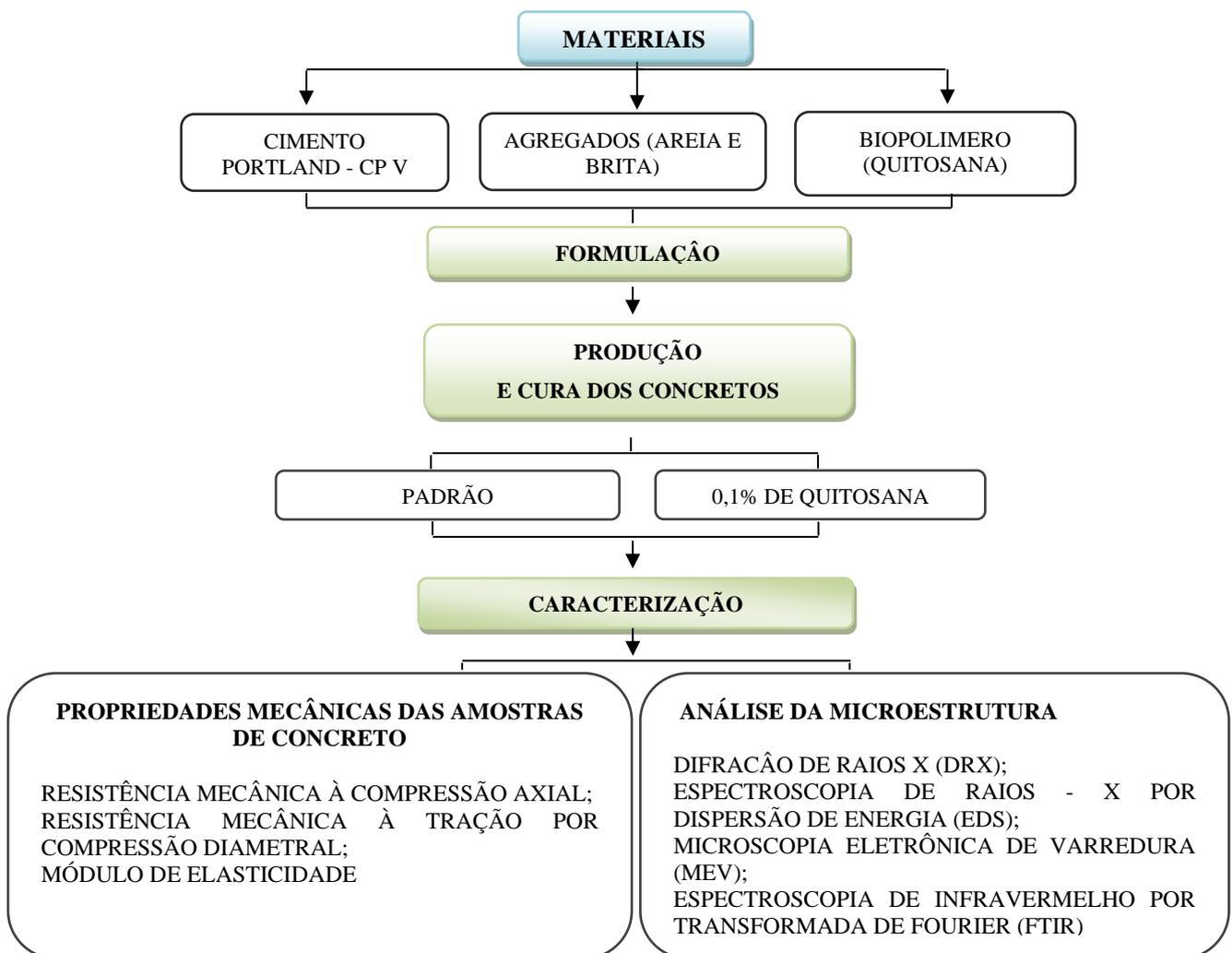
O processo experimental foi dividido nas seguintes etapas: caracterizações mecânica, química e física (ANEXO A) do cimento; caracterização dos agregados (miúdos e graúdos); produção das amostras do compósito (padrão e com 0,1% de quitosana); caracterização mecânica das amostras do compósito cimentício, e caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia de raios - X por dispersão de Energia (EDS),

Difração de raios X (DRX) e por Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das amostras do compósito e do biopolímero.

Inicialmente, foi realizado o ensaio de resistência mecânica à compressão do cimento Portland (CP V), conforme a NBR 7215 (1996). Para isto, foram preparadas amostras de argamassa de Cimento Portland CPV com a adição de alguns percentuais do biopolímero quitosana (0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4%, 0,5%, 1% e 5%) em relação à massa do cimento, a fim de verificar o resultado de percentual de adição de quitosana com melhor performance, a ser usado na composição do compósito cimentício (concreto).

Na Figura 4, estão apresentadas as etapas experimentais realizadas no presente trabalho.

Figura 4 - Fluxograma das etapas da metodologia do trabalho.



Fonte: Próprio autor.

Tanto a produção quanto as caracterizações mecânica e física das amostras, foram realizadas no LETMACC (Laboratório de Ensaios Tecnológicos de Materiais da Construção Civil) do SENAI – Escola Técnica SENAI de Água Fria em Recife (PE). As caracterizações microestruturais (MEV, EDS e DRX) das amostras de concreto após o ensaio de resistência à compressão axial (padrão e com 0,1% de quitosana), foram realizadas no Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, e a caracterização por FTIR foi realizada na Central Analítica no Departamento de Química Fundamental da UFPE. Já as caracterizações química e física do cimento (CP V) foram realizadas na fábrica de cimento, Cimento Elizabeth (ANEXO A).

3.2.1 Caracterização dos Agregados

No Quadro 2, estão descritos os ensaios realizados para a caracterização dos agregados graúdos e miúdos utilizados.

Quadro 2 - Métodos de ensaios e caracterizações dos agregados.

Materiais	Ensaio e caracterização	Norma
Agregados	Agregados para concreto – especificação	NBR 7211:2009
	Determinação da composição Granulométrica	NBR NM 248:2003
	Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 mm, por lavagem	NBR NM 46: 2003
	Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária	NBR NM 45: 2006
	Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52:2009
	Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água	NBR NM 53:2009

Fonte: Próprio autor

3.2.2 Caracterização do Cimento Portland (ARI-CP V)

3.2.2.1 Resistência mecânica à compressão do Cimento Portland (ARI-CP V)

Os materiais utilizados como matéria-prima neste ensaio foram: cimento portland de alta resistência inicial (CP V); quitosana; água destilada; e areia.

Inicialmente, foram preparados corpos-de-prova para realização do ensaio de resistência à compressão axial, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996).

Foram produzidos corpos-de-prova de argamassa padrões e com a adição de alguns percentuais do biopolímero quitosana (0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4%, 0,5%, 1% e 5%) em relação a massa do cimento. Os corpos-de-prova foram elaborados com argamassa composta de uma parte de cimento, três de areia padronizada, e água destilada, com relação água/cimento de 0,48. As matérias-primas foram misturadas em um misturador mecânico, posteriormente, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Aplicou-se uma fina camada de óleo mineral, como desmoldante, na superfície interna dos moldes para não ocorrer aderência das amostras de argamassa nos moldes. Moldou-se 03 corpos-de-prova para a amostra padrão e para cada amostra com percentual de quitosana em relação à massa do cimento (0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4%, 0,5%, 1% e 5%), sendo que para os dois últimos percentuais foram 02 corpos-de-prova, devido à quantidade de moldes disponíveis. Em seguida, os moldes foram vedados com placas de vidro para evitar que as amostras de argamassa frescas não perdessem umidade durante o processo de cura, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Corpos-de-prova da amostra padrão e com adição de Quitosana.



Fonte: Próprio autor.

Estas amostras foram mantidas desta maneira a temperatura de $\pm 23^{\circ}\text{C}$ por 24h. Logo a pós, as amostras foram colocadas submersas em um tanque com água até os 28 dias de idade. Após o processo de cura aos 28 dias de idade, as amostras de argamassa foram

submetidas ao processo de capeamento com enxofre, a fim de regularizar planamente e linearmente as suas bases superior e inferior dos corpos-de-prova para submetê-los ao ensaio de resistência mecânica à compressão axial, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Corpos-de-prova da amostra padrão e com adição de Quitosana após capeamento com enxofre.



Fonte: Próprio autor.

Após o capeamento, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias de idade, em que foram colocados diretamente sobre o prato inferior da prensa, de maneira rigorosamente centrados em relação ao eixo de carregamento, de acordo com as especificações da NBR 7215 (ABNT, 1996), conforme a Figura 7.

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão axial dos corpos-de-prova, aos 28 dias de idade.



Fonte: Próprio autor.

O cálculo da resistência à compressão foi baseado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), conforme a Equação 1.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Onde: f_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa); F é a força máxima, em N; D é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.

A partir dos resultados de resistência mecânica a compressão axial em relação ao teor do biopolímero quitosana, foi escolhida a amostra com 0,1% de quitosana em relação à massa do cimento portland (CP V) para continuidade deste trabalho, por ter apresentado melhor desempenho de resistência mecânica à compressão. Foram produzidos corpos-de-provas com este percentual e com amostra padrão para posteriores caracterizações (química, mecânica e microscópica).

3.2.3 Produção dos Concretos

Foram preparados corpos-de-prova de concreto para realização dos ensaios de caracterização mecânica (resistência mecânica à compressão axial, resistência mecânica à tração na compressão diametral e módulo de elasticidade), os quais foram usados, após a ruptura, para caracterização microscópica, química e mineralogicamente por meio das técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e Difração de raios – X (DRX), respectivamente. Estas amostras de concreto foram preparadas e caracterizadas mecanicamente no SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, na unidade de Água Fria em Recife, PE. Os procedimentos de moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto foram realizados conforme as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Foram produzidos corpos-de-prova de concreto de amostra padrão e de amostra com adição de 0,1% de quitosana em relação à massa do cimento (CP V), ressaltando que em ambas as amostras foi adicionado o aditivo superplastificante (10g), mantendo o mesmo padrão de quantidade, a fim de obter uma mistura com uma boa homogeneização e trabalhabilidade, visto que a quitosana tende a aumentar a viscosidade da pasta cimentícia (BEZERRA, 2016). Foram confeccionados corpos-de-prova, para realização das caracterizações mecânicas, com formatos cilíndricos (dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento),

A dosagem estabelecida na produção dos corpos-de-prova seguiu o traço (relação entre os componentes da mistura, em peso) de 1,0 : 1,5 : 1,3 : 0,5 (cimento, areia, brita e relação de água/cimento (a/c), respectivamente), em relação à massa do cimento portland (CP V). Esse traço utilizado seguiu a metodologia proposta por Silva *et al.* (2005), Santos (2006) e Vergas (2010) e a ele foi adicionado o teor de 0,1% de quitosana selecionado na etapa inicial do trabalho. Esta composição está representada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição das amostras de concreto.

COMPOSIÇÃO	Cimento - CP V	Areia	Brita	Água	Quitosana	Superplastificante
<i>Padrão</i>	10 kg	15 Kg	13 Kg	5 Kg	-	10g
<i>0,1 Quitosana</i>	10 kg	15 Kg	13 Kg	5 Kg	10g	10g

Fonte: Próprio autor.

Todos os materiais foram misturados em uma betoneira (misturador mecânico de capacidade volumétrica de 20L), conforme ilustrado na Figura 8, seguindo uma ordem de mistura de cimento, areia, quitosana (menos na amostra padrão), brita, água e superplastificante, respectivamente, durante de 5 minutos.

Figura 8 - Misturador Mecânico (betoneira) usado na produção dos corpos-de-prova de concretos.

Fonte: Próprio autor.

Antes dos moldes serem preenchidos com o concreto produzido, aplicou-se uma fina camada de óleo mineral, desmoldante, na superfície interna dos moldes para não ocorrer aderência das amostras de concreto nos moldes. Em seguida, foi efetuado o preenchimento dos moldes (Figura 9), adensamento, e posteriormente, foram vedados com placas de aço para evitar que as amostras de concreto frescas perdessem umidade durante o processo de hidratação. Estas amostras foram mantidas desta maneira, a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ por 24h. Após este

período, as amostras foram colocadas submersas em um tanque com solução saturada de hidróxido de cálcio até 7 e 28 dias de idade, para ocorrer o processo de cura por hidratação.

Figura 9 - Corpos-de-prova de concreto em estado fresco.



Fonte: Próprio autor.

3.2.4 Caracterização Mecânica dos concretos

Após o processo de cura de 7 e 28 dias, foi realizada a caracterização mecânica dos corpos-de-prova (padrão e 0,1% de quitosana). No Quadro 3 estão explícitos os tipos de ensaios mecânicos realizados e as normas usadas na metodologia dos mesmos.

Quadro 3 - Resumo dos ensaios mecânicos realizados e representação das normas de seus métodos empregados.

Exemplar	Ensaio Mecânico	Idade (dias)	Quantidades de corpos de prova	Metodologia
Padrão	Resistência Mecânica à Compressão Axial	7	2	NBR 5739/2015
		28	4	
	Resistência Mecânica à Tração na Compressão Diametral	28	2	NBR 7222/2011
	Módulo de Elasticidade	28	5	NBR 8522/2008
0,1% QUI	Resistência Mecânica à Compressão Axial	7	2	NBR 5739/2015
		28	4	
	Resistência Mecânica à Tração na Compressão Diametral	28	2	NBR 7222/2011
	Módulo de Elasticidade	28	5	NBR 8522/2008

Fonte: Próprio autor.

As caracterizações mecânicas supracitadas foram realizadas com o auxílio de uma máquina denominada de prensa EMIC (modelo pc200cs), de capacidade de 2000 KN, equipamento da Escola Técnica SENAI de Água Fria em Recife (PE), ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Máquina de Ensaio Mecânicos EMIC (modelo pc200cs), capacidade de 2000 KN.



Fonte: Próprio autor.

3.2.4.1 Resistência Mecânica à Compressão Axial

Para a realização do ensaio mecânico de resistência à compressão axial foram seguidas aos procedimentos contidos na NBR 5739 (ABNT, 2007).

Após o processo de cura aos 7 e 28 dias de idade, as amostras de concreto (padrão e 0,1% de quitosana), com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 de comprimento, foram submetidas ao processo de capeamento com enxofre, a fim de regularizar planamente e linearmente as suas bases superior e inferior dos corpos-de-prova para realização do ensaio de resistência mecânica à compressão axial. Inicialmente foram ensaiados 2 corpos-de-prova de 7 dias de idade para ambas as amostras, e após os 28 dias de idade o ensaio foi novamente repetido utilizando 4 corpos-de-prova por amostragem. Os corpos-de-prova foram colocados diretamente sobre o prato inferior da prensa, de maneira rigorosamente centrados em relação ao eixo de carregamento ($0,25 \pm 0,05$ MPa/s), foram tensionados até a ruptura dos mesmos, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Ensaio de Resistência Mecânica à Compressão Axial das Amostras de Concreto (Padrão e 0,1% de Quitosana) após a Ruptura com 28 dias de Idade.



Fonte: Próprio autor.

O cálculo da resistência à compressão foi baseado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), conforme a Equação 2.

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

Onde: f_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa); F é a força máxima, em N; D é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.

3.2.4.2 Módulo de Elasticidade

Para avaliar o módulo de elasticidade dos concretos foi utilizado o procedimento descrito na norma NBR 8522 (ABNT, 2008). Foram moldados 5 (cinco) corpos-de-prova para cada amostra (padrão e 0,1% de quitosana), com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 de comprimento, com 28 dias de idade, conforme supracitado.

Inicialmente, atribuiu-se uma média dos valores de resistência à compressão axial de dois corpos-de-prova, conforme descrito na norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Em seguida, cada um dos três corpos-de-prova foram colocados no centro dos pratos da prensa e fixando-lhes os “clips gauges” (medidor de deformação). Para obter o módulo de elasticidade foram realizados quatro ciclos de carregamento ($0,25 \pm 0,05$ MPa/s). Primeiramente, nos três ciclos iniciais, foi aplicado pelo equipamento um carregamento equivalente a trinta por cento (30%)

da resistência à compressão do material mantido por sessenta segundos (60s). Em seguida retirou-se toda a carga (até 0,5MPa) e manteve-se sem carregamento por mais 60s. Posteriormente, foi aplicado o quarto ciclo, em que a amostra foi novamente carregada a 30% da resistência à compressão, durante 60s. Após esse tempo, medidor de deformação, foi retirado do corpo-de-prova, o qual recebeu um novo carregamento até a ruptura.

O cálculo módulo de elasticidade (E) foi baseado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008), conforme a Equação 3.

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10 \text{ (GPa)} \quad (3)$$

Onde: σ_a é a tensão básica correspondente à deformação específica 50×10^{-6} em MPa; σ_b é a tensão quando o carregamento corresponde a trinta por cento da resistência à compressão, em MPa; ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão σ_a ; ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão σ_b .

O resultado é a média das determinações em 5 corpos-de-prova, conforme a norma supracitada.

3.2.4.3 Resistência Mecânica à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio tem a finalidade de medir a resistência à tração simples do concreto, baseado no princípio de que um cilindro, carregado diametralmente, além das de compressão recebe tensões de tração; sendo que a resistência à tração do concreto numericamente é inferior à de compressão, assim ele rompe por tração. Esse ensaio foi idealizado pelo brasileiro Lobo Carneiro (ITAMBÉ, 2011).

O ensaio de resistência mecânica à compressão diametral foi realizado conforme o procedimento descrito na NBR 7222 (ABNT, 2011). Após os 28 dias de cura, mediu-se com auxílio de um paquímetro as dimensões dos corpos-de-prova; posteriormente, foram colocados sobre o prato inferior da prensa, de maneira centrada e alinhada em relação ao eixo de carregamento ($0,25 \pm 0,05$ MPa/s); foram tensionados até a ruptura dos mesmos, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de Resistência Mecânica à Tração por Compressão Diametral das amostras de concreto (padrão e 0,1% de quitosana) aos 28 dias de idade.



Fonte: Próprio autor.

O cálculo da resistência à tração por compressão diametral é obtido conforme a Equação 4.

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot L} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

Em que $f_{t,D}$ é a resistência à tração por compressão diametral (MPa), com aproximação de $\approx 0,05$ MPa; F é a carga máxima obtida no ensaio (kN); d é o diâmetro do corpo-de-prova (mm); L é a altura do corpo-de-prova (mm).

3.2.5 Análise de Microestrutura

Após as caracterizações mecânicas, a quitosana e as amostras de concreto, rompidas aos 28 dias durante o ensaio de resistência à compressão axial, foram caracterizadas por meio das análises de microestrutura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Energia Dispersiva de raios - X (EDS) e por Difratomia de raios - X (DRX).

3.2.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) / Espectroscopia de raios - X por Dispersão de Energia (EDS)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica de caracterização que consiste na emissão de um feixe incidente de elétrons para varrer (explora) a superfície de amostra, ponto a ponto. Esse feixe de elétrons interage com a amostra produzindo elétrons e

fótons que podem ser coletados por detectores adequados, convertendo em um sinal de vídeo. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação da amostra (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

A análise de espectroscopia de energia dispersiva de raios – X (EDS) fornece a análise elementar e química de uma amostra. Essa técnica funciona acoplada à microscopia eletrônica de varredura. Com essa técnica é possível obter informações químicas qualitativas e quantitativas sobre os elementos presentes, por meio da captação dos raios – X característicos, resultantes da interação do feixe primário com a amostra analisada (ORÉFICE *et al.*, 2006).

A análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada a fim de visualizar a microestrutura das amostras de concreto e a amostra do biopolímero; e a análise por espectroscopia de energia dispersiva de raios - X (EDS), a fim de obter os elementos químicos constituintes dos compostos das amostras de concreto e da quitosana.

Para realização das análises de MEV e EDS, foi necessário a preparação das amostras, metalizando-as com uma fina camada de ouro (20 nm por 2 minutos), que atuou como meio condutor de elétrons.

Posteriormente, as amostras foram analisadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca TESCAN, modelo MIRA 3.

Estas mesmas amostras, também foram analisadas por o espectrômetro de dispersão de energia (EDS), acoplado ao MEV, da marca OXFORD, modelo X-MAX^N. Os equipamentos de análises de MEV e EDS são do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

3.2.5.2 Difratomia de raios - X (DRX)

A análise por difração de raios X (DRX) é uma técnica que consiste na incidência de um feixe monocromático de raios X que interage com os átomos presentes na amostra, ocasionando o fenômeno de difração, isto é possível porque na maioria dos cristais, os átomos se distribuem em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X (ALBERS *et al.*, 2002). A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg, que fornece a relação entre as posições angulares dos feixes difratados reforçados, apresentados em termos do comprimento de onda do feixe de raios X incidente e da distância interplanar, d_{hkl} , dos planos cristalográficos, conforme a Equação A (CALLISTER JR., 2010):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5)$$

Onde: n é o número inteiro; λ é o comprimento de onda dos raios - X incidentes; d é a distância interplanar e θ é o ângulo de difração.

Essa técnica de caracterização foi usada a fim de identificar as fases cristalinas que foram formadas com a hidratação dos compostos do cimento portland. Para a realização desta análise reparou-se as amostras. para isso, foram maceradas em almofariz, as amostras de pasta de cimento do compósito (retiradas de CPs rompidos aos 28 dias) e passadas em peneira de $45\mu\text{m}$. Também foi analisada a amostra de quitosana.

As amostras foram analisadas pelo difratometro de raios - X (DRX) da marca RIGAKU, modelo SMARTLAB, do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco. As condições de operação do difratômetro foram: radiação CuK α , $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$, varredura $2\theta = 5^\circ$ a 90° .

3.2.5.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é o método pelo qual a absorção ou emissão de energia radiante estudada é causada pela interação entre a radiação eletromagnética e o material em estudo (SILVERSTEIN; BASSLER; MORRILL, 1994).

Esta caracterização foi realizada a fim de verificar se ocorreu interações entre o biopolímero (quitosana) e concreto, em que se analisou-se os modos vibracionais presentes nos compostos na região compreendida entre 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} . Foi utilizado um equipamento PerkinElmer Spectrum 400 FT-IR/FT-NIR. A análise foi realizada no Laboratório da Central Analítica do Departamento de Química Fundamental (DQF) da UFPE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, inicialmente serão apresentados os resultados da caracterização dos agregados (areia e brita), e, da caracterização mecânica do cimento portland (ARI- CP V), realizada a fim de encontrar o teor ideal de quitosana, bem como suas características físico-químicas adquiridas com o fornecedor. Em seguida são apresentados os resultados da caracterização das amostras de concreto obtidos com os ensaios mecânicos (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) e com as análises por microscopia eletrônica de varredura com EDS e por difração de raios – X, com o objetivo de conhecer comportamento mecânico do concreto produzido com a adição (0,1%) de quitosana.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A seguir estão descritos os resultados da caracterização dos agregados (grãos e miúdos), conforme as especificações da ABNT.

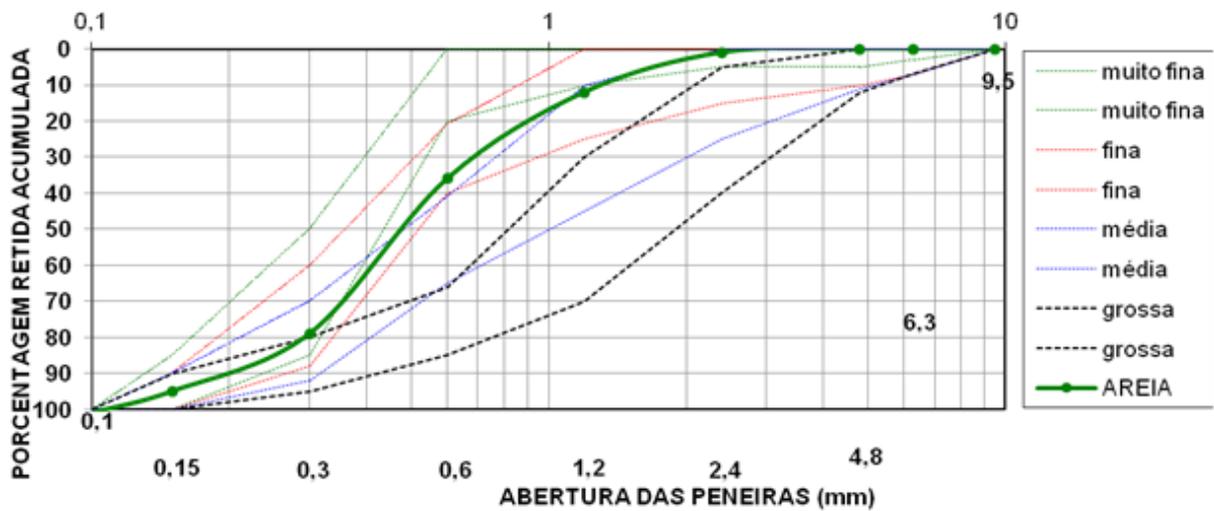
Na Tabela 3, estão compilados os resultados da caracterização granulométrica da areia (agregado grão). Sua curva granulométrica está ilustrada na Figura 12.

Na Tabela 4, estão compilados os resultados da caracterização granulométrica da brita (agregado grão). Sua curva granulométrica está ilustrada na Figura 13.

Tabela 3 - Composição granulométrica da areia.

Abertura da Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
2,36	7,75	0,775	8
1,18	105,05	10,505	11
0,6	238,95	23,895	35
0,3	432,55	43,255	78
0,15	159,65	15,965	94
< 0,15	55,9	5,59	100
Total	999,9		

Fonte: Próprio Autor.

Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo (areia).

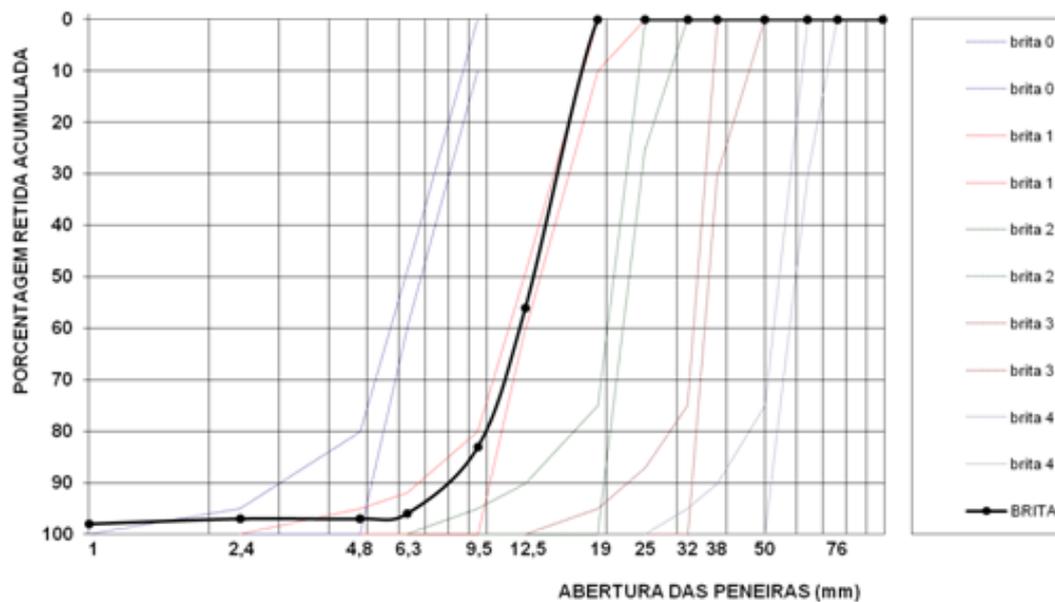
Fonte: Próprio Autor

Conforme os resultados de composição granulométrica, o agregado miúdo usado é classificado como areia média.

Tabela 4 - Composição granulométrica da brita.

Abertura da Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
12,5	2793,875	55,8775	56
9,5	1364,75	27,295	83
6,3	669,05	13,381	97
4,75	46,4	0,928	97
2,36	19,65	0,393	98
1,18	8,25	0,165	98
0,6	4,9	0,098	98
0,3	9,55	0,191	98
0,15	20,4	0,408	99
< 0,15	63,1	1,262	100
Total	4999,95		

Fonte: Próprio Autor.

Figura 14 - Curva granulométrica do agregado graúdo (brita).

Fonte: Próprio Autor.

Conforme os resultados de composição granulométrica, o agregado graúdo usado é classificado como brita tipo 1.

Os resultados da caracterização dos agregados (areia e brita) com as principais características dos agregados estão apresentados na Tabela.

Tabela 5 - Principais características dos agregados utilizados para produção das amostras de concreto.

Material	Massa específica ^{1,2} (kg/dm ³)	Massa unitária ³ (kg/dm ³)	Módulo de Finura ⁴	D _{máx} ⁴ (mm)	Material pulverulento ⁵ (%)
Areia natural	2,60	1,18	2,26	4,75	3,68
Brita	2,68	1,43	6,71	19	0,18

¹ABNT NBR NM 52: 2009; ² ABNT NBR NM 53: 2009; ³ ABNT NBR NM 45: 2006; ⁴ ABNT NBR NM 248: 2003; ⁵ ABNT NBR NM 46: 2003.

Fonte: Próprio autor.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (ARI-CP V)

4.2.1 Principais características do cimento portland

No Quadro 4, estão apresentadas suas principais características, obtidas da caracterização física e química deste cimento, conforme ficha-técnica fornecida pelo fabricante, que está no Anexo A.

Quadro 4 - Principais características do cimento portland (ARI-CP V) utilizado na produção das amostras.

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES		CPV ARI – NBR 5733/5737
		Resultado fornecido
SO ₂ (%)		4,31
MgO (%)		4,93
Massa específica (g/cm ³)		3,07
Blaine (cm ² /g)		5248
Tempo de pega (h)	Início	2:17
	Fim	3:06
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	25,4
	3 dia	38,7
	7 dia	44,8
	28 dia	52,9

Fonte: Adaptado de CIMENTO ELIZABETH.

4.2.2 Resistência Mecânica à Compressão do Cimento Portland (ARI-CP V)

Os resultados de resistência à compressão axial do Cimento Portland (CP V) em relação ao teor de quitosana com 28 dias de idade estão compilados na Tabela 6 e representados graficamente na Figura 25 (ANEXO B).

Tabela 6 - Resistência mecânica à compressão com a adição de quitosana

Quitosana (%)	(0%)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1
Resistência Mecânica à Compressão (MPa)	37,94	38,29	33,45	36,57	34,68	33,32	30,46
Desvio Padrão (%)	2,6	1,1	1,4	1,0	3,5	3,9	1,5

*Todos os valores de resistência à compressão apresentados consistem do valor médio da ruptura de três CPs.

Fonte: Própria Autoria

Observou-se que existe um valor ótimo de resistência a compressão em função da adição de quitosana, de 0,1% do biopolímero que apresentou melhor performance quanto aos valores de resistência à compressão do cimento portland CP V.

É possível que a adição de quitosana torne os resultados mais uniformes, tendo em vista que as misturas com 0,1, 0,2, 0,3 e 1% do biopolímero apresentaram desvio padrão menor que a matriz pura, sem adição do biopolímero.

Todavia, verificou-se que ocorreu diminuição de resistência com o aumento porcentagem de adição de Quitosana. Essa diminuição da resistência com o aumento do teor do biopolímero pode ser explicada através do aprisionamento de íons de cálcio pela quitosana, retardando as reações de hidratação do cimento, conforme verificado por Lasheras-Zubiate *et al.*, (2012).

Todavia, todas as amostras possuem valores de resistência mecânica à compressão dentro das especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014), que não comprometem a resistência final do concreto.

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

4.3.1 Resistência Mecânica à Compressão Axial

Os resultados de resistência à compressão axial das amostras de concreto em relação ao teor de quitosana com 7 e 28 dias de idade estão compilados na Tabela 7. A representação gráfica

da Tabela 5 pode ser vista na Figura 15, que mostram a tendência do comportamento mecânico do concreto padrão e contendo o biopolímero.

Para o concreto sem adição do biopolímero (concreto padrão), o valor médio de resistência à compressão obtido foi de 31,62 MPa aos 7 dias de idade e de 38,01 MPa aos 28 dias, conforme a Tabela 5. O concreto com adição da quitosana, obteve uma média de 32,56 MPa aos 7 dias e de 39,42 MPa aos 28.

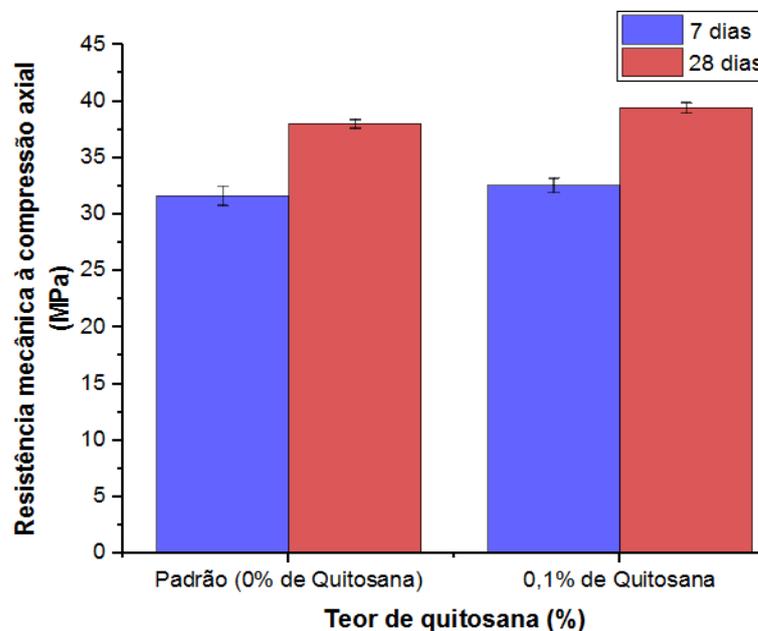
Tabela 7 - Resistência mecânica à compressão axial em relação ao teor de quitosana.

Amostra	Resistência Mecânica à Compressão (MPa)		Desvio Padrão (%)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
0% Quitosana	31,62	38,01	0,85	0,38
0,1% Quitosana	32,56	39,42	0,63	0,44

*Todos os valores de resistência à compressão apresentados consistem do valor médio da ruptura de dois e quatro corpos-de-prova para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

Fonte: Próprio autor.

Figura 15 - Resistência mecânica à compressão axial do concreto em relação ao teor de quitosana.



Fonte: Próprio autor.

Quanto ao percentual de ganho de resistência de 7 para 28 dias, para o concreto padrão foi cerca de 16,8%. Isso quer dizer que aproximadamente 83,2% de sua resistência foi

desenvolvida até os 7 dias de idade. Esta característica é esperada, visto que este tipo de cimento (ARI - CPV) utilizado possui uma alta resistência inicial, devido à sua alta área superficial e composição. Já para a amostra contendo quitosana, esse percentual de ganho de resistência foi de 17,4% entre os 7 dias de idade e os 28 dias, correspondendo um ganho de 1,2% em relação à matriz sem o biopolímero.

Provavelmente, esse comportamento deve-se a uma melhor hidratação da matriz, favorecendo uma melhor organização da microestrutura do concreto, com conseqüente diminuição da porosidade, aumentando a resistência e restringindo a propagação de fissuras.

Em relação à adição de quitosana, observou-se que, aos 7 dias de idade, as amostras da formulação de concreto com a adição do biopolímero obtiveram um pequeno aumento de resistência à compressão, cerca de 3%, em relação à amostra padrão. Esse comportamento, também, se estendeu aos 28 dias, ocorrendo um aumento de aproximadamente 3,7% da resistência do concreto contendo quitosana, em relação ao concreto padrão.

Segundo Nóbrega (2009), a quitosana é um polímero hidrofílico. Isso está relacionado à presença de grupos amina, caracterizada por ligações covalentes N-H em sua estrutura química, auxiliando na organização de moléculas de água ao redor da cadeia polimérica; e a presença de grupos acetamina. Ao adicionar a quitosana à pasta cimentícia, ocorre uma atração molecular entre as cadeias do polímero, carregadas positivamente, e as partículas de cimento, carregadas negativamente. Desta maneira, a água constituinte da pasta cimentícia passa com mais facilidade através das moléculas poliméricas da quitosana.

Assim, a melhora observada na resistência mecânica à compressão axial, a qual também foi observada por Bezerra (2006), provavelmente está relacionada à adição da quitosana no concreto, devido à sua capacidade de adsorção, parece ter possibilitado a redução da porosidade, melhorando a resistência da matriz de pasta de cimento portland, e a reduzindo a mobilidade da água, possibilitando que a distribuição dos produtos de hidratação do cimento portland no concreto ocorresse uniformemente.

4.3.2 Resistência Mecânica à Tração por Compressão Diametral

Na Tabela 8, estão compilados os resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras de concreto em relação ao teor de quitosana com 28 dias de idade, os quais estão apresentados graficamente na Figura 16.

O valor médio de resistência à tração do concreto padrão (sem adição de quitosana) foi de 3,22 MPa aos 28 dias. Já o concreto com adição do biopolímero (0,1%) obteve uma média

de 3,68 MPa. Observou-se que, as amostras de concreto com a adição do biopolímero obtiveram um aumento de resistência à tração, aproximadamente 14% em relação ao concreto padrão. Esse ganho de resistência com a adição de quitosana em matriz cimentícia, também, foi observado por Bezerra *et al.*, (2011) em seu trabalho.

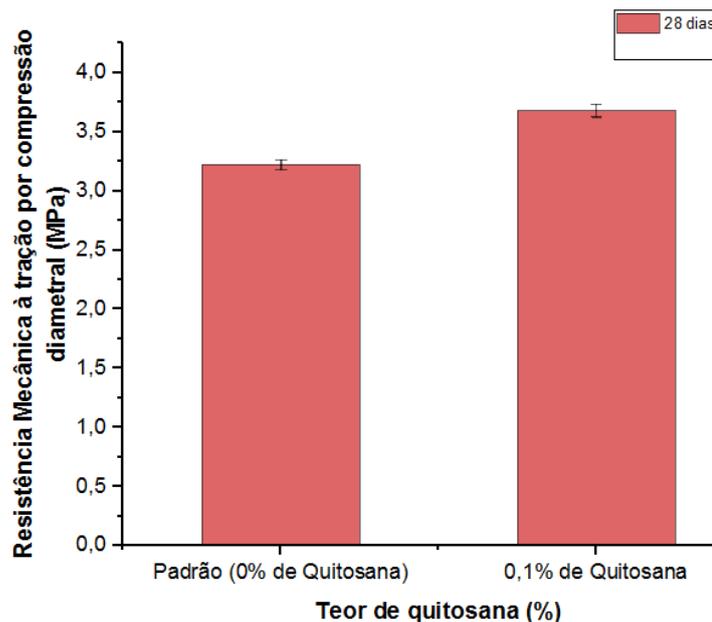
Tabela 8 - Resistência mecânica à tração na compressão diametral em relação ao teor de quitosana.

Amostra	Resistência Mecânica à Tração por Compressão diametral (MPa)	Desvio Padrão (%)
0% Quitosana	3,22	0,04
0,1% Quitosana	3,68	0,05

*Todos os valores de resistência à tração na compressão diametral consistem do valor médio da ruptura de dois corpos-de-prova de idade de 28 dias.

Fonte: Próprio autor.

Figura 16 - Resistência mecânica à tração por compressão diametral em relação ao teor de quitosana.



Fonte: Próprio autor.

Sabe-se que o valor de resistência mecânica à tração de concretos é aproximadamente 10 a 15 vezes inferior ao valor de resistência à compressão. Assim, a adição de quitosana contribuiu com o aumento de resistência mecânica à tração, colaborando com a redução da fissuração do concreto, contribuindo para uma melhor proteção quando o mesmo é utilizado na composição de concretos armados. Uma vez que a presença de fissuras no concreto

possibilita a passagem de água com sais que podem corroer as armaduras de aço (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Neste sentido, quanto menor a fissuração de um concreto melhor será o seu desempenho como protetor do aço (elemento resistente a esforços de tração e flexão em peças estruturais de concreto armado) em ambientes de elevada agressividade.

A melhora observada no comportamento mecânico do concreto contendo quitosana (0,1%) na matriz cimentícia, quando submetido a esforço de tração na compressão diametral, pode ser compreendida considerando-se que as partículas desse biopolímero podem ter absorvido parte da energia aplicada sobre este compósito e interceptarem a abertura de fissuras, possibilitando que esse material suportasse uma carga maior.

4.3.3 Módulo de Elasticidade

Na Tabela 9, estão compilados os resultados obtidos para o módulo de elasticidade das amostras de concreto em relação ao teor de quitosana, aos 28 dias de idade, os quais estão apresentados graficamente na Figura 17.

O concreto padrão (sem adição de quitosana) exibiu valor de módulo de elasticidade um pouco maior que amostra de concreto contendo o biopolímero, 25,35 GPa e 24,81 GPa, respectivamente. A adição de quitosana ao concreto propiciou uma pequena redução no módulo de elasticidade, cerca de 2%, contribuindo positivamente, uma vez que o módulo de elasticidade é reduzido, obtém-se uma matriz cimentícia menos frágil e mais ductil. Isto ocorreu, provavelmente, devido à energia que as partículas de quitosana que podem ter absorvido antes e depois da matriz de cimento portland fissurar, possibilitando que o material sofra maiores deformações antes da sua ruptura.

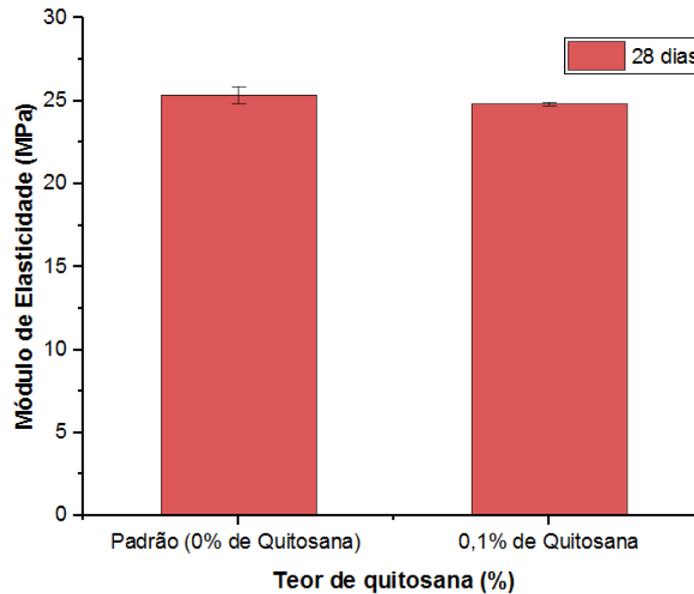
Tabela 9 - Módulo de Elasticidade em relação ao teor de quitosana.

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (%)
Amostra Padrão	25,35	0,51
0,1% Quitosana	24,81	0,11

*Todos os valores de módulo de elasticidade consistem do valor médio da ruptura de cinco (5) corpos-de-prova de idade de 28 dias.

Fonte: Próprio autor.

Figura 17 - Módulo de elasticidade do concreto em relação ao teor de quitosana.



Fonte: Próprio autor.

Foi observado que a mistura com 0,1% do biopolímero apresenta desvio padrão (0,11%) menor que a matriz pura, sem adição do biopolímero (0,51%), assim é possível que a adição de quitosana torne os resultados mais uniformes.

Portanto, a adição de quitosana ao concreto proporcionou um melhoramento ao módulo de elasticidade do compósito resultante.

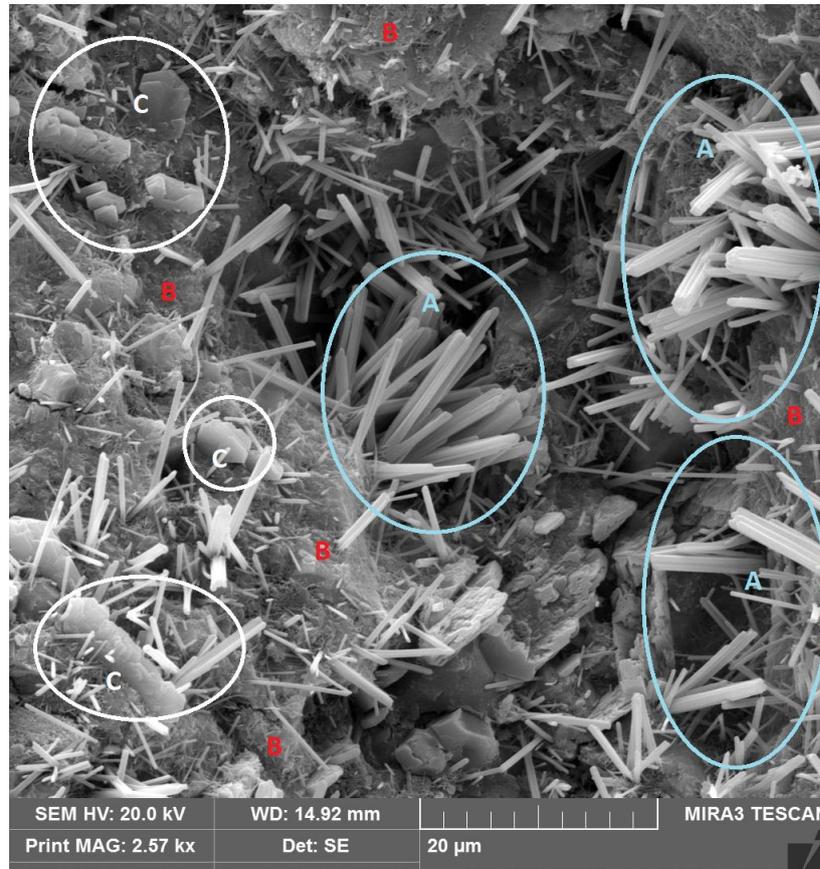
4.4 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA DO CONCRETO

4.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nas Figuras 18 e 19, estão ilustradas as morfologias, com uma ampliação de 4000x das micrografias eletrônicas de varredura das amostras de concreto padrão (referencial) e com a adição de 0,1% de quitosana, respectivamente.

Na Figura 18, é possível visualizar a presença dos principais produtos da hidratação do cimento: as agulhas de etringita (ponto A), silicato de cálcio hidratado, C-S-H (ponto B) e portlandita - hidróxido de cálcio (ponto C). Também é possível observar a presença de microfissura e vazios capilares.

Figura 18 - Micrografia eletrônica da amostra de concreto padrão (0% de Quitosana), com aumento de 4000 x. A) etringita; B) C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e C) portlandita.

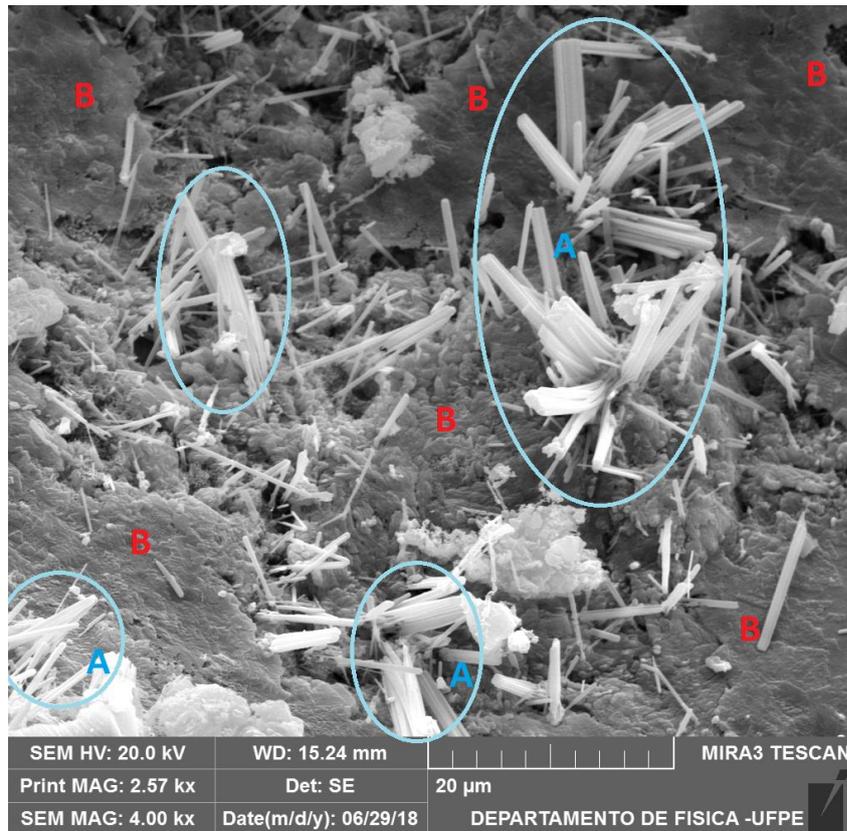


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 19, está ilustrada a micrografia da amostra com adição de 0,1% de quitosana. Nesta micrografia, pode-se visualizar o produto de hidratação do cimento, etringita. Também, é possível observar que esta amostra possui uma microestrutura diferenciada da amostra padrão, apresentando menos agulhas de etringita.

MEHTA e Monteiro (2014) relatam que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) representa a fase mais importante na determinação das propriedades da pasta de cimento hidratada, fornece a maioria da resistência e da durabilidade a longo prazo. Já os cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) comparados ao C-S-H, potencialmente sua contribuição para a resistência é limitada devido à área superficial consideravelmente mais baixa.

Figura 19 - Micrografia eletrônica da amostra de concreto com adição de 0,1% de quitosana, com aumento de 4000 x. A) etrengita; B) vazios.



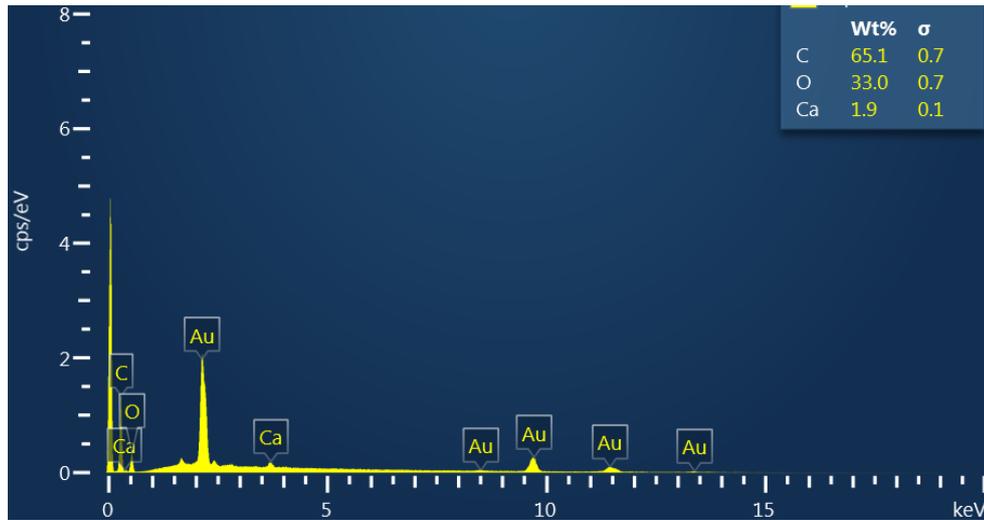
Fonte: Próprio autor.

4.4.2 Espectroscopia de raios - X por Dispersão de Energia (EDS)

Foram determinados os elementos químicos presentes nas amostras por meio da técnica de caracterização de Energia Dispersiva de raios-X (EDS) acoplada à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), obtendo a análise química qualitativa e semi-quantitativo dos elementos presentes nas amostras do compósito cimentício, apresentados por percentagem em peso (wt%). É importante ressaltar que a presença de ouro (Au) em todos os espectros de EDS é decorrente da metalização das amostras.

Na Figura 20, está ilustrado o espectro de EDS da amostra do biopolímero (quitosana). Verificou-se que no espectro de EDS desta amostra, encontram-se a presença predominante do elemento químico carbono (C), seguido de oxigênio (O), e a presença significativa de cálcio (Ca).

Figura 20 - Espectro do EDS da amostra de quitosana.

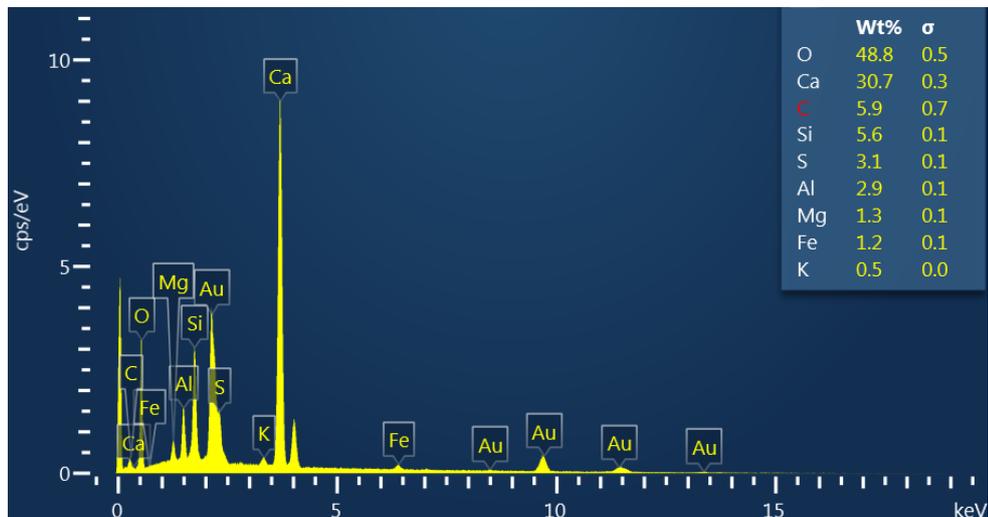


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 21 e Figura 22, estão apresentados os espectros de EDS da amostra de concreto padrão e da amostra de concreto com adição de 0,1% de quitosana, respectivamente.

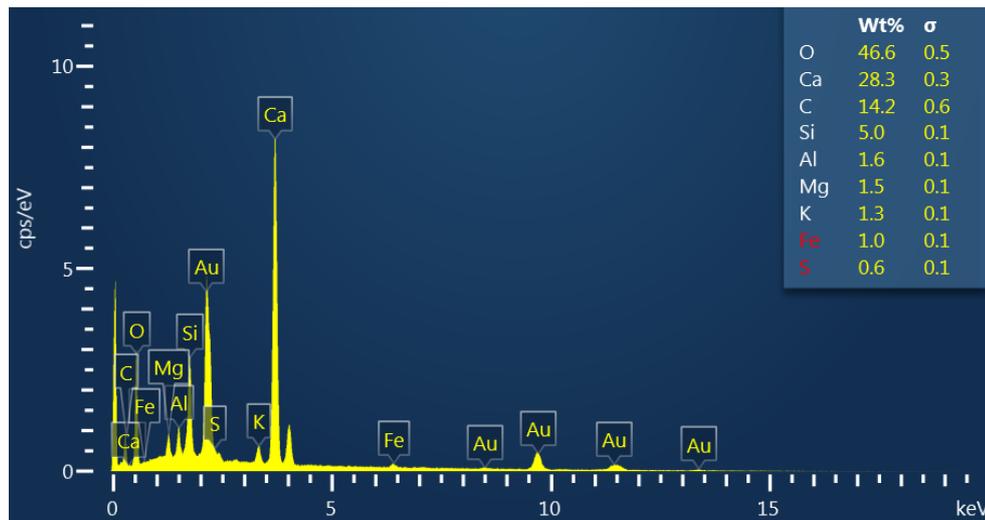
Verificou-se que em ambas as amostras (padrão e com adição de quitosana) contém os elementos químicos, oxigênio (O), cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe). Estes elementos são componentes característicos da formação dos óxidos que compõem a matéria-prima para fabricação do clínquer (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além destes elementos, os espectros de ambas as amostras revelam a presença significativa de carbono (C); e em menores proporções de enxofre (S), magnésio (Mg) e potássio (K).

Figura 21 - Espectro do EDS da amostra de concreto padrão.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Espectro do EDS da amostra de concreto com adição de 0,1% de quitosana.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 22, é possível observar que há maior quantidade de oxigênio (O) seguido de cálcio (Ca), silício (Si). Na Figura 22, o espectro da amostra com quitosana, além destes elementos característicos contém uma maior quantidade de carbono (14.2wt% C), e apresenta uma menor quantidade de enxofre (S), 0.6 wt%, em relação à amostra padrão, Figura 21.

Souza, *et al.*, (2002), mencionam que a maior intensidade de cálcio (Ca) indica a presença de cristais do silicato tricálcico alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) enquanto que a intensidade de silício indica a presença de cristais de belita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), ou, na nomenclatura especial dos cimentos Portland, C_3S e C_2S , respectivamente. Identificamos então, a presença de cristais de alita, visto que o alto teor de cálcio (Ca) apresentado nos espectros de EDS, como observado nas Figuras 21 e 22.

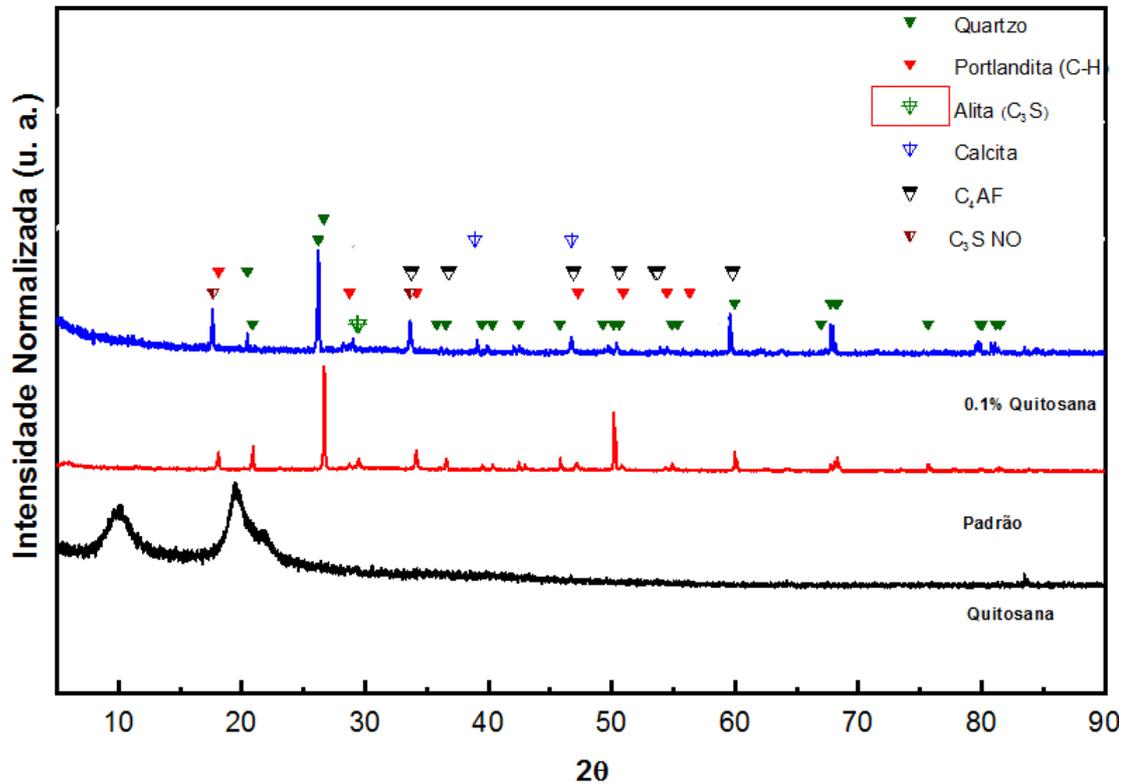
Os elementos químicos, enxofre (S), magnésio (Mg) e potássio (K), presentes nestas amostras em menores proporções, correspondem a impurezas presentes na origem geológica dos minérios constituintes do cimento portland (TAYLOR, 1997).

4.4.3 Difratomia de raios - X (DRX)

Por meio da difração de raios - X (DRX) foi possível identificar as fases formadas nas amostras de concreto: concreto padrão (referência) e concreto com 0,1% de quitosana.

Os difratogramas das amostras de concreto da amostra e de quitosana, estão ilustrados no gráfico da Figura 23.

Figura 23 - Difratomogramas das amostras de quitosana e concreto (padrão e com adição de 0,1% de quitosana).



Fonte: Próprio autor.

Observando o difratograma da quitosana verificou-se que é um biopolímero de estrutura semicristalina, em que foram identificados dois picos cristalinos de baixa definição, em $2\theta=11,14^\circ$ e $2\theta=19,76^\circ$ (planos 010 e 110, respectivamente).

O grau de desacetilação (GD) da quitosana é de 85%, conforme o relatório de especificação fornecido pela *Polymar*. A relação entre o índice de cristalinidade relativo (I_R) e o grau de desacetilação (GD) é inversa, isto é, quanto maior o grau de desacetilação, menor índice de cristalinidade (ANDRADE; LADCHUMANANANDASIVAM; NASCIMENTO, 2010).

Os difratogramas das amostras de concreto (padrão e 0,1% de quitosana) mostram a presença de uma das fases mais comuns de cimento Portland hidratado, a portlandita (hidróxido de cálcio); bem como a alita (C_3S) e ferroaluminato tetracálcio (C_4AF); além de quartzo proveniente da areia usada na mistura do concreto, e, o mineral calcita ($CaCO_3$) que é oriundo do calcário que é a matéria prima do clínquer

Observando os picos do difratograma de cada amostra de concreto, verificou-se que não foi identificado picos da quitosana na amostra de concreto que contém este biopolímero.

Todavia, na amostra que contém quitosana, foi identificada a fase silicato tricálcio oxinitreto ($C_3S ON$, na nomenclatura especial dos cimentos portland).

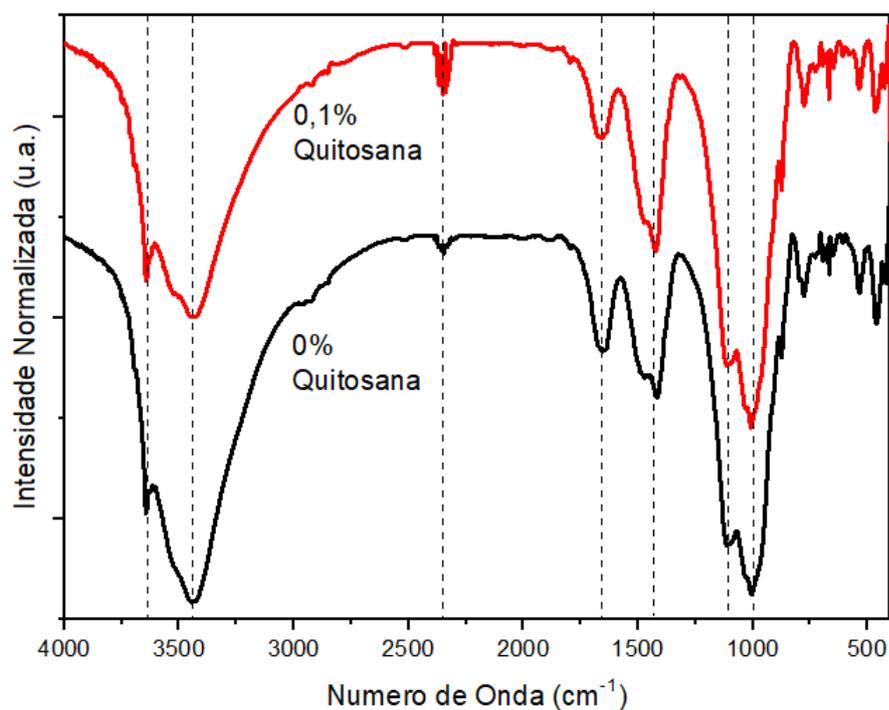
As fases identificadas no DRX confirmam os resultados químicos obtidos no espectro de EDS e na microestrutura visualizada no MEV.

4.4.4 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A análise de espectroscopia no infravermelho teve a finalidade de verificar se houve interação da pasta cimentícia com o biopolímero (quitosana).

Na Figura 24, está apresentado o espectro vibracional obtido na região do infravermelho para as amostras sem adição de quitosana e com adição de 0,1% de quitosana. É possível identificar picos ativos na amostra do concreto sem a adição do biopolímero (0% quitosana). Na região entre 3694 cm^{-1} a $3,432\text{ cm}^{-1}$ é possível observar uma banda alargada, provavelmente atribuída à unidade orientada da água de constituição do concreto. O mesmo também é observado para a amostras após a adição de quitosana.

Figura 24 - Espectro de absorção no infravermelho das amostras de concreto (padrão e com adição de 0,1% de quitosana).



Fonte: Próprio autor.

Em 2344 cm^{-1} observa-se uma mudança no perfil espectral da amostra modificada com quitosana em relação à amostra de concreto puro (0% quitosana). Este modo vibracional indica uma sutil interação da quitosana com o concreto. Nota-se que a intensidade nessa região está maior para a amostra que contém a quitosana (SILVERSTEIN; BASSLER; MORRILL, 1994).

Os demais modos vibracionais presentes no espectro, com bandas centradas em 1657 cm^{-1} , 1413 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} e 997 cm^{-1} correspondem a estiramentos e as vibrações das ligações químicas da água molecular (H_2O), bandas de carbonato (CO_3) e dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), respectivamente (FREITASI, C. *et al.*, 2009). Estas bandas não apresentam modificações em relação ao espectro da amostra sem o biopolímero (0% quitosana)

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a adição de quitosana no concreto de cimento portland e avaliação de sua influência nas propriedades mecânicas deste compósito.

Para isso realizou-se inicialmente uma investigação do melhor teor de quitosana verificando sua influencias na resistência do cimento Portland ARI-CP V. Então, verificou-se que a amostra com 0,1% do biopolímero quitosana apresentou melhor performance quanto aos valores de resistência à compressão do cimento portland CP V, e que ocorreu diminuição da resistência com o aumento porcentagem de quitosana. Todavia, todas as amostras possuem valores de resistência mecânica à compressão dentro das especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os resultados indicam que a presença de quitosana na composição do concreto proporciona modificação nas características mecânica deste compósito, no estado endurecido. As principais conclusões relacionadas à influência deste biopolímero nas propriedades mecânicas do concreto são as seguintes:

- Observou-se que, aos 7 dias de idade, as amostras da formulação de concreto com a adição do biopolímero obtiveram um aumento de resistência à compressão, cerca de 3%, em relação à amostra padrão. Esse comportamento se estendeu aos 28 dias, ocorrendo um aumento de aproximadamente 3,7% da resistência do concreto contendo quitosana, em relação ao concreto padrão.
- A adição de quitosana propiciou um aumento de 1,2% de resistência à compressão entre 7 e 28 dias de idade.
- Observou-se que, as amostras de concreto com a adição do biopolímero obtiveram um pequeno aumento de resistência à tração, aproximadamente 14% em relação ao concreto padrão.
- A adição de quitosana ao concreto propiciou uma pequena redução no módulo de elasticidade, cerca de 2%, contribuindo positivamente, uma vez que reduzindo-se o módulo de elasticidade, obtém-se uma matriz cimentícia menos frágil e mais dúctil.

Com a análise de MEV observou-se a presença de produtos de hidratação do concreto: C-S-H (silicato de cálcio hidratado), portlandita (hidróxido de cálcio) e estrengita, na amostra de concreto padrão (sem quitosana); C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e estrengita, na amostra contendo quitosana.

Por meio da análise de EDS foi possível semiquantificar e qualificar os elementos presentes nas amostras de concreto (padrão e com 0,1% de quitosana): oxigênio (O), cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), a presença significativa de carbono (C), e em menores proporções de enxofre (S), magnésio (Mg) e potássio (K). Observou-se a presença de alita em ambas as amostras, isto caracterizado pelos altos teores de cálcio (Ca) presentes em seus espectros de EDS.

Nos difratogramas das amostras de concreto (padrão e 0,1% de quitosana) foram identificadas uma das fases mais comuns de cimento Portland hidratado, portlandita (hidróxido de cálcio); a alita (C_3S) e ferroaluminato tetracálcio (C_4AF); quartzo e calcita. Observando o difratograma da quitosana verificou-se que é um biopolímero semicristalino. Também, observou-se que não foi identificado picos da quitosana na amostra de concreto que contém este biopolímero.

A análise de FTIR indica que ocorreu interação entre o concreto e o biopolímero (quitosana), conforme observado a banda da região 2344 cm^{-1} que indica uma sutil interação da quitosana com o concreto devido a intensidade nessa região está maior para a amostra que contém a quitosana.

De acordo com o objetivo do trabalho e com os resultados obtidos, conclui-se que as propriedades mecânicas avaliadas (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) foram sensíveis à incorporação do biopolímero quitosana, de maneira positiva, propiciando o melhoramento destas propriedades. Além disso, inserir esse biopolímero no setor de construção civil está aliado a benefícios ambientais com a redução de impacto ambiental, devido ao uso de matérias-primas de fonte renovável. Assim, foi observado que a quitosana é uma opção bastante promissora como adição ao concreto convencional de cimento portland.

6 PERSPECTIVAS

As perspectivas relacionadas à continuação e aprofundamento de aspectos surgidos durante a realização do presente trabalho, são:

- Realizar análises térmicas, a fim de verificar a estabilidade térmica com a adição do biopolímero;
- Verificar as propriedades mecânicas do concreto em idades superiores a 28 dias.
- Realizar testes de durabilidade do concreto: análise de absorção de água, a fim de verificar a porosidade e permeabilidade, e, análise de migração de íons cloretos no concreto, a fim de verificar a capacidade de difusão destes íons na estrutura cimentícia.

REFERÊNCIAS

ABRAM, P., 2004, Chitin e Chitosan: Obtención caracterización y aplicaciones, Pontificia Universidad Católica- Perú.

AÏTCIN , Pierre-Claude; FLATT, Robert J. **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Elsevier Ltd: São Francisco, 3ª ed, 2016, 617 p.

ALBERS, A.P.F.; MELCHIADES, F.G. ;BALDO, J.B.; BOSCHI, A.O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**,v.48, p.34, ,2002.

ANDRADE, S. M. B.; LADCHUMANANANDASIVAM, R.; NASCIMENTO, R. M. Extração e caracterização de quitina e quitosana e a sua utilização na fabricação de nanofibras. In: **VI congresso nacional de engenharia mecânica**, Campina Grande-PB, 2010.

ASHBY, M. F., JONES, D. R. H.; **Engenharia de Materiais**. Vol 2, Rio de Janeiro: Elsevier (2007) 436 p.

AZEVEDO, V. V. C.; CHAVES, S. A.; BEZERRA, D. C.; LIA FOOK, M. V.; COSTA, A. C. F. M. Quitina e Quitosana: aplicações como biomateriais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.2.3, p. 27-34, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento portland (Boletim Técnico)**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Tipos de cimento**. Disponível em: < www.abcp.org.br>. Acesso em: Julho de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Aditivos químicos para concreto**. NBR 11768, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 7222, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento Portland - Determinação da resistência mecânica à compressão**. NBR 7512, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. NBR 8522, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 5739, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova**. NBR 5738, 2ª Ed, 2015, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto – Projeto de estrutura**. NBR 6118, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

BEZERRA, U. T.; FERREIRA, R. M.; CASTRO-GOMES, J. P. The effect of latex and chitosan biopolymer on concrete properties and performance. **Key Engineering Materials**, Switzerland, v. 466, p. 37-46, 2011.

BEZERRA, U.T. Biopolymers with superplasticizer properties of concrete *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*. In: Pacheco-Torgal F, Ivanov V, Karak N, and Jonkers H (Amsterdam: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering), 2016.

Bezerra, U.T. **Compósitos Portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo**, (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Brasil, 2006.

BÍBLIA, A. T. Provérbios. In BÍBLIA. Português. **Bíblia Sagrada: Antigo e Novo Testamentos**. Tradução de João Ferreira de Almeida, Edição Revista e Atualizada, 2ª ed.. Barueri: Sociedade Bíblica do Brasil, 2014. p. 732.

BITTENCOURT, Túlio N. Estado da arte em estudos sobre estruturas de concreto para edifícios. **Concreto & Construções**, v. 76, p. 152, São Paulo, 2014.

BITTENCOURT, Túlio N. **O futuro do concreto: eficiência e desenvolvimento sustentável em foco**. 4ª ed. Especial Construção expo, 2016.

BUCKNER, C., D. **Concrete Design: for the civil PE and structural SE exams**. 2ª edição. Belmont, California: Professional Publications, 2014.

CALLISTER JR, Willam D. **Materials science and engineering: an introduction**. 8ª ed, 2010. 996 p.

CAMPANA-FILHO, et al. **Quim. Nova**, v. 30, p. 644, 2007.

Campos-Takaki GM. **The fungal versatility on the copolymers chitin and chitosan production**. In: Dutta PK, editor. Chitin and chitosan opportunities and challenges. India: International Publication; 2005.

CHEN, J.; LI, Q.; XU, J.; HUANG, Y.; DING, Y.; DENG, H., *et al.* Study on biocompatibility of complexes of collagenchitosansodium hyaluronate and cornea. **Artif Organs**, v. 29, p. 104, 2005.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura : aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre : EDIPUCRS, 2007. Disponível em <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em: 20 de jun de 2018.

FLATT, R.; ROUSSEL, R.; CHEESEMAN, C. R. Concrete: eco material that needs to be improved. *Jornal European Ceramic*, v. 32, p. 2787, 2012.

FREITASI, C. *et al.* Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. *Quím. Nova*, vol.32 n.4, São Paulo, 2009.

GOOSEN, M. E. A – “Applications of chitin and chitosan”, **Technomic Publishing Company**, Lancaster (1996).

HARRIS, Bryan. **Engineering Composite Materials**. London: The Institute of Materials, 1999. 193 p.

HASSOUN, M., Nadim.; AL-MANASEER, Alkthem. **Structural concrete: theory and design**. 6ª edição. Nova Jersey: John Wiley & Sons. 2015

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. IBRACON, São Paulo, 2010.

HOSSEINI, M. M.; SHAO, Y.; WHALEN, J. K. Biocement production from silicon-rich plant residues: perspectives and future potencial in Canada **Biosystems. Engineering**, v. 110, p. 351, 2011.

ITAMBÉ. **Apostila de ensaios de concretos e agregados**. Curitiba: Acessória Técnica Itambé, 3ª ed, 2011. 201 p.

KAW, Autar K. **Mechanics of Composite Materials**. Nova York: Taylor & Francis Group, LLC, 2ª ed, 2006. 473 p.

LASHERAS-ZUBIATE, M.; NAVARRO-BLASCO, I.; FERNANDEZ, J. M.; ALVAREZ, J. I. **J. Haz. Mat.**, p. 233-234, v. 7, 2012.

LASHERAS-ZUBIATE, M.; NAVARRO-BLASCO, I.; FERNANDEZ, J. M.; ALVAREZ, J. I. Studies on Chitosan as an Admixture for Cement-Based Materials: Assessment of Its Viscosity Enhancing Effect and Complexing Ability for Heavy Metal. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 120, p. 242–252, 2010.

MALLICK, P.K. **Fiberreinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design**. Nova Iorque: Taylor & Francis Group, LLC, 3ª ed., p. 616, 2007.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2ª ed, 2014. 748 p.

MELO, M. A. F. ; MELO, Dulce Maria de Araújo ; ARAÚJO, Romero Gomes da Silva ; MARTINELLI, A. E.. **PASTA CIMENTANTE CONTENDO QUITOSANA - PI0600628-0 A2**. 2007.

MIGNON, A.; DEVISSCHER, D.; VERMEULEN, J.; DUBRUEL, P.; VLIERBERGHE, S. V.; BELIE, N. Bio-based pH-responsive superabsorbent polymers for self-healing cracks in concrete. In: Conferência internacional de materiais, sistemas e estruturas na engenharia civil (RILEM), **Technical University of Denmark**: Lyngby, 2016. p. 177-186.

- MIRANDA, C. S; FIUZA R. P.; OLIVEIRA, J.; CARVALHO, R.F.; GUIMARÃES, D.H.; JOSÉ, .NM. Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Composites Developed from Glycerol and Dicarboxylic Acids Reinforced with Piassava Fiber. **Macromolecular Symposia**, v.319, p. 74-82, 2012.
- MEYER, C., The greening of the concrete industry, **Cement and Concrete Composites**, v.31, p. 601-605, 2009.
- MOHANASRINIVASAN, V.; MISHRA, M.; PALIWAL; J. S.; SINGH, S. K. R; SELVARAJAN, E.; SUGANTHI, E.; DEVI C, S. **Biotech** , v.4, p.167, 2013.
- NEVILLE, Adam M. **Properties of concrete**. Inglaterra: PEARSON, 5ª ed, 2011. 1267 p.
- NEVILLE, Adam M; BROOKS, Jeffrey. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: BOOKMAN, 2ª ed, 2013. 448 p.
- NÓBREGA, A.K.C. **Formulação de pastas cimentícias com adição de suspensões quitosana para cimentação de poços de petróleo**. (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Brasil, (2009).
- ORÉFICE, R. L.; PEREIRA, M. M.; MANSUR, H. S. Biomateriais; fundamentos e aplicações. 1 ed., Rio de Janeiro: **Cultura Médica**, 2006. 538 p.
- RAVI KUMAR, N.M.V. A review of chitin and chitosan applications. **Reactive & Functional Polymers**, v.46, p.1-27, 2000.
- SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 161p. Dissertação (Mestrado em estruturas), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- Senel S, McClure SJ. Potential applications of chitosan in veterinary medicine. **Adv Drug Deliv Rev**, v. 56, p. 1467, 2004.
- SILVA, F.G.S.; *et al.* Influência dos efeitos pozolânico e microfiller na resistência à compressão do concreto. 47º Congresso Brasileiro de Concreto, 2005, **Anais**, Recife: IBRACON, 2005.11p.
- SILVERSTEIN, Roberto M.; BASSLER, G. C.; MORRILL, T. C. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**, 5ª Edição, Guanabara koogan SA, 1994.
- SINGLA, A. K.; CHAWLA, M.. Chitosan: pharmaceutical and biological aspects a update. **Jornal Pharm Pharmacol** v. 53, p.1047, 2001.
- SOUZA, V.C.G.; SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L.M.M. Estudo da influência da microestrutura do clínquer sobre a moagem na fabricação de cimento: microscopia eletrônica de varredura. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 55, n. 3, p. 209-213, 2002. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rem/v55n3/v55n3a08>>. Acesso em: 31 de out de 2018.
- SUONG, V. HOA. **Principles of the Manufacturing of Composite Materials**. Pennsylvania: DEStech Publications, 1 ed, p. 352, 2009.

SPIN-NETO, R; PAVONE, C; FREITAS, R.M.; MARCANTONIO RAC, MARCANTONIO-JR, E. Chitosan based biomaterials with medical and dental application: literature review. **Rev Odontol UNESP**, v.37, p. 155-161, 2008.

TAYLOR, Harold F.W. **Cement Chemistry**. 2^a ed., Londres: Thomas Telford, 1997. 474 p.

TONHI, E.; PLEPIS, A. M. G. Obtenção e caracterização de blendas de colágeno-quitosana. **Química. Nova**, vol 25, p. 943-948, 2002.

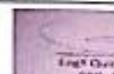
WANG, K., *et al.*, Permeability study of cracked concrete, **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 381-393, 1997.

ANEXO A - FICHA TÉCNICA DO CIMENTO PORTLAND CP V - ARI

Elizabeth CIMENTOS												SELO DA QUALIDADE			
Avaliação - Ensaios do Cimento Expedido - Granel												NBR 7215/1997			
TIPO/CLASSE: CPV-ARI - NBR 5733/5737												RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 7215/1997			
ENSAIOS QUÍMICOS						ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS						RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 7215/1997			
DIA/MÊS	P.F - Perda ao Fogo	R.I - Res. Insolúvel	SO ₃ (Trifóxido de Enxofre)	MgO - Óxido de Magnésio	# 0,075mm (#200)	# 0,044mm (#325)	Blaine	Massa Específica	Início de Pega	Fim de Pega	Expans.	1 Dia ≥ 14 Mpa	3 Dias ≥ 24 Mpa	7 Dias ≥ 34 Mpa	28 Dias ≥ (NA)
	NM 18/12	NM 15/12	NBR 14656/01		12826/14		NBR 16372/15	NM 23/01	NM 65/03	NM 65/03	11582/12	MÍNIMO INTERNO ESPECIFICADO(Mpa)			
	≤ 4,50 %	≤ 1,00 %	≤ 4,5	≤ 6,50	≤ 12,0 %	N.A (%)	≥ 3000 Cm ² /g	g/cm ³	≥ 1 h	≤ 10 h	≤ 5 mm	≥ 24	≥ 37	≥ 44-46	≥ 52
06/11/2017	3,76	0,53	4,35	4,96	0,1	0,8	5160	3,07	2:30	3:15	0,0	24,7	40,5	45,0	52,2
07/11/2017	3,76	0,47	4,39	5,03	0,1	0,9	5050	3,07	2:30	3:15	0,0	24,6	37,7	45,5	52,5
09/11/2017	3,99	0,56	4,28	4,97	0,1	0,8	5220	3,07	2:30	3:15	0,0	24,6	38,3	44,4	52,6
11/11/2017	4,13	0,56	4,29	5,00	0,1	0,8	5260	3,07	2:30	3:15	0,0	27,0	40,2	44,1	52,0
13/11/2017	3,97	0,45	4,40	5,14	0,1	0,9	5290	3,07	2:25	3:15	0,0	26,8	42,0	45,7	52,1
14/11/2017	4,16	0,57	4,38	5,17	0,1	0,8	5260	3,07	2:25	3:15	0,0	26,6	39,6	45,5	52,5
16/11/2017	3,92	0,45	4,34	5,28	0,1	0,9	5200	3,07	2:30	3:15	0,0	24,6	39,1	46,0	52,6
17/11/2017	4,20	0,47	4,26	5,22	0,1	0,9	5110	3,07	2:30	3:15	0,0	24,6	38,4	44,7	52,5
22/11/2017	3,97	0,66	4,24	5,42	0,1	0,8	5080	3,07	2:25	3:00	0,0	24,7	38,2	45,4	52,2
24/11/2017	3,95	0,80	4,21	5,31	0,1	0,9	5180	3,07	2:25	3:15	0,0	24,4	39,7	44,3	53,4
27/11/2017	4,01	0,74	4,24	5,38	0,1	0,9	5210	3,07	2:20	3:15	0,0	24,5	40,2	44,2	53,1
30/11/2017	3,98	0,74	4,19	5,05	0,1	0,7	5230	3,07	2:25	3:30	0,0	24,7	37,6	44,4	52,6
05/12/2017	4,15	0,62	4,26	4,95	0,1	0,8	5040	3,07	2:15	3:00	0,0	24,9	38,8	44,2	53,7
07/12/2017	4,13	0,67	4,32	4,72	0,1	0,9	4990	3,07	2:15	3:00	0,0	24,4	37,2	44,5	52,3
13/12/2017	4,28	0,73	4,36	5,09	0,1	0,8	5230	3,07	2:15	3:15	0,0	24,6	37,1	44,7	53,3
15/12/2017	4,08	0,81	4,26	4,93	0,2	1,1	5100	3,07	2:10	3:00	0,0	24,6	37,9	44,1	54,3
19/12/2017	4,15	1,00	4,32	4,76	0,1	1,0	5330	3,07	2:10	3:00	0,0	25,0	38,3	44,0	53,2
22/12/2017	4,12	0,89	4,39	4,44	0,1	0,9	5400	3,07	2:10	3:00	0,0	24,6	38,8	44,6	53,9
26/12/2017	4,16	0,78	4,40	4,99	0,1	0,9	5270	3,07	2:05	3:00	0,0	25,6	37,2	44,6	53,7
29/12/2017	4,40	0,77	4,46	4,82	0,1	0,9	5200	3,07	2:10	3:15	0,0	26,4	38,8	44,1	54,1
03/01/2018	4,00	0,86	4,23	3,49	0,1	0,8	5320	3,07	2:15	3:00	0,0	26,1	38,3	44,7	
06/01/2018	4,40	0,86	3,99	3,36	0,1	0,9	5450	3,07	2:20	3:15	0,0	26,6	37,6	44,5	
10/01/2018	4,16	0,98	4,22	4,44	0,1	0,8	5450	3,07	2:05	2:45	0,0	26,2	37,5	44,2	
12/01/2018	3,85	0,99	4,44	5,47	0,1	0,9	5470		2:00	2:45	0,0	27,1	38,7	45,7	
17/01/2018	3,87	0,89	4,38	5,54	0,1	0,9	5410		2:00	2:45	0,0	26,9	39,4	46,8	
18/01/2018	4,02	0,90	4,44	5,07	0,1	0,8	5550		2:00	3:00	0,0	25,7	39,5		
MÉDIA	4,06	0,74	4,31	4,93	0,1	0,9	5248	3,07	2:17	3:06	0,0	25,4	38,7	44,8	52,9
MÍNIMO	3,76	0,45	3,99	3,36	0,1	0,7	4990	3,07	2:00	2:45	0,0	24,4	37,1	44,0	52,0
MÁXIMO	4,40	1,00	4,46	5,54	0,2	1,1	5550	3,07	2:30	3:30	0,0	27,1	42,0	46,8	54,3
DESVPAD.	0,17	0,18	0,10	0,52	0,02	0,08	145	0,00	0:10	0:11	0,0	0,98	1,19	0,72	0,72


 João Wilson S. Santos
 Coordenador do Controle de Qualidade

Alhandra-PB, 25 de Janeiro de 2018


 Gerente da Fábrica Elizabeth Cimentos



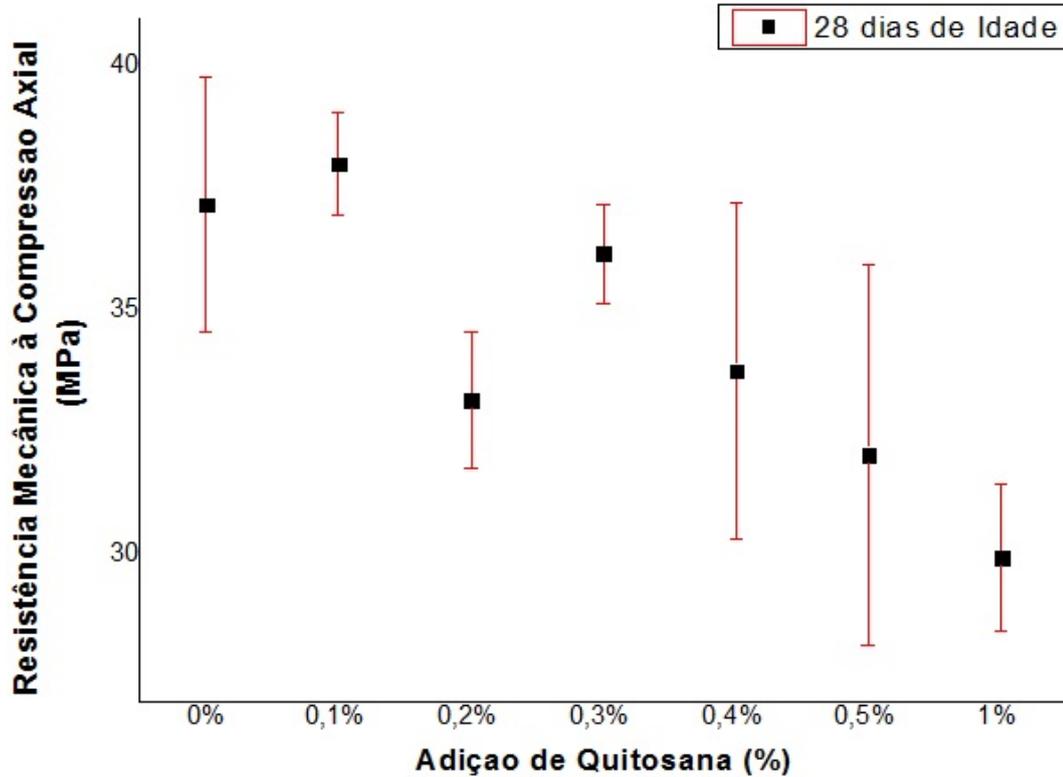
Av. Gleba Andreza Mucatu, S/N, Lote Parcela 4A
 Zona Rural - Alhandra - PB - Brasil | CEP 58320-000
 Fone/Fax: 55 (83) 3565.5001 | grupoelizabeth.com.br

**Bom pra obra.
 Bom pra vida.**

Fonte: Elizabeth Cimentos, 2018.

ANEXO B - RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COMPOSTA POR CIMENTO PORTLAND (CP V) COM ADIÇÕES DE QUITOSANA

Figura 25 - Resistência mecânica à compressão em relação à adição de quitosana.



Fonte: Própria Autoria