



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - CAMPUS MOSSORÓ
CENTRO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MATEUS ICARO PITOMBEIRA NORONHA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND PELA
CINZA DA CASCA DE ARROZ

MOSSORÓ - RN

2018

MATEUS ICARO PITOMBEIRA NORONHA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND PELA
CINZA DA CASCA DE ARROZ**

Monografia apresentada ao conselho do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes - UFERSA

MOSSORÓ - RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N852a Noronha, Mateus Icaro Pitombeira.
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO
COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGLOMERANTE CIMENTO
PORTLAND PELA CINZA DA CASCA DE ARROZ / Mateus
Icaro Pitombeira Noronha. - 2018.
86 f. : il.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2018.

1. Sustentabilidade. 2. Concreto. 3. Cinza da
casca de arroz. 4. Correli_Q4. I. Codes, Rodrigo
Nogueira de, orient. II. Título.

MATEUS ICARO PITOMBEIRA NORONHA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND PELA
CINZA DA CASCA DE ARROZ.**

Monografia apresentada ao conselho do curso
de Engenharia Civil da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA, como
requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

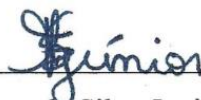
APROVADA EM: 17 / 04 / 2018

BANCA EXAMINADORA



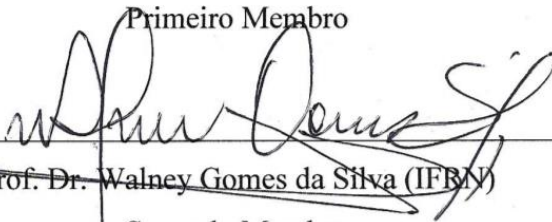
Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes (UFERSA)

Presidente



Prof. Dr. Francisco Alves da Silva Junior (UFERSA)

Primeiro Membro



Prof. Dr. Walney Gomes da Silva (IFBA)

Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus pelo dom da vida. Sou grato ao Senhor por sempre conduzir minha caminhada, me dando forças necessárias para conquistar meus objetivos. Agradecer também pela saúde e família

Aos meus pais, José Noronha de Andrade e Jacinta Maria Pitombeira de Assis, por sempre me darem todo o auxílio necessário e me incentivarem a vencer na vida. Aos meus irmãos, Jéssica Furtado e Vinícios Noronha, que mesmo estando longe de mim, sempre me deram total apoio para conquistar meus objetivos.

Um agradecimento especial à minha tia Joceli, não tenho palavras para descrever o meu agradecimento, carinho e respeito que sinto pela senhora. Muito obrigado por sempre participar e se esforçar para fazer da minha vida ser especial. Agradecer a minha avó Mundica (*in memoriam*) por suas orações e por sempre me proporcionar uma vida melhor.

Quero agradecer a minha namorada Lara Hannyella que sempre me instigou aos estudos, mostrando o quanto posso ganhar com eles. Agradecer por sempre me aconselhar e me incentivar para vencer os momentos difíceis em minha vida.

Gostaria de agradecer ao Professor Dr. Rodrigo Nogueira de Codes pela orientação e oportunidade concedida para a busca de conhecimento nessa pesquisa. Obrigado por passar o seu valioso conhecimento, sendo crucial para o desenvolvimento do trabalho. Agradecer por todo o tempo aplicado em nossa pesquisa, foi uma prazer trabalhar com o senhor.

Agradecer à Universidade Federal Rural do Semi-Árido pela oportunidade de realização do curso de engenharia civil, um grande sonho de infância. Agradecer também aos docentes que participaram diretamente da minha formação, sem o conhecimento de vocês essa conquista jamais seria alcançada. Agradecer de forma carinhosa a técnica do laboratório Rudna Angélica que sempre foi muito prestativa, me o máximo de auxílio possível para a formação desta pesquisa.

Agradecer ao técnico Valteson da Silva na qual também contribuiu significativamente para o progresso desta pesquisa, por sempre está disposto a me auxiliar no que fosse necessário, pela grande atenção que foi me dada. Agradecer também ao IFRN, campus Mossoró, por ter cedido seus equipamentos e instalações.

Ao meu grande amigo Abdias Celedonio por todo o auxílio prestado para que fosse possível a realização do trabalho, sendo uma peça fundamental para que se atingisse o objetivo da pesquisa. Muito obrigado pelo companheirismo.

Agradecer à Jamille Maia por sua amizade muito especial. Obrigado pelo seu companheirismo, você foi muito importante na caminhada para a realização da minha graduação.

Agradeço a todos os meus queridos amigos que tive o prazer de conhecer e conviver durante a graduação, Natanael Ferreira, Gian Cleiton, Danilo Maia, Eduardo Maurício, Jonathan Marcelino Diogo Lima, Rafael Carvalho, Ivo Júnior, e vários outros que participaram desta caminhada.

E por fim, agradecer aos Professores Drs. Francisco Alves da Silva Júnior e Walney Gomes da Silva por aceitar o convite para participar da banca examinadora.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND PELA CINZA DA CASCA DE ARROZ

Mateus Icaro Pitombeira Noronha

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes

RESUMO

Devido ao desenvolvimento social acelerado, e por consequência, o aumento da demanda por moradias, obras de infraestruturas e desenvolvimento industrial, o segmento da construção civil vem consumindo uma grande quantia de recursos naturais disponíveis, além de produzir uma grande quantidade de resíduos que, na maioria dos casos, não possuem destinação correta. Por conta disso, muitos pesquisadores investigam a possibilidade da utilização de resíduos industriais no ramo da construção civil como uma alternativa para amenizar os impactos ambientais. Avaliando esse contexto, a presente pesquisa busca analisar os efeitos que a incorporação de cinza de casca de arroz (CCA), em substituição parcial pelo cimento Portland, pode ocasionar no concreto. Para tal análise, foram confeccionados 11 amostras cilíndricas (10 cm de diâmetro por 20 cm de altura) de concreto para a dosagem referência e mais 11 corpos de prova para cada mistura investigadas, que foram 5% CCA M e 10% CCA M. Estes foram submetidos aos ensaios de absorção de água e índice de vazios aos 28 dias de cura e compressão axial aos 28 e 91 dias de cura, sendo aplicado simultaneamente a este ensaio, o método da correlação digital de imagens para se obter campos de deslocamentos e deformação das amostras quando estavam submetidos a determinadas tensões ao longo do ensaio. Com as referentes análises foi possível verificar que a substituição parcial do cimento Portland pela cinza da casca do arroz (CCA), cedida pela Cooperativa Central Agropecuária dos Irrigantes do Vale do Banabuiú Limitada (CIVAB), é possível observar a viabilidade por conta da influência positiva que a adição da CCA proporcionou na resistência à compressão simples, e na absorção de água e índice de vazios.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Concreto. Cinza da casca de arroz. Correli_Q4^{LMT}.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Idealização do ciclo do arroz para não gerar resíduos.	11
Figura 2: Elemento submetido a um carregamento axial.	13
Figura 3: Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil (aço) (não está em escala).	15
Figura 4: Comportamento linear na região elástica do diagrama tensão-deformação.	17
Figura 5: Comportamentos típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto.	17
Figura 6: Diferentes tipos de módulo de elasticidade no gráfico tensão-deformação.	18
Figura 7: Comparação de ZOI da imagem original com a transformada.	20
Figura 8: Casca de arroz.	24
Figura 9: Resultados da análise de DRX em amostras de CCA.	26
Figura 10: Resistência à compressão axial de dosagens de concreto.	28
Figura 11: Relação entre o teor de substituição do cimento Portland por CCA e resistência à compressão.	29
Figura 12: Relação entre o teor de substituição do cimento por CCA e o módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522:2008).	30
Figura 13: Enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202:2005.	31
Figura 14: Ensaio do cimento Portland com o frasco “Le Chatelier”.	32
Figura 15: Aparelho de permeabilidade Blaine.	33
Figura 16: Cinza da casca de arroz – CCA.	34
Figura 17: Moinho de bolas (esquerda) e quantidade de bolas utilizadas na moagem (direita).	35
Figura 18: CCA na condição natural (esquerda) e CCA na condição moída (direita).	35
Figura 19: Ensaio da cinza da casca de arroz com o frasco de “Le Chatelier”.	36
Figura 20: Mistura da dosagem B através da argamassadeira.	37
Figura 21: Processo para determinação da granulometria – Agregado miúdo.	39
Figura 22: Aditivo superplastificante utilizando na pesquisa.	40
Figura 23: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, <i>Slump Test</i>	41
Figura 24: Processo de adensamento mecânico das misturas de concreto.	43
Figura 25: Esquema da montagem dos equipamentos.	45
Figura 26: Texturização na superfície do corpo de prova.	46

Figura 27: Delimitação da região de interesse ROI.....	47
Figura 28: Representação da zona de interesse ZOI com resolução de 64 <i>pixels</i> , dentro da ROI.	48
Figura 29: <i>Print Screen</i> da página representativa do comando <i>Visualization</i>	49
Figura 30: <i>Gauge</i> aplicado em um corpo de prova.....	50
Figura 31: Corpos de prova submetidos à fervura.....	52
Figura 32: DRX da amostra de CCA após tratamento físico.....	54
Figura 33: Curva Granulométrica – Agregado Miúdo.	57
Figura 34: Curva Granulométrica – Agregado Graúdo.	58
Figura 35: Representação gráfica dos valores de resistência à compressão.	59
Figura 36: Diagramas tensão-deformação para as amostras da dosagem referência.....	61
Figura 37: Campos de deslocamentos na direção 1 para o REF - 1 (C).	62
Figura 38: Campos de deformação na direção 1 para o REF - 1 (C).	63
Figura 39: Carta de erro para o REF - 1 (C).	64
Figura 40: Diagramas tensão-deformação para as amostras da dosagem 5% CCA M.	65
Figura 41: Campos de deslocamentos na direção 1 para o 5% M - 3 (C).	66
Figura 42: Campos de deformação na direção 1 para o 5% M - 3 (C).	67
Figura 43: Carta de erro para o 5% M - 3 (C).	68
Figura 44: Diagramas tensão-deformação para as amostras da dosagem 10% CCA M.	69
Figura 45: Campos de deslocamentos na direção 1 para o 10% M - 3 (C).	70
Figura 46: Campos de deformação na direção 1 para o 10% M - 3 (C).	71
Figura 47: Carta de erro para o 10% M - 3 (C).	72
Figura 48: Análise comparativa entre o módulo de elasticidade tangente de cada dosagem. ..	73
Figura 49: Valores de absorção e índice de vazios, em porcentagem, para as dosagens investidas.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de CCA, segundo vários autores.	25
Tabela 2: Traço unitário – Concreto referência.	40
Tabela 3: Valores de abatimento de tronco de cone, em centímetros.	41
Tabela 4: Quantidade de materiais para 1 m ³ de concreto de cada dosagem.	42
Tabela 5: Nomeação dos corpos de provas ensaiados.	44
Tabela 6: Parâmetros empregados na correlação digital de imagens.	47
Tabela 7: Características físicas – cimento Portland.	53
Tabela 8: Características físicas – CCA.	53
Tabela 9: Resultado referente ao IAP da CCA estudada.	55
Tabela 10: Curva granulométrica – Agregado miúdo.	56
Tabela 11: Características físicas – Agregado miúdo.	56
Tabela 12: Curva granulométrica – Agregado Graúdo.	56
Tabela 13: Características físicas – Agregado Graúdo.	57
Tabela 14: Resultado de resistência à compressão aos 28 dias de cura.	58
Tabela 15: Resultado de resistência à compressão aos 91 dias de cura.	59
Tabela 16: Resultado de módulo de elasticidade tangente para a dosagem referência.	61
Tabela 17: Resultado de módulo de elasticidade tangente para a dosagem 5% CCA M.	65
Tabela 18: Resultado de módulo de elasticidade tangente para a dosagem 10% CCA M.	69
Tabela 19: Resultado médio do módulo de elasticidade tangente de cada dosagem.	73
Tabela 20: Intervalo de valores para o módulo de elasticidade tangente de cada dosagem.	74
Tabela 21: Resultado de absorção de água e índice de vazios para as dosagens investigadas.	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 CONCEITOS BÁSICOS	13
2.1.1 Tensão e deformação	13
2.1.1.1 Diagrama tensão-deformação	14
2.1.2 Lei de Hooke	16
2.2 EXTENSOMETRIA ÓPTICA POR CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS.....	19
2.3 CONCRETO.....	21
2.3.1 Conceito	21
2.3.2 Propriedades	21
2.3.2.1 Concreto fresco.....	21
2.3.2.2 Concreto endurecido.....	22
2.4 CONCRETO SUSTENTÁVEL.....	23
2.4.1 Cinza da casca de arroz (CCA)	23
2.4.1.1 Características da CCA.....	25
2.4.1.2 CCA como adição mineral no concreto.....	27
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	32
3.1.1 Cimento Portland	32
3.1.2 Cinza da casca de arroz – CCA.....	33
3.1.2.1 Tratamento físico na CCA.....	34
3.1.2.2 Caracterização física.....	36
3.1.2.3 Caracterização mineralógica.....	37
3.1.2.4 Determinação do índice de atividade pozolânica (IAP)	37
3.1.3 Agregado miúdo e graúdo.....	38
3.1.4 Água de amassamento	39
3.1.5 Aditivo superplastificante	39

3.2	DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO.....	40
3.3	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	42
3.3.1	Moldes para corpo de prova	42
3.3.2	Confecção dos corpos de prova	42
3.4	SEQUÊNCIA DE ENSAIOS	44
3.4.1	Ensaio de resistência à compressão axial	44
3.4.2	Correlação digital de imagens	44
3.4.2.1	Procedimentos metodológicos da análise	45
3.4.3	Ensaio de absorção e índice de vazios.....	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	53
4.1.1	Cimento Portland	53
4.1.1.1	Caracterização física.....	53
4.1.2	Cinza da casca de arroz – CCA.....	53
4.1.2.1	Caracterização física.....	53
4.1.2.2	Caracterização mineralógica.....	54
4.1.2.3	Índice de atividade pozolânica (IAP)	55
4.1.3	Agregado graúdo e miúdo.....	55
4.1.3.1	Caracterização física.....	55
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	58
4.3	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS	60
4.3.1	Dosagem referencial	61
4.3.2	Dosagem 5% CCA M	65
4.3.3	Dosagem 10% CCA M	69
4.3.4	Análise comparativa	73
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS.....	75
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA	80

1. INTRODUÇÃO

O segmento da construção civil é uma prática essencial para a economia do país, sendo este responsável por consumir uma quantia considerável de produtos industrializados e recursos naturais, além de necessitar de mão de obra, especializada ou não, para serviços essenciais em sua cadeia produtiva.

O desenvolvimento social da população pode ser considerado um fator que justifica a importância da construção civil na economia de um país, já que a demanda social por moradias, obras de infraestrutura e desenvolvimento industrial são aspectos basicamente dependentes deste segmento. Entretanto, este desenvolvimento acelerado na qual a sociedade está inserida além de exigir uma grande quantidade de recursos naturais, é responsável pela geração de resíduos, ocasionando impactos ao meio ambiente.

Dessa forma, na tentativa de minimizar os impactos ambientais provocados pela construção civil, surge o padrão da construção sustentável. Torna-se cada vez mais essencial a procura por materiais alternativos de construção com menor energia agregada, menor consumo de matéria-prima, além de se explorar a utilização de resíduos, evitando com isso o descarte deste ao meio ambiente.

Avaliando essa ideia, surge a cinza da casca de arroz (CCA), uma cinza residual oriunda da queima da casca de arroz realizada em processos produtivos da agroindústria. De acordo com a SOSBAI (2016), o arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo. A produção de aproximadamente 741,0 milhões de toneladas de grãos em casca corresponde a 29% do total de grãos usados na alimentação humana. Por conta da alta produtividade desse grão e por ser necessário realizar um beneficiamento (processo de separação do grão do arroz de sua casca) neste material para que seja possível o consumo, tem-se a geração de uma quantidade considerável de resíduo na forma de casca.

Uma solução adotada pela agroindústria para o não descarte da casca de arroz no meio ambiente é a sua utilização como fonte alternativa para a produção de energia (calor) a ser empregada no processo de parboilização do arroz. Em média, cada tonelada de arroz produz cerca de 200 Kg de casca de arroz, o que na combustão completa leva a 40 Kg de CCA (ZERBINO, GIACCIO E ISAIA, 2011).

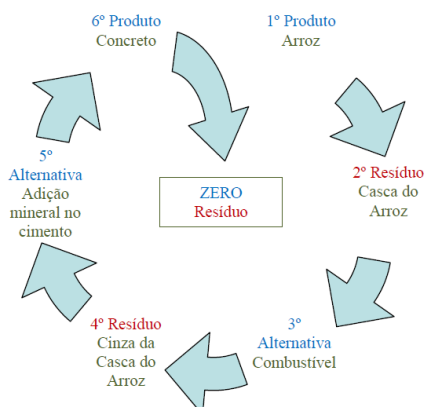
No entanto, a viabilidade de incorporação desta cinza mineral no concreto é dependente da sua atividade pozzolânica, ou seja, a CCA deve apresentar características físicas e químicas adequadas para que ocorra as reações pozzolânicas. Conforme Duarte (2008) e Meira (2009) a

cinza da casca de arroz (CCA) pode se tornar, dependendo do seu processo de queima e moagem, uma pozolana bem reativa e com isso ser usada no concreto, em substituição parcial do cimento, já que esta reage na presença de água com o Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) liberado no processo de hidratação do cimento formando compostos cimentantes, podendo resultar em concretos com características superiores de resistência e/ou durabilidade ao concreto com 100% de cimento Portland.

No que diz respeito aos benefícios desta incorporação não relacionado a propriedade mecânica, podemos citar a redução da emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente. De acordo com Tutikian e Helene (2011), uma economia de 5 kg de cimento por m^3 poderia acarretar uma redução da emissão de 100.000t de dióxido de carbono (CO_2) à atmosfera. Portanto, é possível a partir de adições minerais fazer do concreto um material menos prejudicial ao meio ambiente segundo a perspectiva ecológica, já que a incorporação de CCA em concreto pode ocasionar na redução de um consumo de cimento Portland, o qual é responsável por grandes emissões de dióxido de carbono (CO_2). Além disso, ressalta que o uso apropriado deste resíduo como material de construção alternativo em misturas de concreto, ajuda na redução do descarte inapropriado deste resíduo no meio ambiente.

Portanto, em virtude da cinza de casca de arroz (CCA) possuir um potencial para ser tornar um bom aglomerante através das reações pozolânicas, a referente pesquisa consiste de uma revisão bibliográfica associada a práticas experimentais em laboratórios com a finalidade de atestar a viabilidade técnica da incorporação de uma CCA, obtida sem controle de combustão, em misturas de concreto. Se a viabilidade técnica for comprovada poderemos obter, conforme Trindade (2011), um processo produtivo para o grão de arroz livre da geração de resíduos (Figura 1).

Figura 1: Idealização do ciclo do arroz para não gerar resíduos.



Fonte: TRINDADE, 2011.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

A presente pesquisa possui como objetivo geral analisar o comportamento mecânico de dosagens de concreto onde, serão realizadas substituições parciais, em porcentagem, do aglomerante convencional cimento Portland pela cinza da casca de arroz (CCA), e com isso analisar uma possível viabilidade de utilização deste resíduo no concreto.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a caracterização dos materiais que serão empregados na pesquisa, em essencial a cinza da casca de arroz (CCA), para que seja possível a determinação das dosagens de concreto;
- Avaliar o comportamento da cinza da casca de arroz, após esta ser submetida ao tratamento físico proposto na metodologia, quanto a sua superfície específica, ou seja, ao grau de finura;
- Interpretar o comportamento das dosagens de concreto, quanto a absorção de água e índice de vazios, com a substituição parcial do aglomerante convencional cimento Portland por cinza da casca de arroz;
- Analisar o comportamento das dosagens de concreto, quanto à resistência a compressão simples, com a substituição parcial do aglomerante convencional cimento Portland por cinza da casca de arroz;
- Confrontar os comportamentos apresentados pelos ensaios realizados do concreto com 100% de cimento Portland em seu traço, com os que possuem porcentagens de cinza da casca de arroz em sua composição.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

2.1.1 Tensão e deformação

O conceito de tensão está associado diretamente a presença de um carregamento externo aplicado a um elemento. Considerando uma secção de uma peça mecânica submetida a um carregamento externo e com restrições ao deslocamento, é observado o surgimento de uma distribuição de forças internas por unidade de área da secção transversal (Figura 2). A intensidade desta reação, que age perpendicularmente à uma determinada unidade de área, é denominada de tensão normal (Equação 1) (HIBBELER, 2010).

$$\sigma = P/A \text{ (Equação 1)}$$

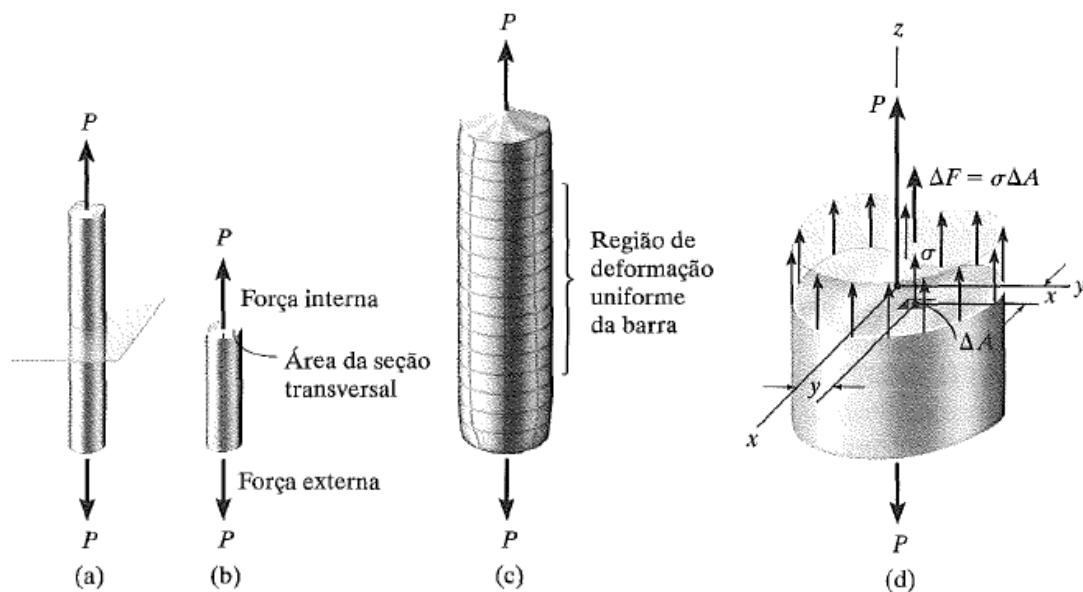
Onde:

σ : tensão normal média em qualquer ponto na área da secção transversal;

P : força normal interna resultante, que é aplicada no centroide da área da secção transversal;

A : área da secção transversal da barra.

Figura 2: Elemento submetido a um carregamento axial.



Fonte: HIBBELER, 2010.

Além de tensão interna, a aplicação de um carregamento externo a uma peça pode ocasionar deformações nela, ou seja, promover mudanças de forma e/ou tamanho. Hibbeler (2010) define deformação normal com sendo o alongamento ou contração de um segmento de reta por unidade de comprimento devido a aplicação de uma carga axial, sendo esta determinada pela Equação 2. Por consequência, quando ϵ for positivo, significa que o elemento sofreu um alongamento (peça tracionada). Quando o ϵ for negativo significa que o elemento sofreu uma contração (peça comprimida).

$$\epsilon_{\text{méd}} = (\Delta s' - \Delta s) / \Delta s \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

$\epsilon_{\text{méd}}$: deformação normal média;

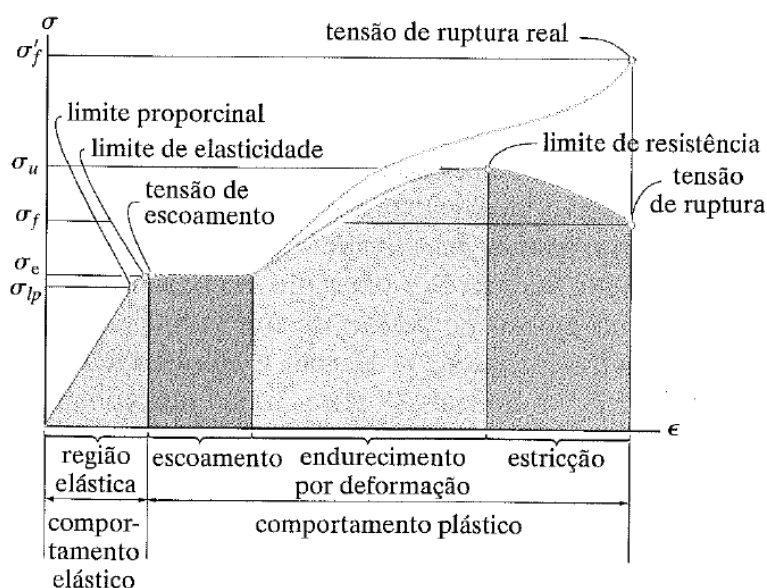
$\Delta s'$: comprimento final;

Δs : comprimento inicial.

2.1.1.1 Diagrama tensão-deformação

O diagrama tensão-deformação é caracterizado por uma curva obtida através da plotagem dos dados de tensão nominal e deformação nominal, sendo estes oriundos de um ensaio de compressão ou tração realizado em um determinado corpo de prova. Deste diagrama, é possível obter informações importantes do material, tais como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, se o material é dúctil ou frágil. A Figura 3 apresenta um diagrama tensão-deformação característico do aço, onde podemos observar 4 fases distintas de comportamento do material quando este submetido ao ensaio de tração.

Figura 3: Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil (aço) (não está em escala).



Fonte: HIBBELER, 2010.

Destaca-se deste gráficos alguns estágios importantes, que são: região elástica, escoamento, endurecimento por deformação e estricção.

Na região elástica, o material possui um comportamento totalmente linear elástico, ou seja, a sua tensão vai ser proporcional a deformação até que este atinja o limite de proporcionalidade. Ainda nessa região, quando um corpo de prova é carregado acima do limite de elasticidade, o mesmo não possui mais a capacidade de retornar a sua configuração inicial ao ser descarregado. Ou seja, acima deste ponto passam a existir deformações permanentes ou plásticas.

O estágio de escoamento é caracterizado pelo colapso do material, fazendo com que ele se deforme permanentemente. Este comportamento ocorre quando a tensão de escoamento é atingida. Um comportamento a se destacar nessa região é o estado denominado perfeitamente elástico, onde, após o ponto de escoamento ser atingindo, o corpo de prova continuará a deforma-se sem que haja qualquer aumento na carga aplicada.

Após o término do escoamento, acontece na região de endurecimento por deformação um crescimento continuamente da curva devido a uma carga adicional ser aplicada no corpo de prova. Devido ao aumento de carga, a curva continua a crescer até que a tensão máxima denominada limite de resistência é atingida. Vale ressaltar que até se atingir o limite de resistência, a secção transversal do corpo de prova vinha sendo diminuída uniformemente.

No último estágio do gráfico, na região de estricção, quando o limite de resistência é atingido, a área da secção transversal começa a reduzir em uma região localizada do corpo de prova. Devido a isso, o corpo de prova só consegue suportar uma tensão decrescente, tendendo o diagrama de tensão-deformação curva-se para baixo até que o corpo de prova ensaiado se quebre quando atingir o limite de ruptura.

2.1.2 Lei de Hooke

Levando em consideração um corpo sólido que exibe uma relação linear entre tensão (σ) e deformação (ϵ) dentro da região elástica, a lei de Hooke basicamente relaciona que um aumento na força provoca um aumento proporcional na deformação.

Segundo Aranha et al. (2016), quando um material que apresenta uma região com comportamento elástico é submetido a uma força compressiva ou de estiramento, este se deforma elasticamente, retornando ao seu tamanho inicial quando a força é retirada. Neste caso a região linear da curva tensão-deformação obedece a lei de Hooke, sendo matematicamente expressa pela Equação 3.

$$\sigma = E \times \epsilon \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

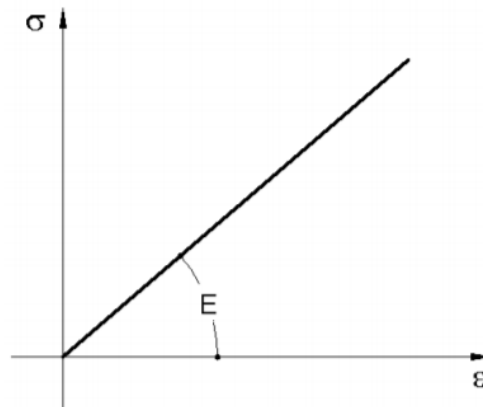
σ : tensão normal;

E : módulo de elasticidade ou módulo de Young;

ϵ : deformação normal.

Portanto, perceber que a equação 3 representa a parte inicial do diagrama de tensão-deformação, onde é exibido um comportamento linear elástico do material até se atingir o limite de proporcionalidade. De acordo com Hibbeler (2010), a presença do módulo de elasticidade (E) na equação está associada com a inclinação da reta linear ocorrida na região elástica do diagrama de tensão-deformação (Figura 4).

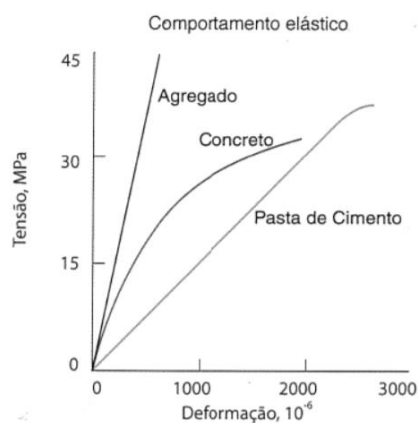
Figura 4: Comportamento linear na região elástica do diagrama tensão-deformação.



Fonte: PINHEIRO, 2007.

Para Mehta e Monteiro (1994) as características elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. No entanto, a partir de curvas típicas de tensão-deformação para agregado, pasta endurecida e concreto carregados em compressão simples (Figura 5), torna-se evidente que em relação ao agregado e à pasta de cimento, o concreto não é realmente um material elástico. A causa da não-linearidade da relação tensão-deformação foi explicada a partir de estudos sobre o processo de micro-fissuração progressiva do concreto sob carga (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Figura 5: Comportamentos típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto.

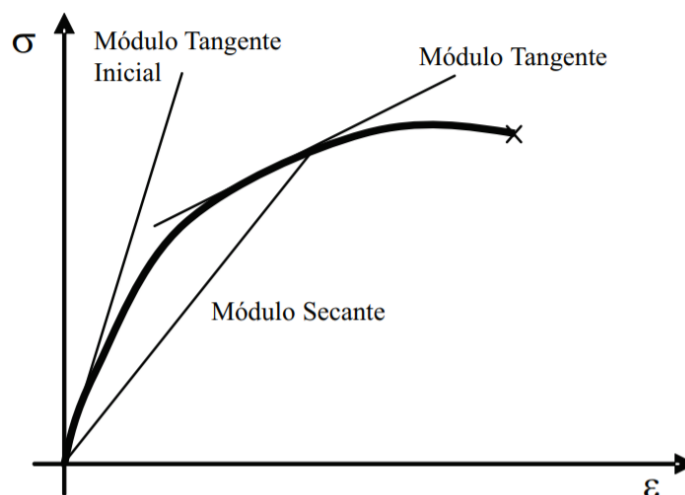


Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 1994.

Segundo a norma ABNT NBR 8522:2008, o módulo de deformação estático para um concreto sob compressão axial é determinado a partir da declividade da curva tensão-deformação obtida em ensaios de corpos de prova cilíndricos. De acordo com Araújo,

Guimarães e Geyer (2012), os tipos de módulo de deformação estático estão relacionados a diferentes estágios de carga, e devem ser escolhidos de acordo com o objetivo do ensaio. A Figura 6 retrata tipos de representação do módulo estático de elasticidade do concreto sujeito à compressão.

Figura 6: Diferentes tipos de módulo de elasticidade no gráfico tensão-deformação.



Fonte: ARAÚJO, GUIMARÃES E GEYER, 2012 (MODIFICADA).

De maneira sucinta, esses estágios de carga podem ser:

- **Módulo tangente inicial:** dado pela declividade de uma reta tangente traçada passando pela origem do diagrama tensão-deformação. É utilizado quando se requer caracterizar deformações do concreto submetido a tensões muito baixas.
- **Módulo tangente em um ponto genérico:** dado pela declividade de uma reta tangente à curva tensão-deformação em qualquer ponto da mesma. É utilizado quando se deseja simular a estrutura submetida a carregamentos ou descarregamentos em diferentes estágios de carga.
- **Módulo secante:** dado pela declividade de uma reta traçada entre quaisquer dois pontos da curva tensão-deformação. Frequentemente os pontos escolhidos correspondem à tensão de 0,5 MPa e à tensão de 50% da tensão última. Neste caso, simula a estrutura durante seu carregamento inicial, que pode ser o caso quando a carga permanente prevalece.

2.2 EXTENSOMETRIA ÓPTICA POR CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

No âmbito da engenharia, a adequação de um componente em um determinado projeto é dependente de alguns parâmetros, como características geométricas, propriedade mecânicas do material utilizado, entre outros. Analisando essa conjuntura, muitos pesquisadores passaram a investigar maneiras de potencializar as análises referentes as características mecânicas de materiais e o comportamento de elementos quando estes estão submetidos a testes experimentais.

Um método destacado para essa finalidade é o da correlação digital de imagens, no qual sua metodologia se baseia na extensometria óptica. De acordo com Ferreira (2012), o princípio desta técnica é o rastreamento dos pontos (*pixels*) entre duas imagens, uma gravada antes e outra depois da deformação. O autor ainda afirma que, devido aos avanços na tecnologia dos computadores e das máquinas fotográficas digitais, e da sua relativa facilidade de implementação e utilização, essa técnica vem sendo cada vez mais empregada no acompanhamento de testes mecânicos. Conforme Sena (2013), a extensometria óptica pelo método de correlações de imagens é vantajosa por conta da ótima confiabilidade dos resultados e da precisão em todas as direções do plano.

Para Sutton et al. (2009), um dos principais objetivos da técnica da correlação digital de imagens no âmbito da engenharia, é medir campos de deslocamentos e deformações a partir da comparação de imagens em instantes diferentes de um processo. Porém, Ferreira (2012) afirma que a etapa de medição é apenas a primeira parte da análise. Para o autor, a etapa subsequente é mais importante, e consiste na identificação de propriedades mecânicas e nas avaliações quantitativas de parâmetros e leis constitutivas.

Ferreira (2012) e Pennafort Junior et al. (2014) citam que, a utilização do método da correlação digital de imagens compreendem basicamente três etapas consecutivas:

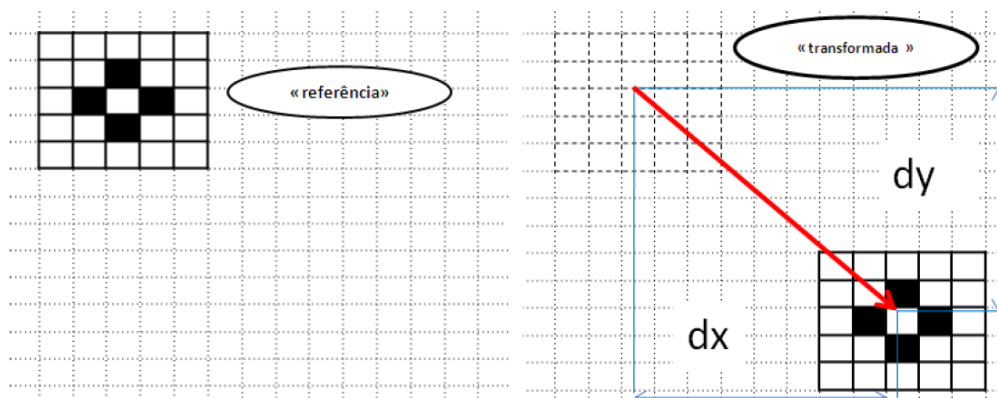
- Uma preparação prévia na superfície do corpo de prova de modo a proporcionar um padrão aleatório de intensidade de cinza nas imagens capturadas. Esta texturização pode ser obtida através da pulverização de tintas pretas e brancas na superfície. Barreto Júnior (2008) afirma que se o aspecto da textura for suficiente para indicar um número de pontos unitários e suas localizações precisas em cada imagem, o campo de deslocamento pode então ser estabelecido;

- Registro de imagens da superfície do corpo de prova antes e em diferentes instantes durante o carregamento, utilizando, de acordo com França (2011), uma câmera fotográfica ao mínimo do tipo reflex;
- Processamento das imagens registradas por um software cujo os algoritmos da correção digital de imagem estejam implementados, obtendo-se os campos de deslocamentos e deformações desejados.

Para efetuar o processamento das imagens registradas após algum teste mecânico é utilizado o programa computacional Correli_Q4^{LMT} (HILD e ROUX, 2008), sendo este implementado como rotina no *software* MATLAB. Basicamente, os algoritmos desta ferramenta tem como principal função determinar os campos de deslocamentos e deformações através da comparação entre uma imagem de referência do corpo de prova não deformado e as outras diversas imagens do corpo de prova deformado registradas durante o ensaio.

O processo de determinação das deformações se inicia quando é adotada uma área do corpo de prova a ser analisada, sendo esta chamada de região de interesse (ROI), e a subdivide em pequenas regiões denominadas de zonas de interesse (ZOI), uma região com uma quantidade de *pixels* conhecida. Realizado este processo, o programa reconhece as tonalidades de cinzas (luminosidade) dentro de cada zona de interesse (ZOI) da imagem de referência e passa a procurar pelo mesmo padrão de luminosidade na imagem do material já deformado, ou seja, o algoritmo pesquisaria em uma determinada região da imagem deformada (transformada) a ZOI semelhante a uma ZOI de referência (BENTES, 2010) (Figura 7). Logo, a partir da distorção sofrida entre a ZOI de referência e a ZOI do material já deformado, se obtém os campos de deslocamentos em *pixels*.

Figura 7: Comparação de ZOI da imagem original com a transformada.



Fonte: BENTES, 2010.

2.3 CONCRETO

2.3.1 Conceito

O concreto é um composto amplamente disseminado, sendo o material mais consumido no ramo da construção civil, e de acordo com Concreto & Construções (2009), o segundo material mais consumido no mundo, perdendo apenas para o consumo da água. Para Pedroso (2009) o elevado consumo do concreto é justificado por duas características fundamentais que o destaca como material construtivo, sendo elas: boa resistência à água após ser endurecido, sofrendo pouca deterioração, e sua plasticidade no estado fresco, possibilitando obter formas construtivas inusitadas.

Carvalho e Figueiredo Filho (2016) atestam que o concreto é obtido basicamente por uma mistura de água, agregado graúdo, agregado miúdo e um aglomerante, sendo esse geralmente cimento Portland. Além do mais, em ocasiões especiais que se necessita melhorar ou modificar suas propriedades básicas, pode ocorrer a incorporação de produtos químicos ou outros componentes, como microssílica, polímeros etc.

2.3.2 Propriedades

2.3.2.1 Concreto fresco

Conforme a ABNT NBR 12655:2015, o concreto fresco é aquele que está completamente misturado e que ainda se encontra em estado plástico, sendo a trabalhabilidade uma das propriedades mais importante nesse estado.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a trabalhabilidade determina a facilidade com a qual um concreto pode ser manipulado (lançamento, adensamento e acabamento) sem segregação nociva, ou seja, com a mínima perda de homogeneidade. Mehta e Monteiro (1994) ainda defendem que a trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade do concreto fresco e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

Para Kruger, Souza e Konofal (2013), o concreto coeso é aquele que se apresenta homogêneo e sem separação de materiais da mistura em todas as fases de sua utilização. A falta de coesão da mistura pode acarretar a desagregação do concreto no estado fresco, alterando sua

composição física e sua homogeneidade. O concreto ideal é aquele que apresenta coesão e trabalhabilidade adequadas (GEYER e SÁ, 2006).

2.3.2.2 Concreto endurecido

Quanto ao concreto endurecido, a ABNT NBR 12655:2015 aponta como sendo aquele que se encontra no estado sólido, onde as principais características de interesse são as mecânicas. Dentre essas propriedades, destaca-se a resistência à compressão como sendo a mais valorizada e utilizada como parâmetro para o emprego do concreto em projetos.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que em materiais de várias fases como o concreto, a porosidade de cada componente ou fase de sua estrutura pode se tornar um fator limitante da resistência. Entretanto, como os agregados naturais são geralmente densos e resistentes, a porosidade da matriz (pasta de cimento hidratada), bem como a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo é que normalmente determinam a característica de resistência de dosagens de concreto. A determinação da porosidade de ambas, matriz e zona de transição, é dependente de fatores como relação água/cimento, processo de adensamento, condição de cura (grau de hidratação do cimento), entre outros. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Outro ponto de vista importante a se levantar para o concreto endurecido é a questão da durabilidade. Conforme Roque e Moreno Junior (2005), quando se objetiva a qualidade de uma estrutura, é imprescindível a adoção de medidas apropriadas que garantam a sua durabilidade.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, a durabilidade consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo projetista e pelo contratante. Para Medeiros, Andrade e Helene (2011) a durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e manutenção. Ou seja, a durabilidade depende tanto de fatores extrínsecos ao concreto, quanto fatores intrínsecos. Tutikian e Helene (2011) ainda asseguram que o conceito de durabilidade está associado aos mecanismo de transporte ou de penetração de agentes agressivos em materiais porosos, sendo a capilaridade, migração iônica, permeabilidade e difusibilidade os mecanismos mais comuns. No entanto, considera-se a durabilidade um assunto muito complexo que depende de muitas variáveis, e por isso, ainda não tem um método consensual para ser medida (TUTIKIAN e HELENE, 2011).

2.4 CONCRETO SUSTENTÁVEL

Um grande desafio encarado atualmente pela sociedade é a necessidade de implementação de sistemas produtivos que possuam como característica principal o desenvolvimento sustentável. Uma justificativa plausível para isso é o motivo de que vários dos produtos utilizados como matéria-prima não são renováveis ou, pelos enormes impactos ambientais que processos de produção convencionais têm ocasionados nos dias atuais.

Tendo em consideração esse aspecto da sustentabilidade, Tutikian e Helene (2011) afirma que o estudo de concreto sustentável está relacionado com todos aqueles materiais que consigam reduzir a emissão de gases prejudiciais na atmosfera durante a fabricação dos cimentos, ou que se preste a consumir rejeitos industriais, incluindo entulho da própria construção. Uma economia de 5 kg de cimento por m³ poderia ocasionar uma redução da emissão de 100.000 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) à atmosfera (TUTIKIAN e HELENE, 2011).

Paula et al. (2009) afirma que a utilização, pela construção civil, de resíduos gerados em outros setores da economia é vantajosa não apenas em virtude do aumento da atividade industrial mas, sobretudo, devido à redução da disponibilidade de matérias primas não renováveis tão necessárias às atividades da construção civil convencional. Os autores ainda citam que, dentro dos resíduos, as cinzas mineiras oriundas de atividade da agroindústrias se destacam por apresentarem altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, podendo ser então utilizadas como pozolana.

Portanto, a adição de minerais ao traço de concreto pode ser considerada uma sistemática promissora para promover benefícios socioeconômicos e de maneira sustentável, visto que estas permitem uma redução tanto no uso dos recursos naturais, como dos impactos ambientais ocasionados pelo descarte inapropriado dessas cinzas minerais.

2.4.1 Cinza da casca de arroz (CCA)

A cinza da casca de arroz (CCA) é uma cinza mineral proveniente de atividades da agroindústria. Precisamente, a CCA é originada da combustão da casca de arroz (Figura 8), que de acordo com Gonçalves (2009) é um material procedente do rejeito agrícola de atividades industriais. Para o autor, a casca de grãos de arroz, removida durante o refinamento, não tem

nenhum interesse comercial ou uso na área agrícola, mas se apresenta como um problema devido à necessidade de seu armazenamento.

Figura 8: Casca de arroz.



Fonte: NORONHA, 2016.

De acordo com a SOSBAI (2016), o arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo. A produção de aproximadamente 741,0 milhões de toneladas de grãos em casca corresponde a 29% do total de grãos usados na alimentação humana. Por conta da sua alta produtividade e por ser necessário realizar um beneficiamento (processo de separação do grão de arroz da sua casca) neste material para que seja possível o consumo, tem-se a geração de uma grande quantidade de resíduo na forma de casca. Segundo Huston (1972, apud POUEY, 2006) a casca de arroz equivale a cerca de 20% do peso do grão.

Uma solução adotada pela agroindústria para o aproveitamento da casca de arroz é a sua utilização como fonte alternativa para a produção de energia (calor) a ser empregada no processo de parboilização do arroz. Tal ação é justificada devido à casca de arroz possuir um alto poder calorífico, cerca de 16720 KJ/Kg de acordo com Della et al. (2005) e 13388 KJ/Kg conforme Zerbino, Giaccio e Isaia (2011). Em média, cada tonelada de arroz produz cerca de 200 Kg de casca de arroz, o que na combustão completa leva a 40 Kg de CCA. Nenhum outro resíduo de colheita gera uma quantidade maior de cinzas quando é queimada (ZERBINO, GIACCIO E ISAIA, 2011).

De acordo com Pouye (2006), para se obter uma sílica altamente reativa, a queima da casca de arroz deve ocorrer levando em consideração a combinação de três fatores: o

equipamento que foi utilizado (a céu aberto, fornalhas tipo grelha ou leito fluidizado), temperatura de queima, e o tempo de exposição durante o processo.

Os estudos sobre a cinza da casca de arroz se concentram basicamente sobre o potencial aglomerante que tal resíduo pode possuir, sendo este explicado pela forte presença de sílica na composição da casca do arroz. Ferreira et al. (1997, apud MILANI, 2008) justifica que o desenvolvimento de um sistema de reaproveitamento do resíduo cinza de casca de arroz é devido à sua composição físico-química apresentar potencialidade para produção de material aglomerante e pela grande disponibilidade da casca de arroz no Brasil.

2.4.1.1 Características da CCA

A cinza da casca de arroz (CCA) pode se tornar, a depender da suas características físico-químicas, uma pozolana com alta reatividade. Para Silva et al. (2007), as características da CCA podem variar a depender do processo de queima da casca de arroz empregado. Como exposto anteriormente, parâmetros como o equipamento utilizando para combustão, temperatura de queima, e o tempo de exposição durante o processo são fundamentais para se obter uma CCA de qualidade adequada (POUYE, 2006).

A composição química da cinza da casca de arroz (CCA), independentemente dos parâmetros empregados no processo de combustão, sempre apresentará teor elevado de dióxido de silício (SiO_2) (POUYE, 2006). A Tabela 1 apresenta a composição química de amostras de CCA investigadas por inúmeros autores. Com a análise da referente tabela, observa-se a presença de um elevado teor de dióxido de silício (SiO_2), onde Queiroz et al. (2015) afirma que o elevado teor deste material favorece para que a CCA seja considerada um material pozolânico.

Tabela 1: Composição química de CCA, segundo vários autores.

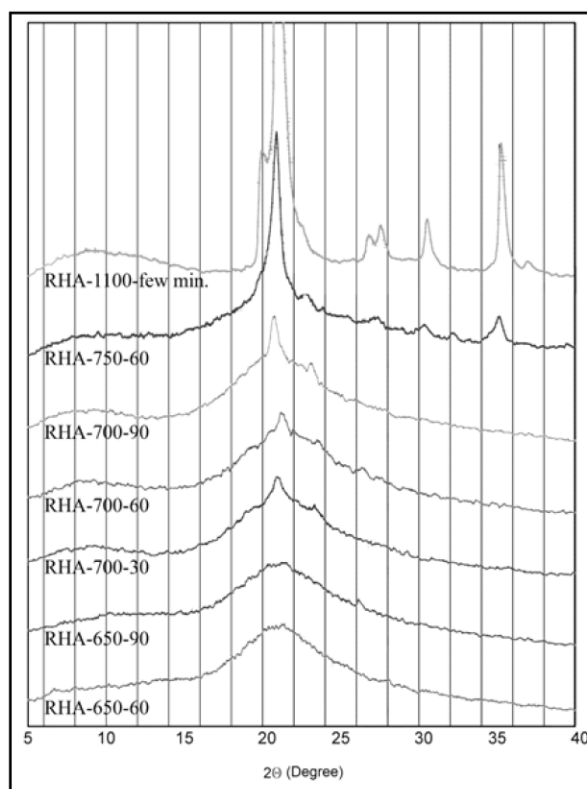
Amostra de CCA	Composição em Óxidos (% em peso)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	PF
Habeeb et al. (2010)	88,32	0,46	0,67	0,67	0,44	-	0,12	2,91	5,81
Gastaldini et al. (2010)	90,00	0,28	0,14	0,45	0,28	0,02	0,08	1,55	5,00
Zerbino et al. (2011) CCA Natural	95,04	0,30	0,44	1,25	0,45	0,01	0,09	1,40	0,51
Zerbino et al. (2011) CCA Moída	94,84	0,39	0,54	1,32	0,40	0,01	0,11	1,45	0,25
Souza et al. (2014)	85,49	2,32	0,08	1,43	0,57	0,00	0,29	1,82	7,87
Queiroz et al. (2015)	92,99	0,18	0,43	1,03	0,35	0,10	0,02	0,72	2,36

Fonte: Autoria própria, 2018.

Utilizando um forno projetado e construído pela *Amirkabir University of Technology* para a realização da combustão da casca de arroz, Ramezaniapour (2009) obteve em sua pesquisa resultados onde, à medida que se aumentava a temperatura e o tempo de combustão, o dióxido de silício (SiO_2) se apresentava em um teor mais elevado na CCA gerada. O autor ainda expõe que as amostras de CCA produzidas a baixa temperatura ou durante 30 minutos de queima no forno projetado, não são apropriadas para a utilização em concretos devido à sua alta perda de ignição (perda de fogo).

Abordando a questão da estrutura mineralógica da CCA, esta característica é bastante influenciada pelo tipo de processo de queima e tempo de combustão na qual a casca de arroz é submetida. A Figura 9 apresenta os resultados de uma pesquisa desenvolvida por Ramezaniapour (2009), na qual foram utilizadas análises de difração de raios X (DRX) para avaliar o comportamento mineralógico de amostras de CCA obtidas a partir de diferentes temperaturas de queima e tempos de combustão.

Figura 9: Resultados da análise de DRX em amostras de CCA.



Fonte: RAMEZANIANPOUR, 2009.

Conforme os difratograma da Figura 9, o autor afirma que a cinza da casca de arroz (CCA) obtida da combustão a uma temperatura abaixo de 650°C não apresenta a presença picos elevados, ou seja, produz uma sílica com estrutura mineralógica amorfa. Em alternativa, o mesmo cita que a estrutura mineralógica não permanecerá amorfa quando a combustão for realizada por um período prolongado e/ou a uma temperatura superior a 650°C, ou durante poucos minutos a 1100°C. Ramezaniapour (2009) ainda declara que a combinação da temperatura de combustão a 650°C com um tempo de queima de 60 minutos parece apresentar a solução otimizada para resultar um CCA não cristalizada. Isso significa que a reatividade cinzas da casca de arroz é geralmente diminuída com o aumento da temperatura de combustão e da duração de queima.

De acordo com Trindade (2011), quando a CCA é obtida com controle de combustão e temperatura entre 400 e 500°C, esta é composta essencialmente de matéria não cristalina, sendo considerada uma cinza amorfa. Entretanto, quando queimada sem esse controle de temperatura, apresentam-se fases cristalinas com a formação de tridimita na CCA e, em temperaturas mais altas, detecta-se a cristobalita. Akasaki et al. (2005), afirma que a CCA produzida a partir de uma combustão controlada, com temperatura de queima inferior a 600°C, resulta numa composição morfológica com a presença marcante de sílica (SiO_2) em estado amorfo.

Em referência a CCA como pozolana, Mehta e Monteiro (1994) enquadram a cinza da casca de arroz em duas categorias de pozolanas:

- Pozolana altamente reativa: quando for constituída de sílica pura e amorfa, na qual pode ser produzida através de um processo de combustão controlado;
- Pozolana pouco reativa: quando constituída essencialmente de silicatos cristalinos, com uma pequena quantidade de matéria não cristalina. Neste caso, aponta-se a necessidade de um tratamento físico para proporcionar uma redução do material a um pó bem fino, e com isso desenvolver uma certa pozolanicidade.

2.4.1.2 CCA como adição mineral no concreto

As vantagens da adição de cinza de casca de arroz (CCA) a uma dosagem de concreto são significativas, tanto no aspecto ambiental, econômico e principalmente, técnico.

Se tratando do concreto no estado fresco, Pedrozo (2008) declara que a adição da pozolana (CCA), em pequenas quantidades, proporciona ao concreto maior estabilidade e trabalhabilidade, devido à sua elevada superfície específica e a forma das suas partículas,

reduzindo a tendência à segregação e à exsudação do material. No entanto, Kuntz (2006) afirma que a alta capacidade de absorção de água por parte da CCA pode influenciar de forma negativa a trabalhabilidade do concreto, se um elevador teor do material for utilizado.

Quanto ao estado endurecido, a adição desta cinza mineral a um traço de concreto pode oportunizar ganhos satisfatórios nas suas propriedades mecânicas, além de proporcionar ganhos de durabilidade. A Figura 10 apresenta uma tabela contendo os valores de resistência à compressão encontrados por Habeeb e Mahmud (2010) em sua pesquisa.

Figura 10: Resistência à compressão axial de dosagens de concreto.

Mixture	RHA Content (%)	Compressive strength (MPa)			
		1 day	3 days	7 days	28 days
CM	0	19.1 _(2.4)	26.7 _(2.2)	30.2 _(2.1)	39.6 _(1.4)
05F1	5	17.9 _(2.6)	25.3 _(2.5)	30.0 _(1.7)	40.2 _(1.6)
10F1	10	19.4 _(2.1)	28.1 _(1.3)	34.3 _(2.8)	48.4 _(2.8)
15F1	15	18.2 _(2.6)	25.1 _(1.9)	31.3 _(1.4)	42.4 _(2.0)
20F1	20	17.3 _(2.0)	24.5 _(2.6)	29.8 _(0.9)	40.6 _(1.3)
05F2	5	17.2 _(2.4)	26.3 _(2.1)	29.8 _(2.6)	40.7 _(2.5)
10F2	10	20.3 _(2.9)	28.2 _(2.4)	35.0 _(1.7)	50.2 _(2.2)
15F2	15	18.0 _(2.4)	25.2 _(1.7)	30.8 _(2.8)	42.9 _(1.4)
20F2	20	17.8 _(2.8)	24.5 _(2.9)	30.5 _(2.2)	41.0 _(2.1)
05F3	5	18.3 _(3.0)	25.4 _(2.0)	31.1 _(1.1)	42.2 _(1.1)
10F3	10	19.9 _(2.3)	29.6 _(2.2)	36.7 _(2.7)	51.8 _(1.7)
15F3	15	19.3 _(1.7)	26.1 _(2.7)	32.7 _(1.3)	44.4 _(2.9)
20F3	20	18.1 _(2.6)	25.2 _(2.5)	32.1 _(2.7)	41.7 _(0.7)

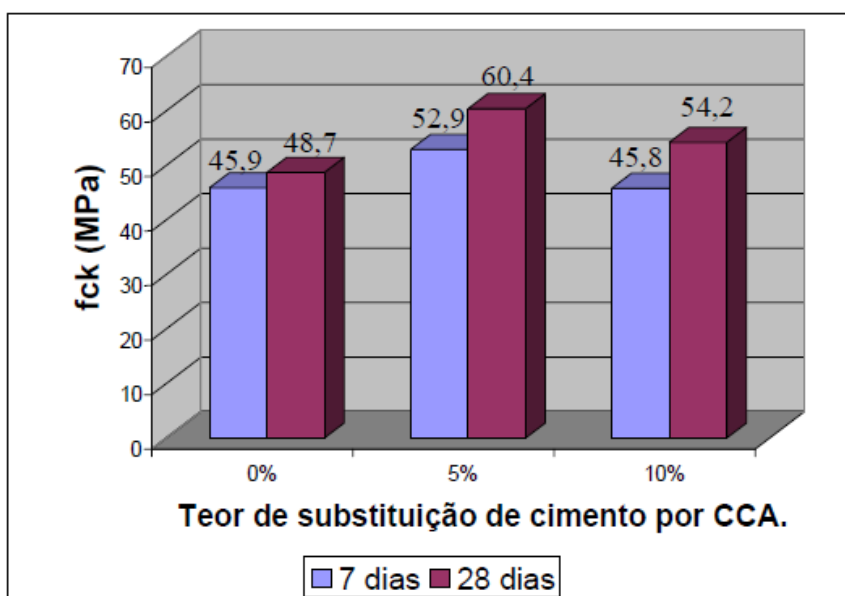
Fonte: Habeeb e Mahmud, 2010.

Habeeb e Mahmud (2010) investigaram, simultaneamente, substituições de 5%, 10%, 15% e 20% com três diferentes graus de moagem da CCA (F1, F2 e F3, ou seja, 180, 270 e 360 minutos de moagem, respectivamente). Os resultados mostraram que em idades precoces a força era comparável entre as dosagens com substituição e a referência, enquanto com a idade de 28 dias, o concreto com presença de CCA com um grau de moagem mais fina exibe maior resistência do que o concreto com CCA mais grosseira. Percebe-se também que o maior incremento de resistência ocorreu nos traços de concreto com 10% de CCA. Comparando com a dosagem controle, o incremento em porcentagem foi de 22,2%, 26,7% e 30,8% para 10F1, 10F2 e 10F3, respectivamente (28 dias de cura). Habeeb e Mahmud (2010) inferem que é possível, devido a uma maior finura da CCA, aumentar a reação do dióxido de silício (SiO_2) com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) para produzir mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H),

resultando em maior resistência à compressão. Os autores também observam que, a partir da substituição de 10%, ocorre um decréscimo de resistência à compressão com o aumento da porcentagem de CCA. Para os autores, esse comportamento pode ser justificado devido à redução da quantidade de cimento Portland e como resultado disso, a quantidade liberada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) devido ao processo de hidratação não é suficiente para reagir com todo o dióxido de silício (SiO_2) disponível a partir da adição de CCA e, assim, este composto atuará como material inerte.

Ainda na questão da resistência à compressão, Queiroz et al. (2015) obteve resultado viável ao investigar uma cinza de casca de arroz (CCA) obtida por meio da queima não controlada da casca. Em sua pesquisa, a substituição de cimento Portland por CCA se mostrou satisfatória para os teores de 5% e 10% nas dosagens de concreto (Figura 11). No que diz respeito ao ganho de resistência à compressão axial, a dosagem de 5% chegou a percentuais de 24% para o concreto, na idade de 28 dias, considerando a cura úmida. Para isso, a granulometria ideal para o uso da CCA foi de aproximadamente 12 μm , obtida após um tempo de moagem de 30 minutos.

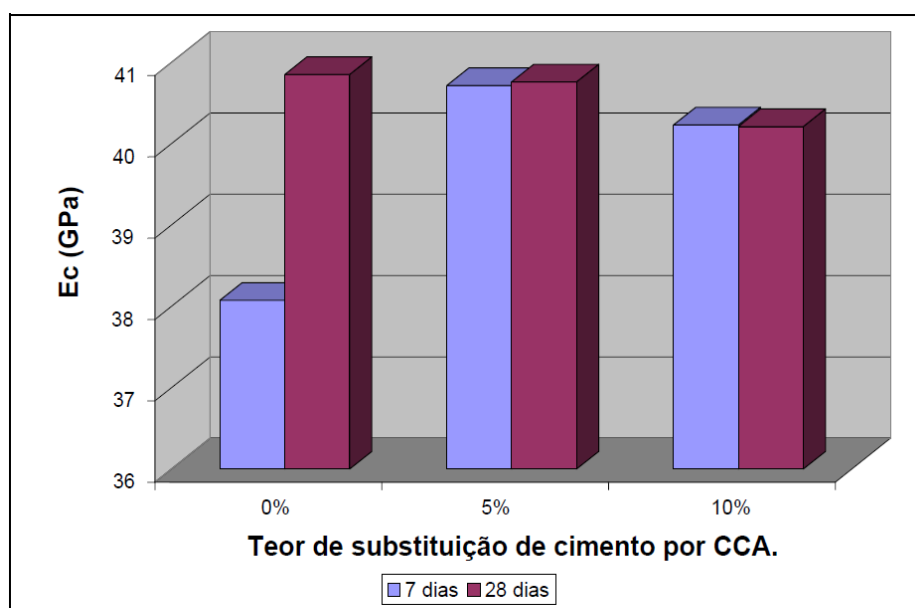
Figura 11: Relação entre o teor de substituição do cimento Portland por CCA e resistência à compressão.



Fonte: Queiroz et al., 2015.

Queiroz et al. (2015) ainda investigou o comportamento do módulo de elasticidade das dosagens de concreto, tendo como parâmetro a ABNT NBR 8522:2008. Os autores obtiveram valores para os traços de concreto variando entre 40 e 41 GPa (Figura 12), não importando a idade ou o teor de substituição de cimento por CCA.

Figura 12: Relação entre o teor de substituição do cimento por CCA e o módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522:2008).



Fonte: Queiroz et al., 2015.

Investigando a influência da adição de CCA em dosagens de concreto no quesito durabilidade, Cezar (2011) observou resultados satisfatórios para uma adição deste material no estado moído ao realizar o ensaio ASTM C1202:2005 – Método de teste padrão para indicação elétrica da capacidade do concreto de resistir à penetração de íons de cloreto. O autor constatou que, independente da relação água/aglomerante e do período de cura adotados, o concreto com substituição de 15% de CCA natural apresentou carga total passante (C) superior às misturas 15 CCA M e REF, caracterizando-o como concreto de menor resistência à penetração de cloretos, dentre aqueles testados na presente pesquisa. A mistura de melhor desempenho foi a com 15% de substituição de CCA no estado moída. Para Cezar (2011), esse comportamento provavelmente ocorreu por conta da finura mais elevada da CCA moída, em relação a CCA natural, ocasionar um maior refinamento dos poros, o que dificulta a migração dos íons de cloreto.

A Figura 13 apresenta uma classificação realizada por Cezar (2011) quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202:2005. Percebe-se que as misturas com CCA moída apresentaram os melhores desempenhos dentre as misturas investigadas.

Figura 13: Enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202:2005.

Mistura	a/ag	Penetrabilidade aos íons cloreto aos 91 dias	
		7 dias	28 dias
REF	0,45	B	B
	0,55	M	M
	0,65	M	M
15 CCAM	0,45	MB	MB
	0,55	B	MB
	0,65	B	B
15 CCAN	0,45	M	M
	0,55	M	M
	0,65	A	M

MB – Muito baixo

B – Baixo

M – Moderado

A – Alto

Fonte: CEZAR, 2011 (MODIFICADA).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland usado na pesquisa é classificado como CP V ARI, cimento Portland com alta resistência inicial. Foram realizados dois ensaios neste material, um para a determinação da massa específica e outro para a determinação da superfície específica (método de Blaine). Os mesmos tiveram como referência a ABNT NBR 16605:2017 e ABNT NBR 16372:2015, respectivamente. As Figuras 14 e 15 apresentam a etapa de adição do material no frasco de “Le Chatelier” e o equipamento de permeabilidade Blaine, respectivamente.

Figura 14: Ensaio do cimento Portland com o frasco “Le Chatelier”.



Fonte: NORONHA, 2016.

Figura 15: Aparelho de permeabilidade Blaine.



Fonte: Autoria própria, 2018.

3.1.2 Cinza da casca de arroz – CCA

A cinza da casca de arroz (CCA) investigada na pesquisa foi fornecida pela Cooperativa dos Irrigantes do Vale do Banabuiú – CIVAB, uma empresa beneficiadora de arroz que fica localizada no município de Morada Nova – CE. A CCA é proveniente da queima em uma caldeira, onde este procedimento é responsável por alimentar o processo de parboilização dos grãos de arroz através do vapor gerado. Vale ressaltar que a amostra de CCA recolhida na indústria é oriunda de uma queima, da casca de arroz, sem controle de temperatura. Sua coloração varia de um aspecto preto até um aspecto cinza, como mostra a Figura 16.

Figura 16: Cinza da casca de arroz – CCA.



Fonte: Autoria própria, 2018.

3.1.2.1 Tratamento físico na CCA

Devido ao material utilizado na pesquisa ser oriundo de uma combustão que ocorre sem nenhum controle de temperatura, a CCA investigada foi submetida a um beneficiamento físico. Tal processo foi realizado com o intuito de proporcionar um ganho na capacidade pozolânica do material. De acordo com Silva (2004), para uma melhor condição de pozolanicidade da CCA queimada sem controle de temperatura, é necessário que a mesma passe por um processo de moagem para reduzi-la a um material mais fino. Pouye (2006) ainda afirma que a área superficial é outro parâmetro fundamental na reatividade da CCA e que também pode ser otimizada com o processo de moagem adequado.

Para alcançar esse objetivo a amostra de CCA foi submetida a uma moagem em um moinho de bolas durante 120 minutos. A moagem foi realizada com a granulometria das bolas de alumina variando o diâmetro entre 10 e 20 mm. Vale ressaltar que a razão entre a carga dos corpos moedores e a quantidade de cinza foi a mesma que Pouey (2006) usou em sua pesquisa, ou seja, 5 kg de bolas para 1 kg de CCA. O moinho e a quantidade de bolas de alumina utilizadas para o processo estão apresentados na Figura 17.

Figura 17: Moinho de bolas (esquerda) e quantidade de bolas utilizadas na moagem (direita).



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 18 exibe uma imagem da CCA no estado natural (esquerda) e após esta passar pelo tratamento físico (direita).

Figura 18: CCA na condição natural (esquerda) e CCA na condição moída (direita).



Fonte: Autoria própria, 2018.

Duart (2008) observou que um possível aumento de resistência nos traços com adição de CCA moída em relação aos traços com adição de CCA natural pode ser ocasionado por um processo de moagem, que faz aumentar a finura das partículas da CCA moída e com isso aumentando a superfície específica. Esse aumento de superfície específica pode possibilitar maiores espaços de nucleação, resultando na produção de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) adicional.

3.1.2.2 Caracterização física

Após a CCA passar pelo processo de beneficiamento físico, o material foi submetido aos ensaios para determinação da massa específica e superfície específica (método de Blaine), tendo como finalidade obter características físicas deste material. Cada ensaio teve como parâmetro a ABNT NBR 16605:2017 e ABNT NBR 16372:2015, respectivamente. A Figura 19 mostra o procedimento de adição do material no frasco de “Le Chatelier”.

Figura 19: Ensaio da cinza da casca de arroz com o frasco de “Le Chatelier”.



Fonte: NORONHA, 2016.

3.1.2.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica da CCA foi obtida a partir da difração de raio X (DRX), a qual foi realizada no Laboratório de Difração de Raio X, localizado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). O material submetido ao ensaio de difração de raio X foi a cinza da casca de arroz (CCA) resultante do processo de beneficiamento físico.

O equipamento empregado na investigação da DRX foi o da marca Shimadzu, modelo LAB X XRD 6000. Foi realizado varreduras com goniômetro do ângulo 2θ à razão de 2° por minuto e intervalo de medida na faixa de 10° a 80° .

3.1.2.4 Determinação do índice de atividade pozolânica (IAP)

O índice de atividade pozolânica da CCA foi determinado experimentalmente seguindo preceitos estabelecidos na ABNT NBR 5752:2014 – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

Para a avaliação do índice de desempenho pozolânico devem ser preparadas duas argamassas com dosagens diferentes. A argamassa A deve conter 100% de cimento Portland, areia normal e água. A argamassa B deve conter 25% em massa de material pozolânico (CCA), em substituição à igual porcentagem de cimento Portland, areia normal e água. A Figura 20 demonstra o processo de mistura da argamassa B através da argamassadeira.

Figura 20: Mistura da dosagem B através da argamassadeira.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A norma ressalta que para cada dosagem de argamassa, devem ser moldados quatro a seis corpos de prova cilíndricos com 5 centímetros de diâmetro e 10 centímetros de comprimento.

Passados 28 dias, período de cura das amostras, determina-se a média da resistência à compressão das amostras de cada dosagem de argamassa. Feito isso, o índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias deve ser calculado pela Equação 4.

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100 \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

IAP: índice de atividade pozolânica com o cimento Portland aos 28 dias;

fcB: resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa B;

fcA: resistência média aos 28 dias dos corpos de provas da argamassa A.

3.1.3 Agregado miúdo e graúdo

Como agregado miúdo foi utilizado uma areia quartzosa obtida de dentro do campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido de Mossoró – RN. O material recolhido passou por um processo de peneiramento seguindo a norma ABNT NBR NM 248:2003, onde o agregado que passava pela peneira com abertura de malha 4,75 mm era considerado agregado miúdo, sendo descartado o material que ficava retido. Após este processo, todo material foi posto para secar em estufa para a remoção de umidade.

O agregado graúdo empregado foi uma brita do tipo granítica, também obtida de dentro do campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido de Mossoró – RN. Este material passou também pelo procedimento de peneiramento seguindo a norma ABNT NBR NM 248:2003, onde o agregado que passava pela peneira com abertura de malha 19,0 mm (brita tipo 1) era exposto ao ar para a remoção de umidade.

Os ensaios realizados na caracterização dos agregados utilizados na pesquisa foram os seguintes:

- ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- ABNT NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;

- ABNT NBR NM 53:2009 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- ABNT NBR NM 45:2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Figura 21: Processo para determinação da granulometria – Agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria, 2018.

3.1.4 Água de amassamento

A água usada para a confecção dos corpos de prova foi a água de abastecimento público da cidade de Mossoró – RN, mais especificamente da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

3.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo que foi adicionado nas dosagens de concreto da pesquisa foi o superplastificante de terceira geração para concreto MasterGlenium 25 cedido pela empresa BASF. Este produto tem como composição base a substância química éter policarboxílico e

massa específica variando de 1,035 a 1,075 g/cm³. Possui um aspecto líquido, de coloração amarelada (Figura 22), sendo este diluído na segunda parte da água de amassamento com o intuito de aumentar a trabalhabilidade do concreto sem ocasionar alteração no tempo de pega. O fabricante informa que sua dosagem pode variar de 0,2% a 1,5% em relação a massa do aglomerante.

Figura 22: Aditivo superplastificante utilizando na pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2018.

3.2 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO

Concluída toda a caracterização dos materiais, foi efetuado o cálculo para a determinação do traço referência pelo método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), adotando a condição A como controle na produção do concreto. O mesmo foi dosado para atingir 30 MPa de resistência à compressão após 28 dias de cura. A Tabela 2 apresenta o traço unitário calculado, sendo este estabelecido como dosagem de referência.

Tabela 2: Traço unitário – Concreto referência.

Cimento	Areia	Brita	Relação A/C
1,00	2,29	2,52	0,55

Fonte: Autoria própria, 2018.

O traço de concreto apresentado acima também foi utilizado para a confecção de concretos com substituições parciais do aglomerante cimento Portland pela cinza da casca de arroz (CCA). As porcentagens de substituição investigadas foram de 5 e 10%. Destaca-se que a substituição parcial do cimento Portland pela cinza da casca do arroz (CCA) foi realizada em massa, e como a massa específica dos dois materiais são diferentes, foi necessário um reajuste proporcional no consumo de areia para as dosagens de concreto com o objetivo de manter constante o volume total de argamassa dos traços utilizado.

A adição de um aditivo superplastificante foi necessária para que se obtivesse uma capacidade de trabalhabilidade uniforme em todas as dosagens de concreto sem alterar o valor da relação água/aglomerante. A quantidade de aditivo adicionada nas dosagens foi determinada empiricamente, através do ensaio para determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, o *Slump Test*, de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998 (Figura 23). Tal quantia de aditivo foi determinada para que todas as misturas de concreto apresentassem um abatimento variando entre 8 e 12 centímetros. A Tabela 3 apresenta o valor, em centímetros, do abatimento de tronco de cone obtido para cada dosagem de concreto pelo *Slump Test*.

Tabela 3: Valores de abatimento de tronco de cone, em centímetros.

Mistura	Abatimento pelo <i>Slump Test</i> (cm)
REF	9,70
5% CCA M	8,40
10% CCA M	8,90

Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 23: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, *Slump Test*.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Tabela 4 exibe a quantidade de materiais para 1 metro cúbico de concreto de cada mistura. Ressalta-se que a quantidade de aditivo superplastificante utilizada foi baseada, em porcentagem, na quantia total de aglomerante de cada dosagem.

Tabela 4: Quantidade de materiais para 1 m³ de concreto de cada dosagem.

Mistura	Cimento Portland (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo SP (%)
REF	372,73	-	854,69	937,43	205,00	0,00
5% CCA M	354,09	18,64	848,52	937,43	205,00	0,12
10% CCA M	335,45	37,27	842,34	937,43	205,00	0,24

Fonte: Autoria própria, 2018.

3.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.3.1 Moldes para corpo de prova

No trabalho foram utilizados moldes cilíndricos de corpo de prova com dimensões de 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de comprimento de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2015, na qual afirma que o corpo de prova deve possuir uma altura igual ao dobro do diâmetro.

3.3.2 Confecção dos corpos de prova

Iniciou-se com o processo de quantificação dos materiais que passaram por procedimentos de peneiramento e beneficiamento. Após toda a pesagem, foi dado início a fase de mistura dos materiais com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros. A metodologia utilizada para a realização da mistura foi a seguinte:

- 1º - A betoneira foi umedecida com a finalidade de evitar que se perdesse água de amassamento pela superfície da mesma;
- 2º - Todo o agregado graúdo foi adicionado;
- 3º - Foi adicionado cerca de 1/3 da água de amassamento;
- 4º - Todo o cimento Portland e a CCA foram adicionados. Vale ressaltar que estes materiais foram misturados em um recipiente fechado antes de serem adicionados na betoneira;

- 5º - Mais 1/3 da água de amassamento contendo o aditivo foi adicionada;
- 6º - Todo o agregado miúdo foi adicionado;
- 7º - O restante da água com o aditivo foi adicionada;
- 8º - Por fim, após todo o processo de adição dos materiais, a betoneira permaneceu funcionando durante 5 minutos para que fosse possível a homogeneização da mistura.

Por fim, o concreto produzido foi adicionado aos moldes cilíndricos dando início ao processo de moldagem dos corpos de prova seguindo as diretrizes presentes na ABNT NBR 5738 (2015). Após cada molde cilíndrico ter sido preenchido por total, utilizou-se de um vibrador mecânico para realizar o adensamento da mistura (Figura 24). Com o passar das primeiras 24 horas, os corpos de provas foram desmoldados e colocados submersos em água, dando início ao processo de cura do concreto descrito na ABNT NBR 5738 (2015). A Tabela 5 apresenta a configuração como os corpos de prova foram nomeados para seus respectivos ensaios.

Figura 24: Processo de adensamento mecânico das misturas de concreto.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Tabela 5: Nomeação dos corpos de provas ensaiados.

Traço Referência	Traço 5% CCA M	Traço 10% CCA M	Ensaio Realizado
REF - 1 (C)	5% M - 1 (C)	10% M - 1 (C)	Compressão Axial – 28
REF - 2 (C)	5% M - 2 (C)	10% M - 2 (C)	
REF - 3 (C)	5% M - 3 (C)	10% M - 3 (C)	
REF - 4	5% M - 4	10% M - 4	
REF - 5	5% M - 5	10% M - 5	Compressão Axial – 91
REF - 6	5% M - 6	10% M - 6	
REF - 7	5% M - 7	10% M - 7	
REF - 8	5% M - 8	10% M - 8	
REF - 1 (AB)	5% M - 1 (AB)	10% M - 1 (AB)	Absorção e Índice de Vazios
REF - 2 (AB)	5% M - 2 (AB)	10% M - 2 (AB)	
REF - 3 (AB)	5% M - 3 (AB)	10% M - 3 (AB)	

Fonte: Autoria própria, 2018.

3.4 SEQUÊNCIA DE ENSAIOS

3.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com prescrições da ABNT NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Para cada dosagem de concreto investigada, foram ensaiados 4 corpos de provas com 28 dias de cura e mais 4 corpos de provas com 91 dias de cura. Totalizando, foram 24 corpos de provas submetidos ao ensaio de compressão axial, sendo a metade destes ensaiados aos 28 dias de cura e a outra metade ensaiado aos 91 dias de cura.

Vale ressaltar que inicialmente cada corpo de prova foi submetido a um processamento em uma retificadora de corpos de prova cilíndricos, com a finalidade de proporcionar uma superfície perfeitamente regularizada.

3.4.2 Correlação digital de imagens

A aplicação da correlação digital de imagens ocorreu para os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de compressão axial aos 28 dias de cura, tendo como finalidade obter mais detalhes sobre o comportamento mecânico destes corpos de provas durante à aplicação de um carregamento.

3.4.2.1 Procedimentos metodológicos da análise

Para a realização do método da correlação digital de imagens foi necessário a instalação de uma máquina fotográfica, onde a mesma tinha como finalidade tirar sucessivas fotos durante a execução do ensaio, para que estas fossem analisadas posteriormente pelo Correli_Q4^{LMT} (HILD e ROUX, 2008). Vale ressaltar que, de acordo com França (2011), a câmera fotográfica necessita ser ao menos do tipo reflex de alta resolução. A máquina empregada para o ensaio foi Canon EOS 60D. A Figura 25 mostra o esquema da montagem dos equipamentos para a realização do ensaio.

Figura 25: Esquema da montagem dos equipamentos.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Após toda a montagem dos equipamentos para a realização do ensaio, deu-se início ao processo de texturização na superfície dos corpos de provas. Esta etapa foi iniciada com a realização da pintura dos corpos de prova na tonalidade da cor preta. Em segunda, por cima da textura preta formada em sua face, foi realizada uma pintura na tonalidade de cor branca até que se atingisse uma aspecto de cinza homogêneo na superfície do corpo de prova, como é mostrado na Figura 26. Finalizado este procedimento, os corpos de provas passaram a ser ensaiados com o auxílio da prensa hidráulica.

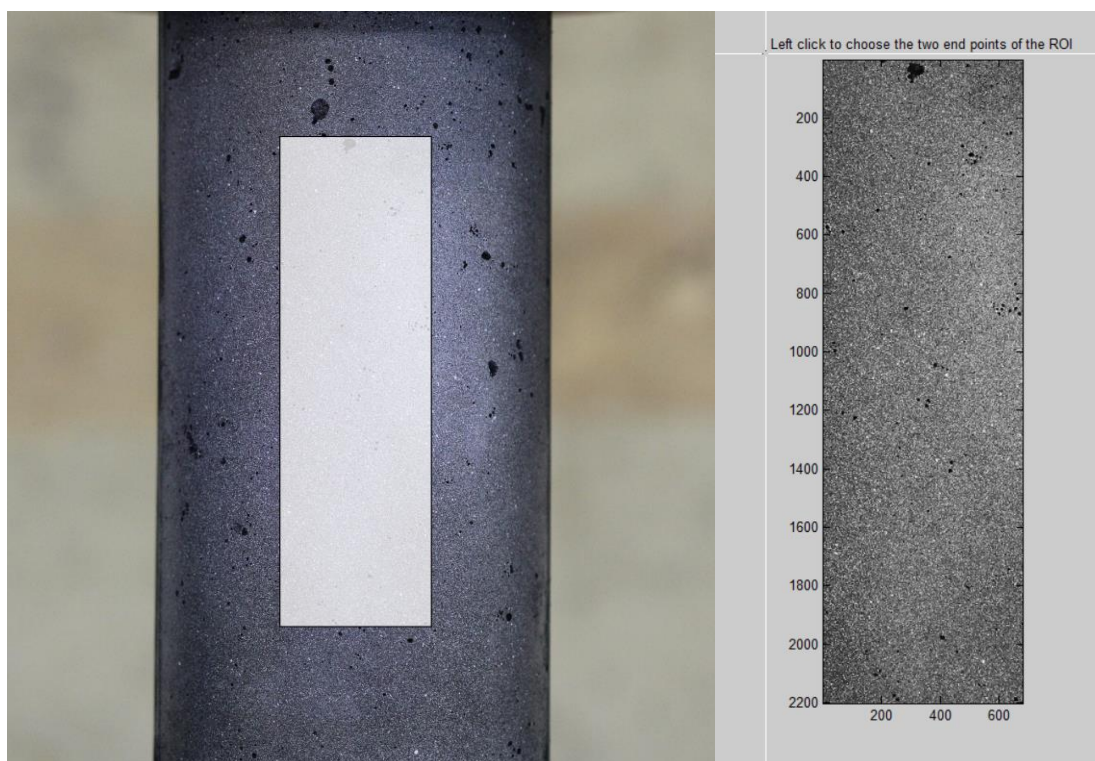
Figura 26: Texturização na superfície do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com o término dos ensaios de compressão axial e de posse das fotos retiradas durante a execução dos ensaios, deu-se início ao processo de análise do material adquirido. Inicialmente, utilizando um algoritmo implementado no MATLAB, as fotografias obtidas dos ensaios foram cortadas em retângulos (680×2200 pixels), cujo as linhas horizontais e verticais delimitavam uma certa área do corpo de prova, sendo esta a região de interesse ROI (Figura 27).

Figura 27: Delimitação da região de interesse ROI.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Posteriormente a esta etapa de aperfeiçoamento, as fotografias foram novamente submetidas no MATLAB, usando desta vez os algoritmos de correlação do Correli_Q4^{LMT} (HILD e ROUX, 2008), com os parâmetros de correlação descritos na Tabela 6. O princípio desta etapa é o de que “a distribuição dos valores de nível de cinza de uma área retangular, por exemplo, na imagem original corresponde à distribuição de valores de nível de cinza no mesmo setor na imagem de destino” (FRANÇA, 2011).

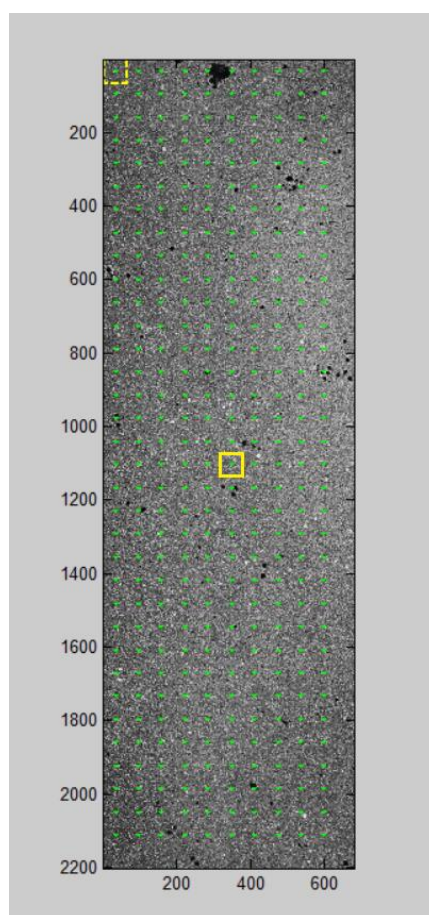
Tabela 6: Parâmetros empregados na correlação digital de imagens.

Velocidade de Ensaio	0,004 mm/s
Número de Incrementos	1
<i>Number of Scales</i> (Número de Escalas)	3
<i>ZOI size</i>	64 <i>Pixels</i>
<i>ZOI shift</i>	64 <i>Pixels</i>
<i>Max. Number of Iterations</i> (Número Máximo de Interações)	5
<i>Dinamic Range</i> (Faixa Dinâmica)	8 <i>Bit</i>

Fonte: Autoria própria, 2018.

Como pode ser observado na Tabela 6, foi adotado uma ZOI size (zonas de interesses) de 64 *pixels* para a discretização total da região de interesse ROI (Figura 28). Ou seja, a região de interesse ROI foi subdividida em várias amostras quadradas (64 x 64 *pixels*), sendo estas denominadas de zonas de interesse ZOI. Analisando a Figura 28, observa-se a representação de uma ZOI (quadrado delimitados por linhas amarelas) contida dentro da ROI.

Figura 28: Representação da zona de interesse ZOI com resolução de 64 *pixels*, dentro da ROI.

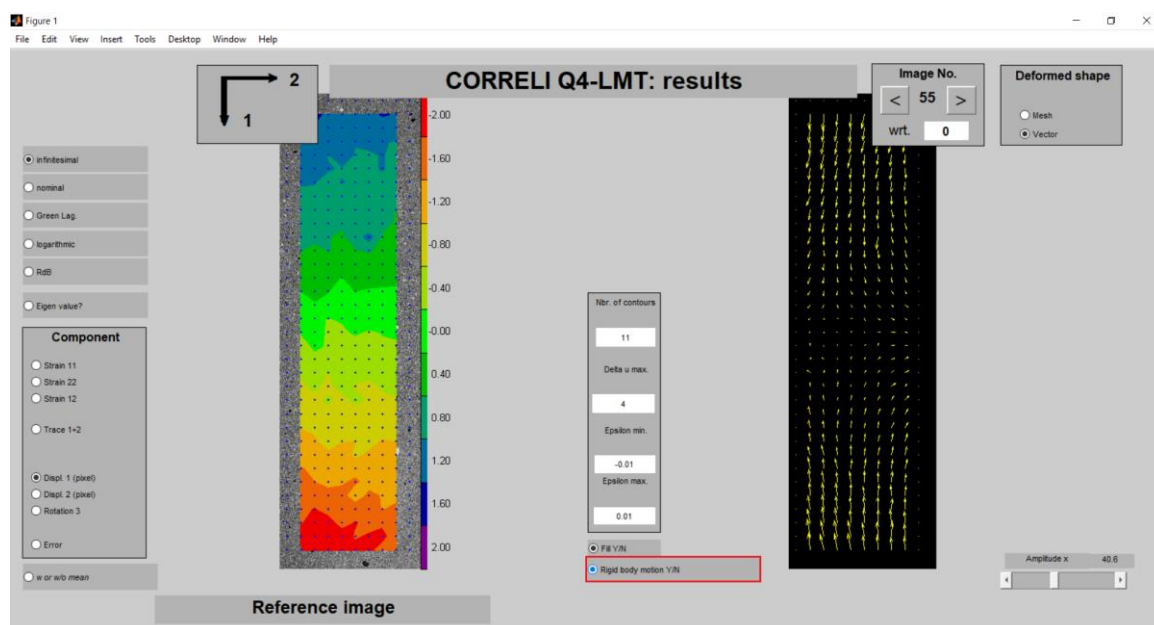


Fonte: Autoria própria, 2018.

Após o processamento das fotografias pelo software estar concluído, o dados gerados foram submetidos novamente ao Correli_Q4^{LMT} (HILD e ROUX, 2008) para a inicialização da função *gauge*. A partir desta função, iniciou-se o processo de demarcação do virtual *gauge*, sendo a sua principal função o cálculo dos deslocamentos e deformações médias em uma área relevante qualquer, dentro da região de interesse ROI, da fotografia analisada. No entanto, a demarcação do virtual *gauge* foi um procedimento dependente da opção *Rigid Body Motion* (movimento do corpo rígido), uma opção contida no comando *Visualization* presente no

Correli_Q4^{LMT} (HILD e ROUX, 2008) (Figura 29). Com isso, observou-se a partir dos vetores que o comportamento de compressão estava ocorrendo apenas nas extremidades.

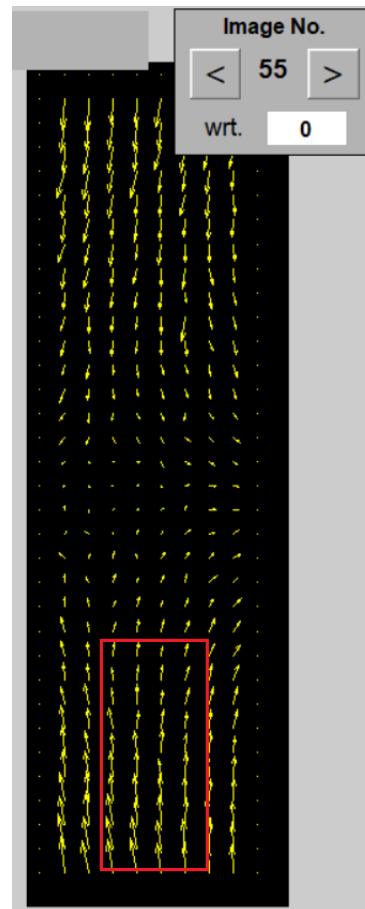
Figura 29: *Print Screen* da página representativa do comando *Visualization*.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Considerando que esse comportamento ocorreu em todos os corpos de prova ensaiados, para a análise da deformação média dos corpos de provas foi desenhado um retângulo (*gauge*) na extremidade inferior do corpo de prova (Figura 30). Optou-se por desenhar o *gauge* na extremidade inferior pelo fato dessa região está sendo maior influenciada, visto que do prato inferior da máquina hidráulica é a peça deslocável.

Figura 30: *Gauge* aplicado em um corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Finalizado os processos realizados pelo Correli_Q4^{LMT} (HILD e ROUX, 2008), os dados gerados pela máquina de ensaio e os produzidos a partir da correlação digital de imagens foram ordenados em uma planilha eletrônica. A partir desta planilha, foi possível a geração do diagrama de tensão-deformação para cada corpo de prova investigado. Vale ressaltar que devido ao esforço de compressão axial da máquina de ensaio ser aplicado verticalmente ao corpo de prova, para que seja possível correlacionar tensão com deformação e determinar o módulo de elasticidade tangente, é necessário que seja analisada a deformação vertical.

3.4.3 Ensaio de absorção e índice de vazios

O ensaio para a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica foi executado tomando como base os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 9778:2009 – Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

O procedimento metodológico desse ensaio consiste basicamente em determinar a massa do corpo de prova em três condições diferentes. A primeira pesagem ocorre após o corpo de prova passar por uma secagem em estufa durante 72 horas, ou seja, registra-se a massa da amostra na sua condição totalmente seca.

Por conseguinte, as duas próximas pesagens ocorrem após o processo de saturação total do corpo de provas. A condição de saturação é alcançada após a imersão total da amostra em água durante um período de 72 horas. Completada a etapa da imersão em água, o corpo de provas foi submetido a um procedimento de fervura durante um intervalo de 5 horas (Figura 31), na qual o volume de água dentro do recipiente deve permanecer o mais constante possível. Cessado o tempo de ebulição, a água foi mantida em repouso para esfriar naturalmente até uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Após a água atingir a temperatura recomendada pela norma, ocorre-se as duas pesagens restantes. A segunda determinação é obtida através de uma balança hidrostática, ou seja, na condição onde o corpo de provas está imerso em água. Em seguida, retira-se a amostra da água e determina a última massa na condição saturada com superfície seca.

Ao total foram ensaiados 9 corpos de prova nas pesquisa, sendo 3 amostras para cada dosagem de concreto. Ressalta-se que os corpos de provas foram submetidos ao ensaio com 28 dias de cura.

Determinada a massa dos corpos de provas para as três condições citadas acima, foi possível calcular a absorção (A) e o índice de vazios (Iv), em porcentagem, pelas equações 5 e 6, respectivamente.

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

A: absorção;

M_{sat}: massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

M_s: massa da amostra seca em estufa.

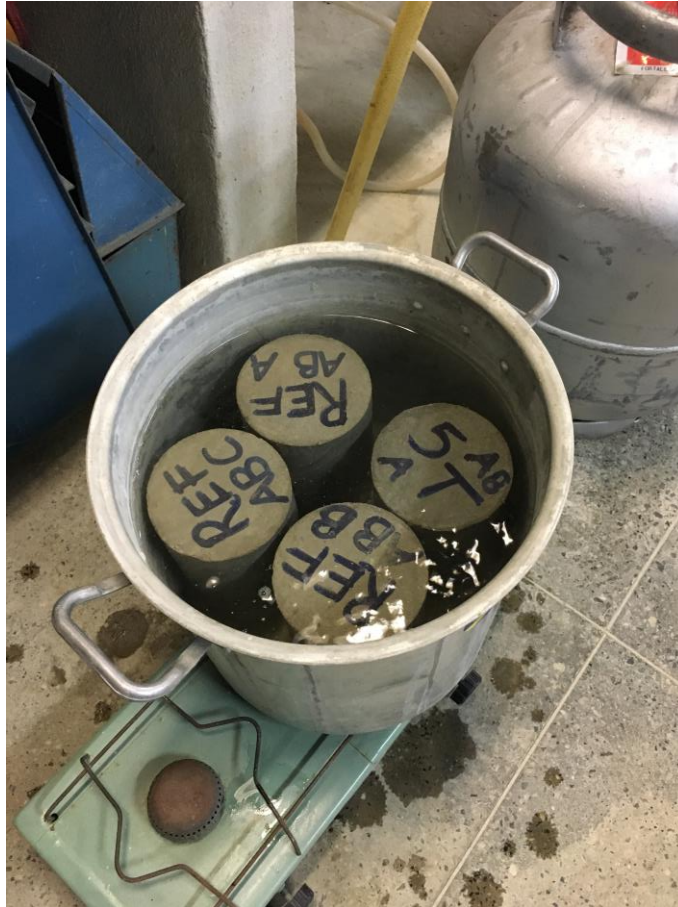
$$Iv = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} * 100 \text{ (Equação 6)}$$

Onde:

Iv: índice de vazios;

Mi: massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

Figura 31: Corpos de prova submetidos à fervura.



Fonte: Autoria própria, 2018.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Cimento Portland

4.1.1.1 Caracterização física

A partir das normas ABNT NBR 16605:2017 e ABNT NBR 16372:2015 foram obtidos os referentes resultados relacionados a caracterização física do cimento Portland (Tabela 7).

Tabela 7: Características físicas – cimento Portland.

Cimento Portland – CP V ARI	
Massa Específica	3,052 g/cm ³
Superfície Específica	5230 cm ² /g

Fonte: Autoria própria, 2018.

4.1.2 Cinza da casca de arroz – CCA

4.1.2.1 Caracterização física

Através das normas ABNT NBR 16605:2017 e ABNT NBR 16372:2015 foram obtidos os seguintes resultados como caracterização física da cinza da casca de arroz (CCA) após esta passar pelo tratamento físico proposto (Tabela 8).

Tabela 8: Características físicas – CCA.

Cinza da Casca de Arroz – CCA	
Massa Específica	2,210 g/cm ³
Superfície Específica	7722 cm ² /g

Fonte: Autoria própria, 2018.

Analisando a superfície específica da CCA (Tabela 7) e do cimento Portland (Tabela 8) infere-se que o processo de moagem foi satisfatório, tendo como resultado uma CCA com finura bem mais elevada quando comparada com a finura do cimento Portland. Considerando que a pesquisa avalia a substituição do cimento Portland por CCA em misturas de concreto, ressalta-

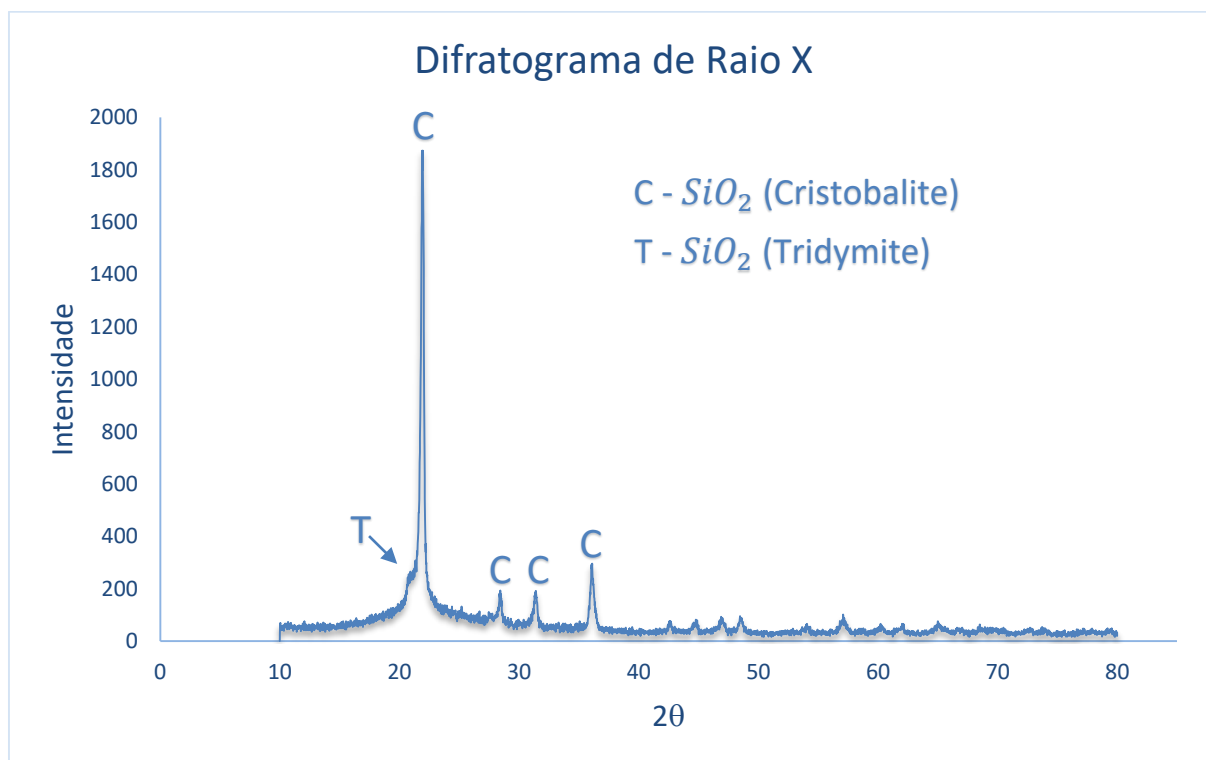
se a importância deste material apresentar uma finura equivalente ou superior a finura do cimento Portland, que é o aglomerante principal da dosagem.

Segundo Cezar (2011), dependendo do grau de moagem (finura), a CCA pode apresentar alta superfície específica (quanto maior a finura, maior a superfície específica) e, conseqüentemente, maior reatividade nas primeiras idades, induzindo a um aumento nas resistências inicial e final.

4.1.2.2 Caracterização mineralógica

A Figura 32 exibe a representação gráfica do difratograma de raio X da CCA no estado moído, ou seja, após está passar pelo processo de beneficiamento físico. Analisando o gráfico percebe-se a presença de picos indicando a presença de sílica cristalina sob a forma de cristais de cristobalita e tridimita, caracterizando a mineralogia da CCA investigada como cristalina.

Figura 32: DRX da amostra de CCA após tratamento físico.



Fonte: Autoria própria, 2018.

4.1.2.3 Índice de atividade pozolânica (IAP)

Através do ensaio realizado, seguindo os parâmetros da norma ABNT NBR 5752:2014, foi determinado o índice de atividade pozolânica da CCA investigada. O resultado obtido está descrito na Tabela 9.

Tabela 9: Resultado referente ao IAP da CCA estudada.

Corpos de Prova	Resistência à Compressão (MPa)	
	Argamassa A (REF)	Argamassa B (CCA)
CP 1	32,71	33,82
CP 2	33,54	34,07
CP 3	33,18	33,82
CP 4	33,86	34,86
CP 5	31,46	33,79
Média	32,95	34,07
IAP	103,4%	

Fonte: Autoria própria, 2018.

De acordo com a ABNT NBR 12653:2014, a CCA se enquadra na classe E de materiais pozolânicos. Além disso, a mesma relata que um dos requisitos físicos para o material ser considerado como pozolânico é de que a reação com o cimento Portland aos 28 dias de cura deve obedecer a relação de $IAP \geq 90\%$.

A partir da Equação 4, foi determinado que a CCA analisada na pesquisa possui um $IAP = 103,4\%$, ou seja, atende um dos requisitos físicos estabelecido pela ABNT NBR 12653:2014 para o material ser julgado pozolânico.

4.1.3 Agregado graúdo e miúdo

4.1.3.1 Caracterização física

A partir dos procedimentos metodológicos adotados para determinação das características físicas, obteve-se os seguintes resultados para o agregado miúdo (Tabelas 10 e 11) e agregado graúdo (Tabelas 12 e 13).

Tabela 10: Curva granulométrica – Agregado miúdo.

Agregado Miúdo				
# Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Porcentagem Retida Acumulada (%)	
	A	B	A	B
4,75	0,00	0,00	0,00	0,00
2,36	10,45	14,80	2,89	3,71
1,20	55,00	67,00	18,10	20,49
0,60	142,90	149,00	57,63	57,82
0,30	117,30	124,00	90,07	88,88
0,15	31,60	37,20	98,81	98,20
Fundo	4,30	7,20	-	-
Total	361,55g	399,20g	267,50%	269,09%

Fonte: Autoria própria, 2018.

Tabela 11: Características físicas – Agregado miúdo.

Agregado Miúdo	
Módulo de Finura	2,682
Dimensão Máxima Característica	4,75 mm
Massa Específica	2,655 g/cm ³
Massa Unitária no Estado Solto	1,451 g/cm ³
Massa Unitária no Estado Compactado	1,555 g/cm ³

Fonte: Autoria própria, 2018.

Tabela 12: Curva granulométrica – Agregado Graúdo.

Agregado Graúdo				
# Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Porcentagem Retida Acumulada (%)	
	A	B	A	B
25,0	0,00	0,00	0,00	0,00
19,0	112,00	136,70	2,22	2,72
12,5	2073,50	2012,50	43,39	42,76
9,50	1892,40	1988,80	80,95	82,34
6,30	893,60	837,70	98,69	99,00
4,75	44,40	34,10	99,58	99,68
2,36	14,00	9,60	99,85	99,87
Fundo	7,40	6,40	-	-
Total	5037,3g	5025,8g	424,68%	426,38%

Fonte: Autoria própria, 2018.

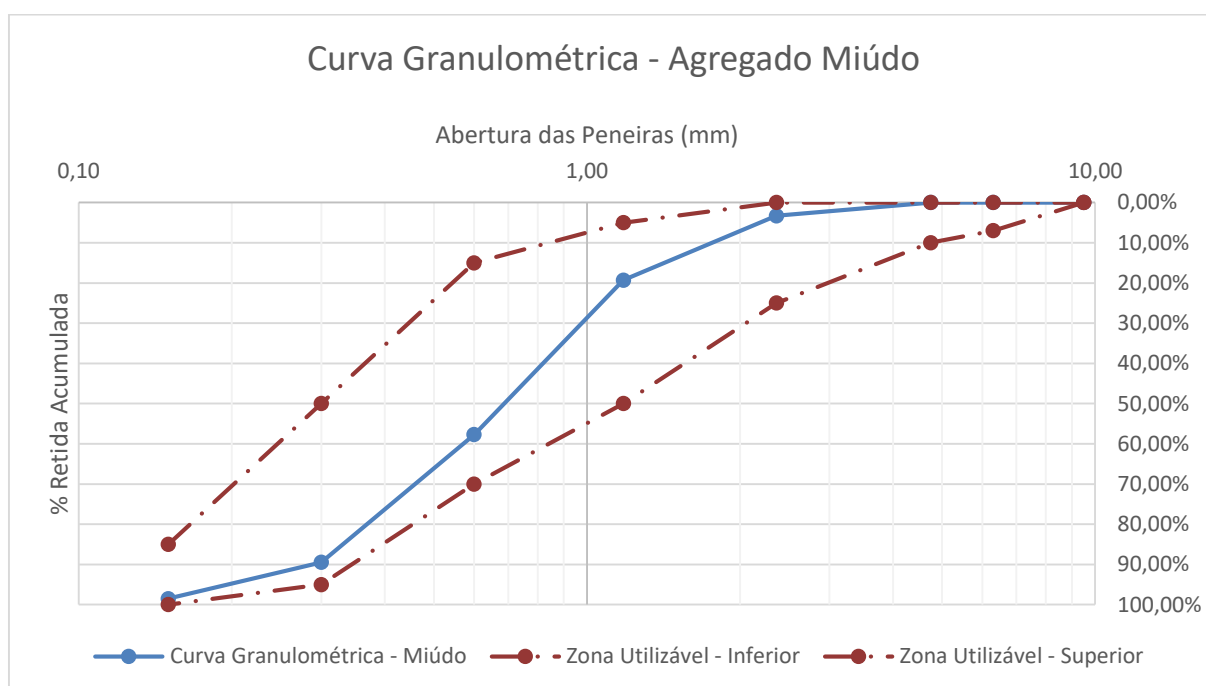
Tabela 13: Características físicas – Agregado Graúdo.

Agregado Graúdo	
Módulo de Finura	4,255
Dimensão Máxima Característica	19,0 mm
Massa Específica na Condição Seca	2,671 g/cm ³
Massa Específica na Condição Saturada Superfície Seca	2,681 g/cm ³
Absorção	0,38%
Massa Unitária no Estado Solto	1,447 g/cm ³
Massa Unitária no Estado Compactado	1,539 g/cm ³

Fonte: Autoria própria, 2018.

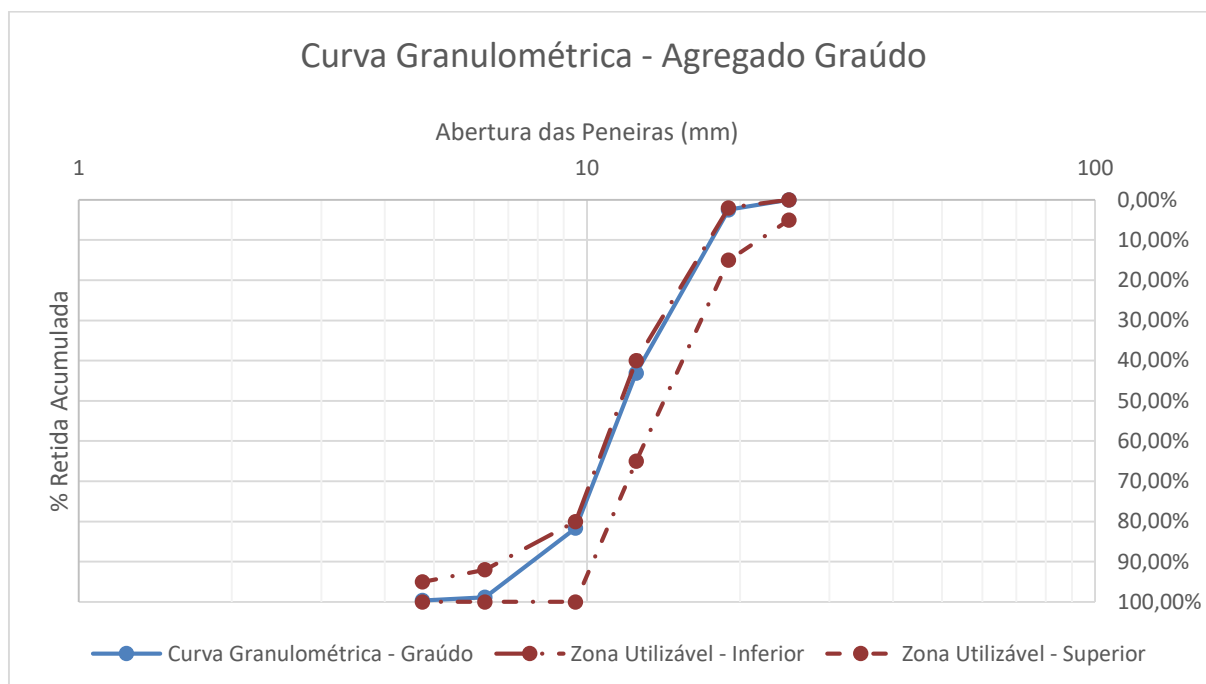
A seguir temos uma representação gráfica da curva granulométrica do agregado miúdo (Figura 33) e do agregado graúdo (Figura 34).

Figura 33: Curva Granulométrica – Agregado Miúdo.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 34: Curva Granulométrica – Agregado Graúdo.



Fonte: Autoria própria, 2018.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias de cura para as dosagens investigadas estão apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Resultado de resistência à compressão aos 28 dias de cura.

Traço	Corpos de Prova	Resistência à Compressão (Mpa)			
		28 Dias	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
REF	REF - 1 (C)	29,76	28,80	0,97	3,37
	REF - 2 (C)	27,72			
	REF - 3 (C)	29,78			
	REF - 4	27,95			
5% CCA M	5% M - 1 (C)	34,29	33,95	1,25	3,68
	5% M - 2 (C)	31,90			
	5% M - 3 (C)	34,30			
	5% M - 4	35,29			
10% CCA M	10% M - 1 (C)	32,64	33,51	0,93	2,78
	10% M - 2 (C)	34,89			
	10% M - 3 (C)	32,67			
	10% M - 4	33,85			

Fonte: Autoria própria, 2018.

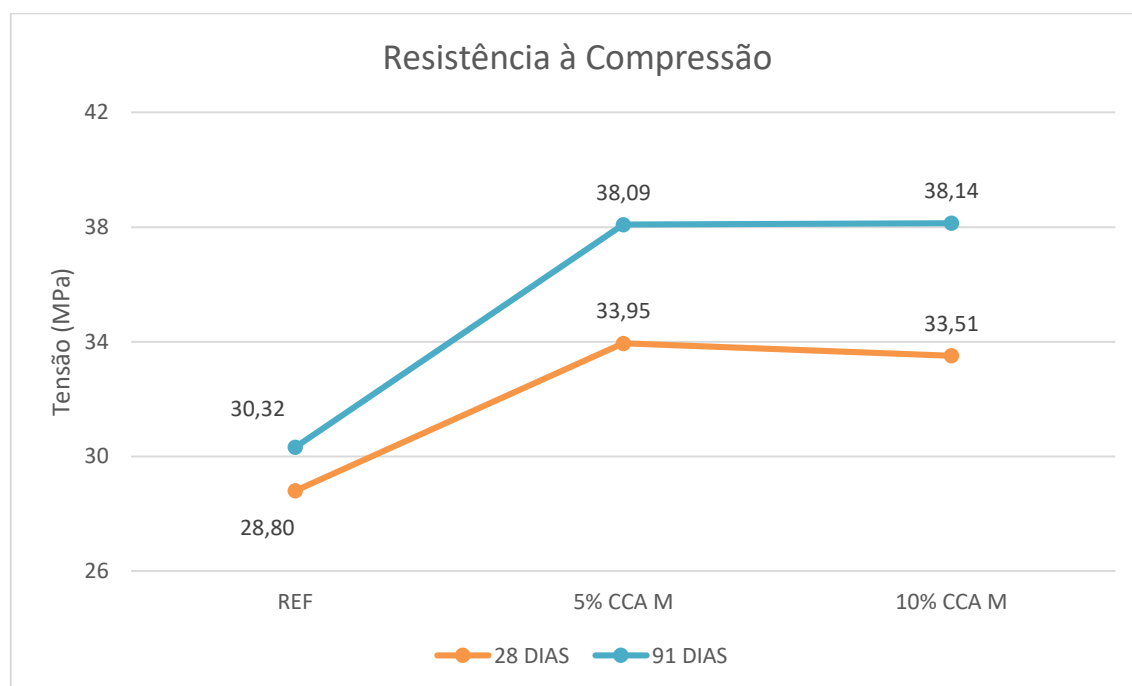
Tabela 15: Resultado de resistência à compressão aos 91 dias de cura.

Traço	Corpos de Prova	Resistência à compressão (Mpa)			
		91 Dias	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
REF	REF - 5	28,97	30,32	1,23	4,07
	REF - 6	29,42			
	REF - 7	30,78			
	REF - 8	32,12			
5% CCA M	5% M - 5	36,71	38,09	1,10	2,88
	5% M - 6	39,31			
	5% M - 7	39,01			
	5% M - 8	37,33			
10% CCA M	10% M - 5	36,49	38,14	1,04	2,72
	10% M - 6	38,12			
	10% M - 7	39,28			
	10% M - 8	38,66			

Fonte: Autoria própria, 2018.

A seguir temos uma representação gráfica (Figura 35) apresentando o valor da média de resistência à compressão de cada traço de concreto investigada.

Figura 35: Representação gráfica dos valores de resistência à compressão.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Analisando a Figura 35 destaca-se que, em todas as idades de cura investigadas, ocorreu um aumento de resistência à compressão axial das dosagens de concreto 5% CCA M e 10% CCA M quando comparadas com a mistura referência.

Outra observação a ser explorada é o fato de que, independente das idades de cura, os valores de resistência média dos traços 5% CCA M e 10% CCA M foram bastante similares. Para as dosagens ensaiadas aos 28 dias de cura, quando comparadas com o referencial, o valor da resistência à compressão axial do traço 5% CCA M foi superior cerca de 17,8% e para o traço de 10% CCA M foi aproximadamente de 16,3 % maior. Para as dosagens ensaiadas aos 91 dias de cura, o traço de 5% CCA M foi superior 25,5% quando comparado com a resistência à compressão axial do referência, já o traço de 10% CCA M foi em torno de 25,7%.

Tal desempenho corrobora com o comportamento encontrado por Queiroz et al. (2015) na sua pesquisa, onde a substituição de cimento Portland por uma CCA, obtida por uma combustão não controlada, se mostrou satisfatórias para os teores de 5% e 10% nas misturas de concreto. Ressalta que a CCA passou por um processo de moagem durante 30 minutos. Ainda é possível confirmar este comportamento com a pesquisa de Habeeb e Mahmud (2010), na qual obtiveram como resultado a viabilidade de substituição nos teores de 5% e 10% de cimento Portland por CCA em todas as granulometrias investigadas.

4.3 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

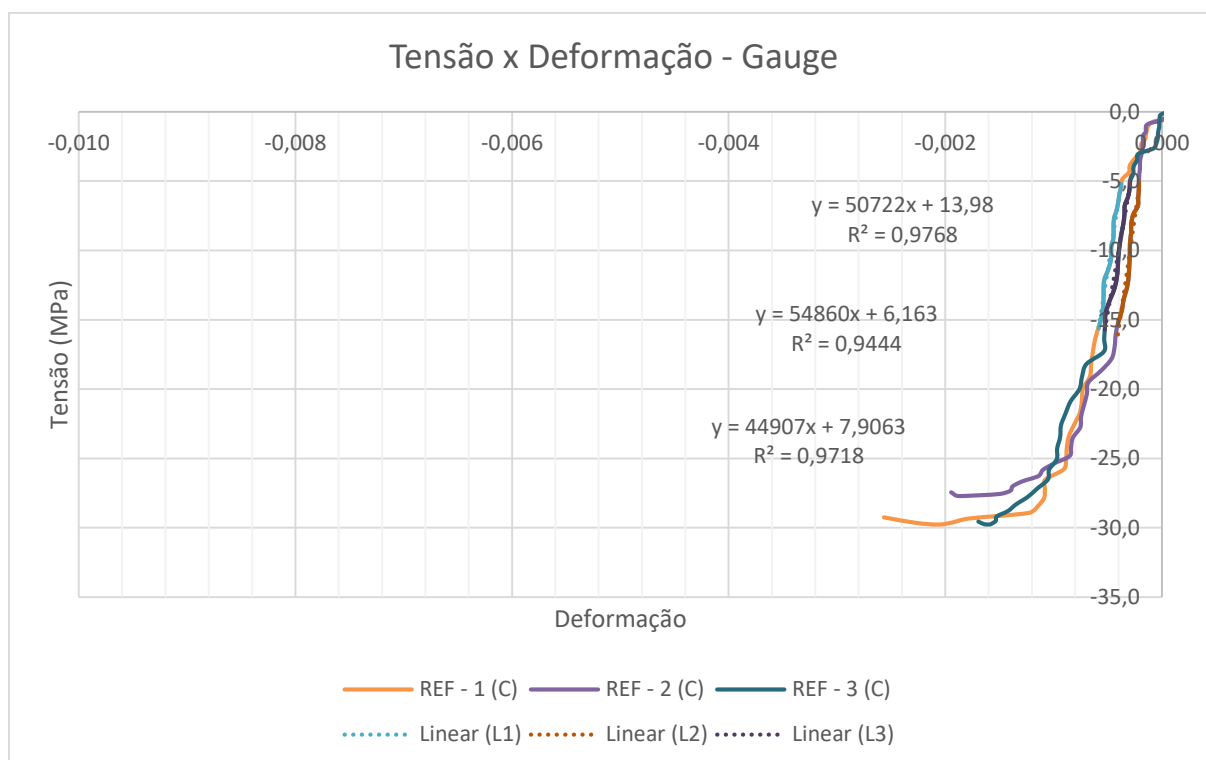
Baseado nos valores de deformações dos corpos de prova, calculados pela técnica da correlação digital de imagens, e com os dados de força da máquina de ensaio foi possível a geração do diagrama de tensão-deformação para todos os corpos de provas de cada dosagem de concreto que passaram pela referente análise.

A partir dos diagramas, foi possível determinar o módulo de elasticidade tangente dos corpos de provas traçando-se uma reta de tendência na zona elástica do *gauge* investigada. As coordenadas desta reta são os valores de tensão, dentro de um intervalo estabelecido, e suas respectivas deformações obtidas pela correlação digital de imagens. O intervalo dos valores de tensão selecionados para a elaboração da reta foi de 5 a 15 MPa para o eixo das ordenadas e as deformações correspondentes para cada valor de tensão no eixo das abcissas. Feito isso, o módulo de elasticidade tangente de cada corpo de prova foi determinado pelo valor da constante gerada pela reta de tendência no diagrama do *gauge* estabelecido.

4.3.1 Dosagem referencial

Os diagramas de tensão-deformação para os corpos de prova REF - 1 (C), REF - 2 (C) e REF - 3 (C) são apresentados a seguir, na Figura 36.

Figura 36: Diagramas tensão-deformação para as amostras da dosagem referência.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os valores de módulo de elasticidade tangente dos corpos de prova REF - 1 (C), REF - 2 (C) e REF - 3 (C) estão exibidos na Tabela 16.

Tabela 16: Resultado de módulo de elasticidade tangente para a dosagem referência.

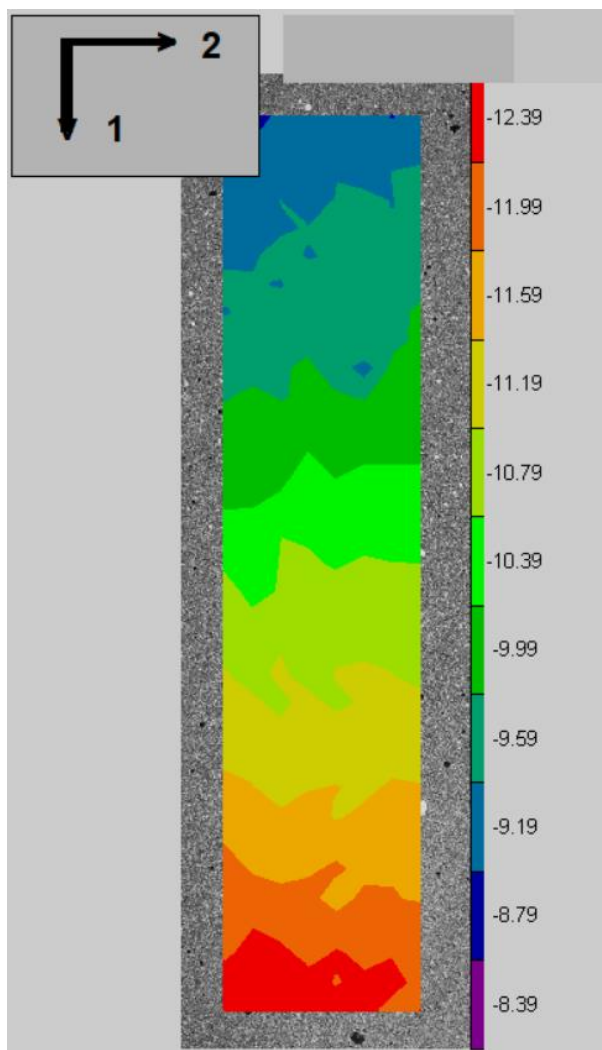
Corpos de Provas	REF - 1 (C)	REF - 2 (C)	REF - 3 (C)
Módulo de Elasticidade (MPa)	50722,00	54860,00	44907,00
Média (MPa)	50163,00		
Desvio Padrão (MPa)	4082,48		
Coef. De Variação (%)	8,14		

Fonte: Autoria própria, 2018.

Além do módulo de elasticidade tangente, com o método da correlação digital de imagens pode-se analisar o comportamento dos corpos de prova quanto aos campos de deslocamento e deformação, na direção de interesse (direção 1), quando estes estavam submetidos ao ensaio de compressão axial.

As Figuras 37, 38 e 39 representam uma análise da imagem 56 do REF - 1 (C) aos 275 segundos de ensaio, com força igual a 232620 N, antecedendo em 5 segundos o instante da força máxima do ensaio e a ruptura do corpo de prova. Vale ressaltar que o sinal negativo presente na escala de cores das imagens representa o sentido dos campos de deslocamento e deformação que estão sucedendo no corpo de prova durante o ensaio.

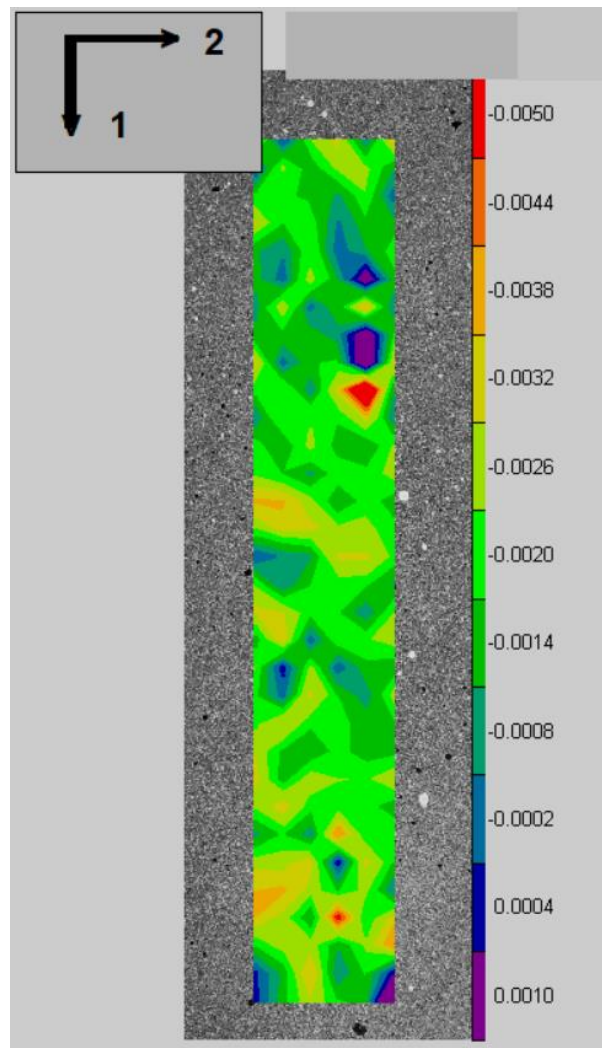
Figura 37: Campos de deslocamentos na direção 1 para o REF - 1 (C).



Fonte: Autoria própria, 2018.

Temos na Figura 37 uma representação gráfica dos campos de deslocamentos, onde o Pixel é adotado como unidade de medida. Para esta imagem obedece a relação de 1 Pixel = 0,058 mm. Percebe-se, ao examinar a mesma, a presença apenas de campos de deslocamentos negativos variando de -8,39 a -12,39 Pixels. Além disso, é observado faixas horizontais de deslocamentos bem definidas, onde o maior deslocamento sofrido pelo corpo de prova está concentrado na sua região inferior, e que vai diminuindo de intensidade a medida que se aproxima da região superior. Este comportamento pode ser explicado devido ao prato inferior da máquina de ensaio ser a parte móvel, ou seja, durante o ensaio o prato inferior que está se deslocando para cima, ocasionando um maior impacto na região inferior do corpo de prova.

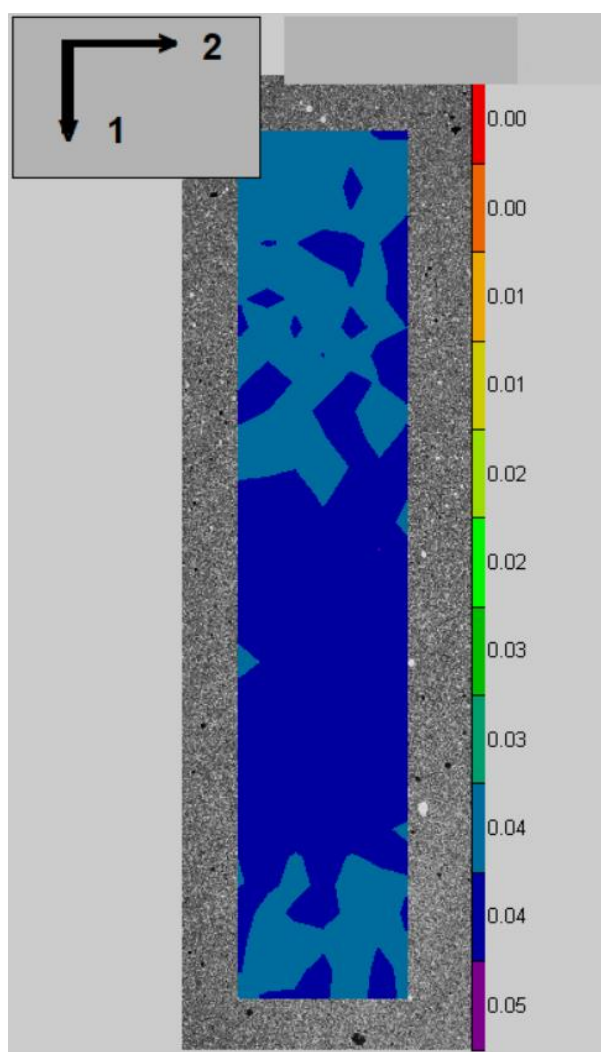
Figura 38: Campos de deformação na direção 1 para o REF - 1 (C).



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 38 apresenta uma representação gráfica dos campos de deformação, que tem como forma de medida um valor adimensional. Analisando a mesma, nota-se o comportamento esperado de deformações para um corpo de prova submetido ao ensaio de compressão axial, ou seja, a presença predominante de deformações negativas variando de -0,002 a -0,0014. Contudo, é perceptível a presença de pequenas regiões, distribuídas aleatoriamente no corpo de prova, com deformações positivas variando de 0,0004 a 0,0010.

Figura 39: Carta de erro para o REF - 1 (C).



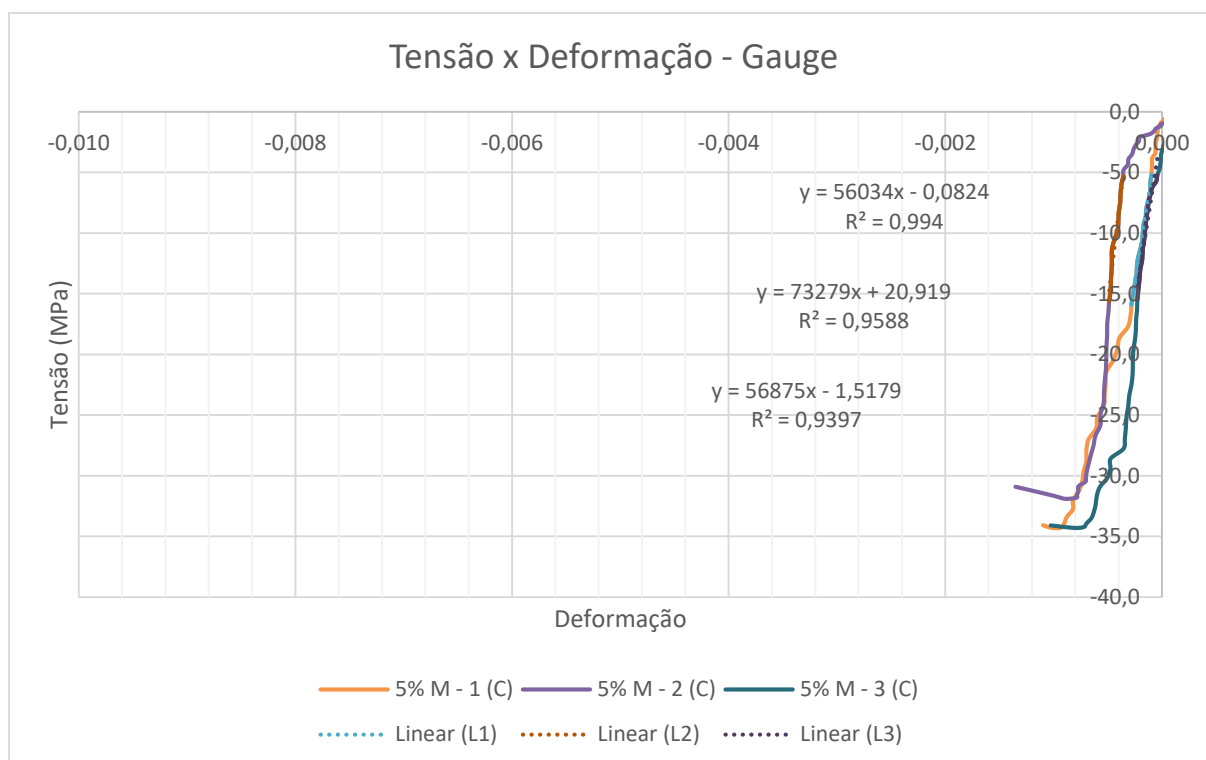
Fonte: Autoria própria, 2018.

Por fim, na Figura 39 temos a representação da carta de erros para as informações desta imagem, onde pode-se observar uma predominância de erro na faixa dos 4%.

4.3.2 Dosagem 5% CCA M

Os diagramas de Tensão x Deformação para os corpos de prova 5% M - 1 (C), 5% M - 2 (C) e 5% M - 3 (C) são apresentados a seguir, na Figuras 40.

Figura 40: Diagramas tensão-deformação para as amostras da dosagem 5% CCA M.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os valores de módulo de elasticidade tangente dos corpos de prova 5% M - 1 (C), 5% M - 2 (C) e 5% M - 3 (C) estão exibidos na Tabela 17.

Tabela 17: Resultado de módulo de elasticidade tangente para a dosagem 5% CCA M.

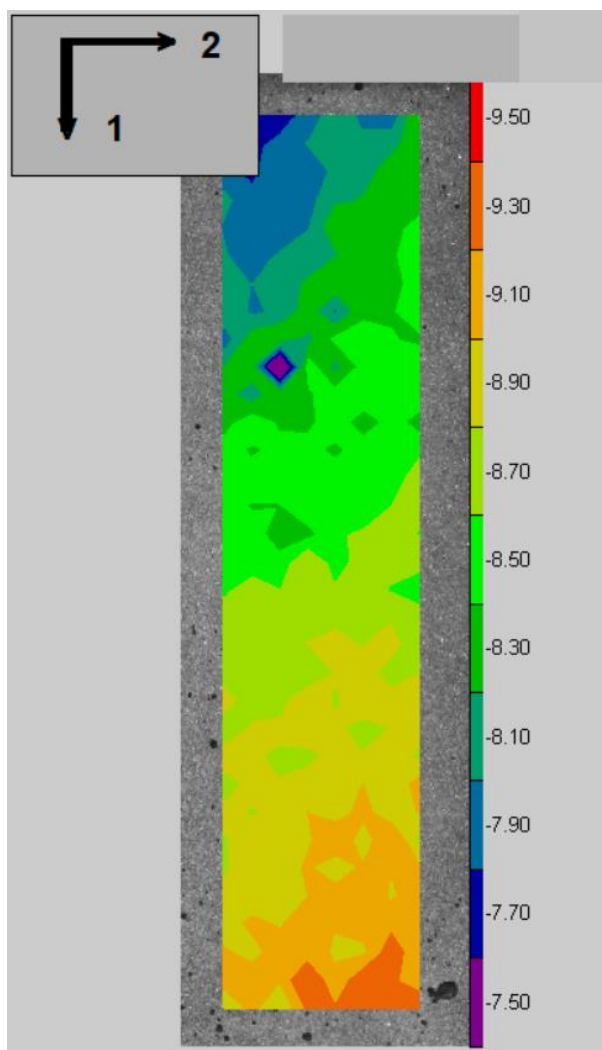
Corpos de Provas	5% M - 1 (C)	5% M - 2 (C)	5% M - 3 (C)
Módulo de Elasticidade (MPa)	56034,00	73279,00	56875,00
Média (MPa)	62062,67		
Desvio Padrão (MPa)	7938,57		
Coef. De Variação (%)	12,79		

Fonte: Autoria própria, 2018.

Pode-se novamente, com o auxílio da correlação digital de imagens, analisar o comportamento dos corpos de prova quanto aos campos de deslocamento e deformação, na direção de interesse (direção 1), quando estes estavam submetidos ao ensaio de compressão axial.

As Figuras 41, 42 e 43 representam uma análise da imagem 66 do 5% M - 3 (C) aos 325 segundos de ensaio, com força igual a 266630 N, antecedendo em 5 segundos o instante da força máxima do ensaio e a ruptura do corpo de prova. Vale ressaltar que o sinal negativo presente na escala de cores das imagens representa o sentido dos campos de deslocamento e deformação que estão sucedendo no corpo de prova durante o ensaio.

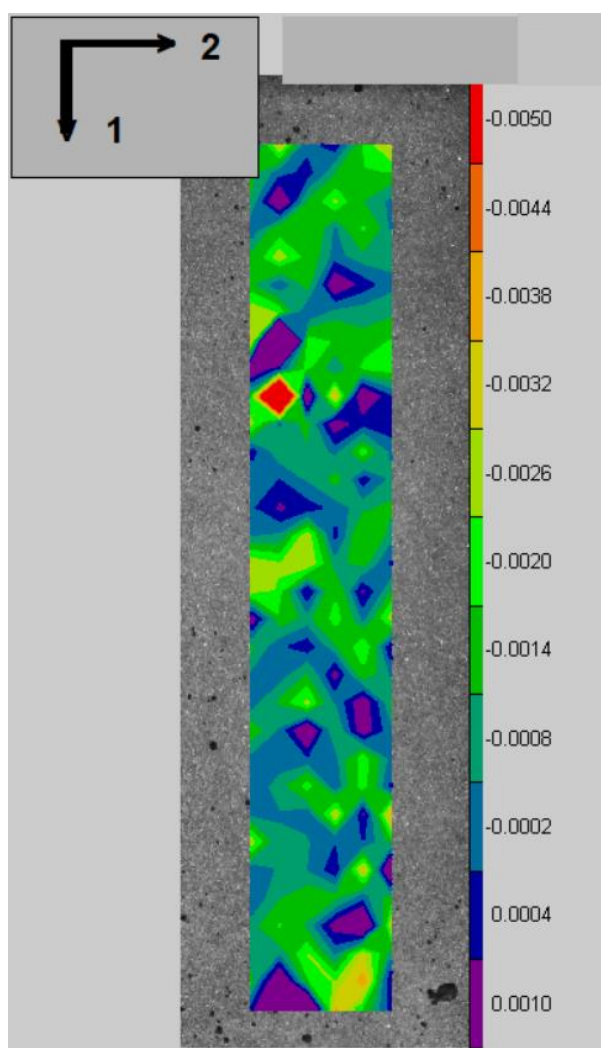
Figura 41: Campos de deslocamentos na direção 1 para o 5% M - 3 (C).



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 41 representa uma imagem referente aos campos de deslocamentos, onde temos como unidade de medida o Pixel. Para esta imagem obedece a relação $1 \text{ Pixel} = 0,063 \text{ mm}$. Ao analisar a mesma, percebe-se novamente a presença exclusiva de campos de deslocamentos negativos variando de -7,50 a -9,50 Pixels. Com relação ao maior deslocamento sofrido pelo corpo de prova, mais uma vez é observado que este se concentra na região inferior, e que vai diminuindo de intensidade a medida que se aproxima da região superior. Além do mais, é visível que as faixas de deslocamentos horizontais não estão bem definidas.

Figura 42: Campos de deformação na direção 1 para o 5% M - 3 (C).

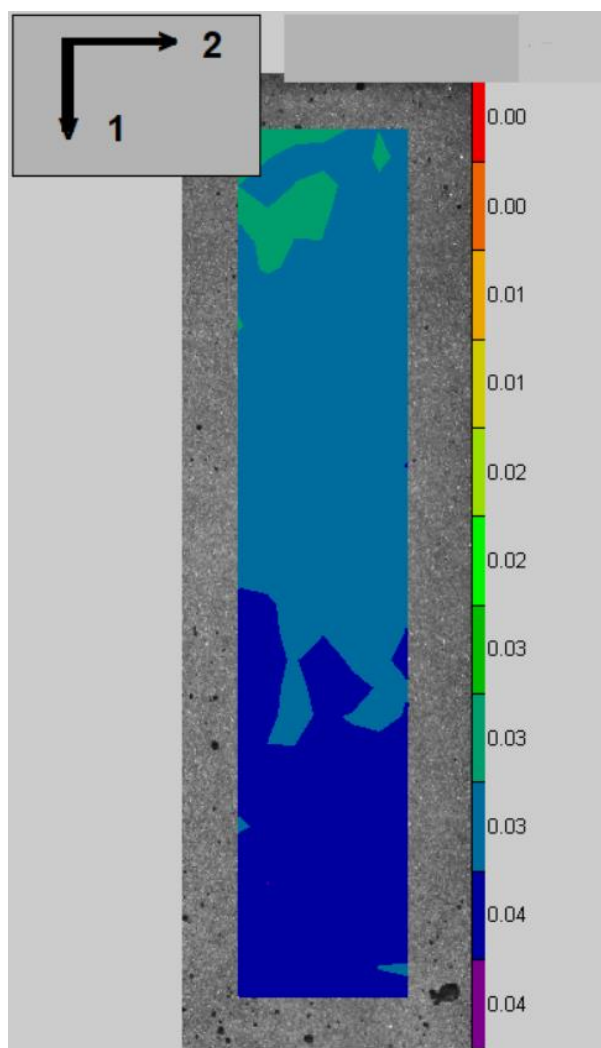


Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 42 caracteriza uma imagem referente aos campos de deformação, tendo como forma de medida um valor adimensional. Avaliando a mesma, temos novamente o comportamento esperado de deformações para um corpo de prova submetido ao ensaio de

compressão axial. Nota-se a prevalente presença de deformações negativas variando de -0,0002 a -0,0014. No entanto, percebe-se também a presença de pequenas regiões, distribuídas aleatoriamente, com deformações positivas variando de 0,004 a 0,0010.

Figura 43: Carta de erro para o 5% M - 3 (C).



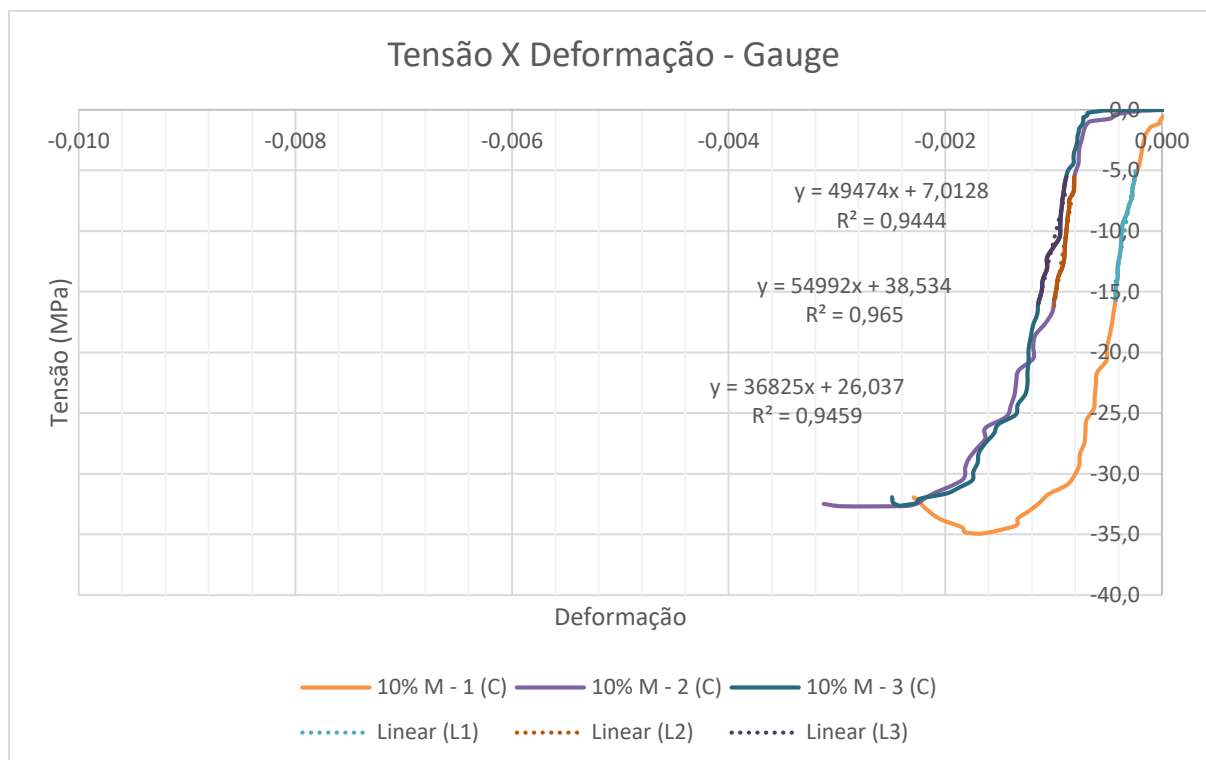
Fonte: Autoria própria, 2018.

Por fim, na Figura 43 temos a representação da carta de erros para as informações desta imagem. É observado na imagem uma predominância de erro na faixa dos 3%, com uma considerável região na parte inferior do corpo de prova com erro na faixa de 4%.

4.3.3 Dosagem 10% CCA M

Os diagramas de Tensão x Deformação para os corpos de prova 10% M - 1 (C), 10% M - 2 (C) e 10% M - 3 (C) são apresentados a seguir, na Figura 44.

Figura 44: Diagramas tensão-deformação para as amostras da dosagem 10% CCA M.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os valores de módulo de elasticidade tangente dos corpos de prova 10% M - 1 (C), 10% M - 2 (C) e 10% M - 3 (C) estão exibidos na Tabela 18.

Tabela 18: Resultado de módulo de elasticidade tangente para a dosagem 10% CCA M.

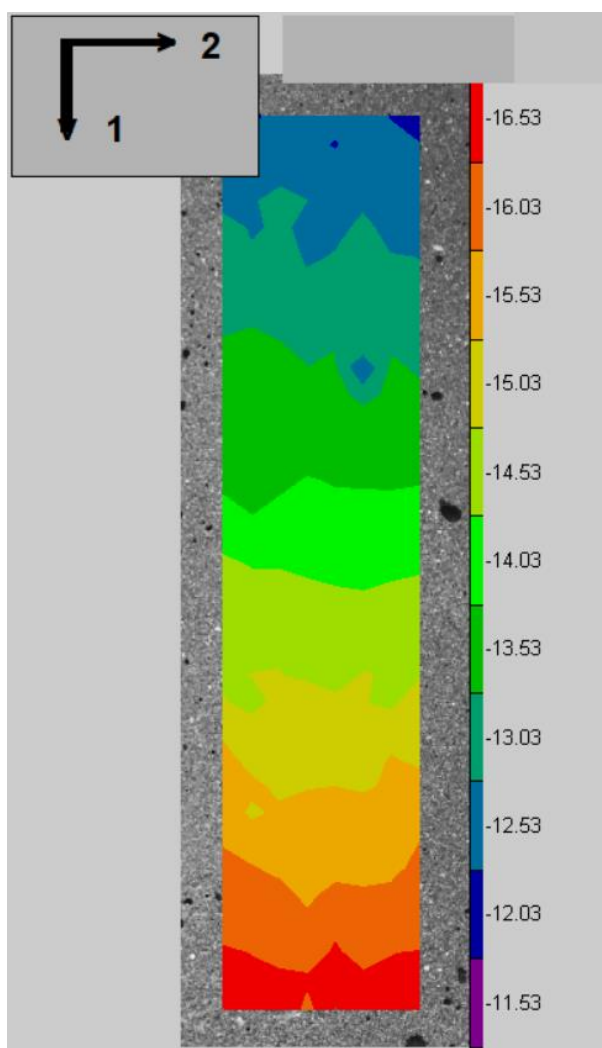
Corpos de Provas	10% M - 1 (C)	10% M - 2 (C)	10% M - 3 (C)
Módulo de Elasticidade (MPa)	49474,00	54992,00	36825,00
Média (MPa)	47097,00		
Desvio Padrão (MPa)	7604,72		
Coef. De Variação (%)	16,15		

Fonte: Autoria própria, 2018.

Mais uma vez, a partir da correlação digital de imagens, pode-se analisar o comportamento dos corpos de prova quanto aos campos de deslocamento e deformação, na direção de interesse (direção 1), quando estes estavam submetidos ao ensaio de compressão axial.

As Figuras 45, 46 e 47 representam uma análise da imagem 62 do 10% M - 3 (C) aos 305 segundos de ensaio, com força igual a 256160 N, antecedendo em 5 segundos o instante da força máxima do ensaio e a ruptura do corpo de prova. Vale ressaltar que o sinal negativo presente na escala de cores das imagens representa o sentido dos campos de deslocamento e deformação que estão sucedendo no corpo de prova durante o ensaio.

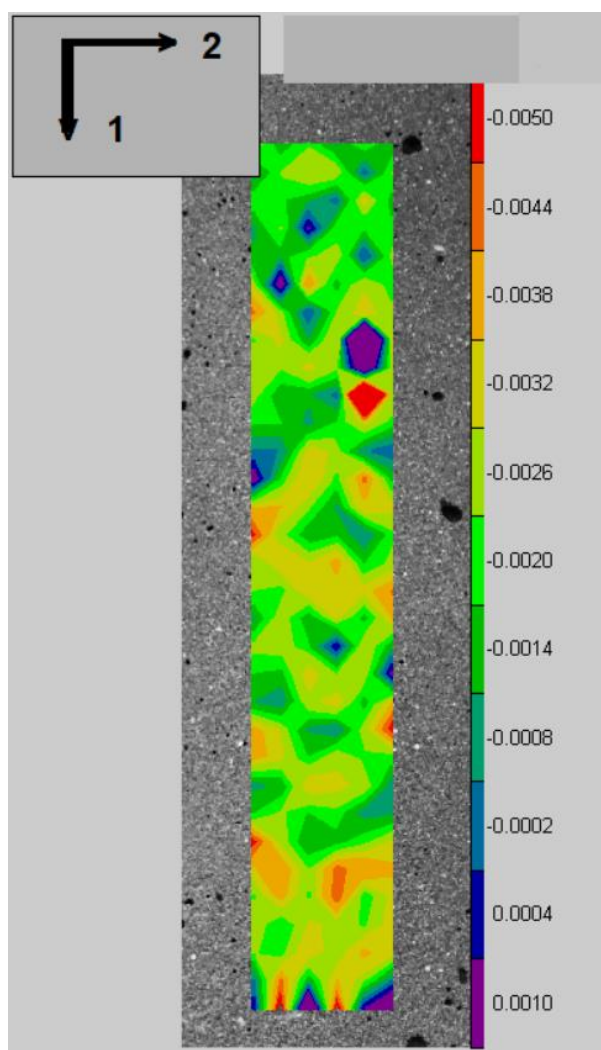
Figura 45: Campos de deslocamentos na direção 1 para o 10% M - 3 (C).



Fonte: Autoria própria, 2018.

Temos na Figura 45 uma representação gráfica dos campos de deslocamentos, onde o Pixel é adotado como unidade de medida. Para esta imagem obedece a relação de 1 Pixel = 0,059 mm. Ao analisar a mesma, percebe-se repetidamente a presença exclusiva de campos de deslocamentos negativos variando de -11,53 a -16,53 Pixels. Além disso, é observado faixas horizontais de deslocamentos bem definidas, onde o maior deslocamento sofrido pelo corpo de prova está concentrado na sua região inferior, e que vai diminuindo de intensidade a medida que se aproxima da região superior.

Figura 46: Campos de deformação na direção 1 para o 10% M - 3 (C).

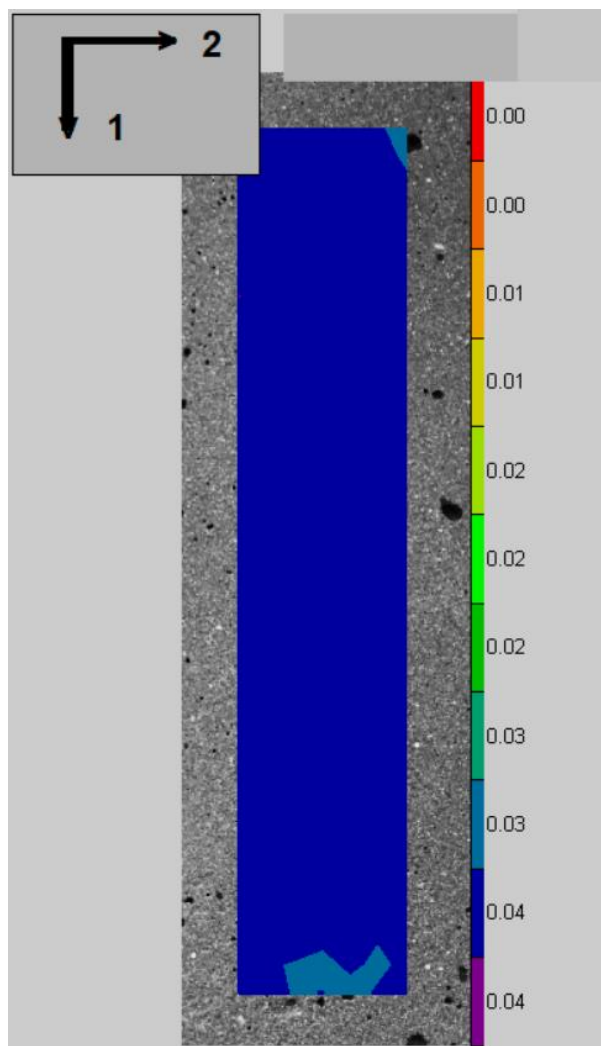


Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 46 caracteriza uma imagem referente aos campos de deformação, tendo como forma de medida um valor adimensional. Avaliando a mesma, temos mais uma vez o comportamento esperado de deformações para um corpo de prova submetido ao ensaio de

compressão axial. Nota-se a predominante presença de deformações negativas variando de -0,0014 a -0,0032. No entanto, percebe-se também a presença de pequenas regiões, distribuídas aleatoriamente, com deformações positivas variando de 0,004 a 0,0010.

Figura 47: Carta de erro para o 10% M - 3 (C).



Fonte: Autoria própria, 2018.

Por fim, a Figura 47 representa a carta de erros para as informações desta imagem. É observado na imagem uma predominância forte de erro na faixa dos 4%.

4.3.4 Análise comparativa

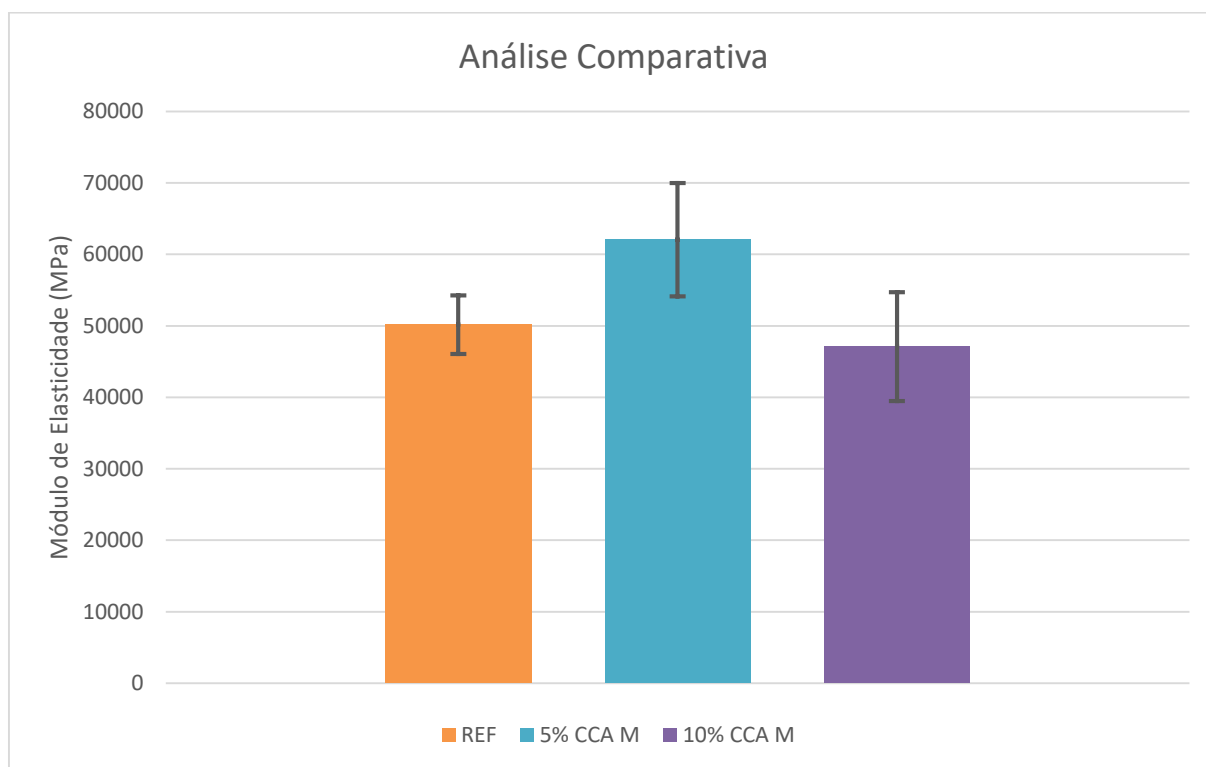
A Figura 48 exibe uma representação gráfica referente ao valor do módulo de elasticidade tangente e seu respectivo desvio padrão (Tabela 19), obtidos por uma média aritmética dos corpos de prova de cada mistura.

Tabela 19: Resultado médio do módulo de elasticidade tangente de cada dosagem.

Dosagem	Módulo de Elasticidade (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
REF	50163,00	± 4082,48
5% CCA M	62062,67	± 7938,57
10% CCA M	47097,00	± 7604,72

Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 48: Análise comparativa entre o módulo de elasticidade tangente de cada dosagem.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Conforme a Figura 48, observa-se um aumento de aproximadamente 23,7% do módulo de elasticidade tangente da dosagem 5% CCA M quando comparado com o valor obtido para a mistura referência. Já para o traço 10% CCA M, foi constatado uma redução em torno de 6,11% em relação ao módulo de elasticidade tangente da dosagem referência.

A Tabela 20 apresenta, de acordo com o desvio padrão, o menor e maior valor de módulo de elasticidade tangente que se pode atribuir para cada dosagem de concreto. A partir de conceitos estatísticos, é possível afirmar que a adição da CCA nas misturas de concreto exerce pouca influência nesta propriedade mecânica, já que pode ser admissível, a partir dos desvio padrão calculados, valores entre 54124,09 e 54245,48 MPa para qualquer mistura de concreto.

Tabela 20: Intervalo de valores para o módulo de elasticidade tangente de cada dosagem.

Dosagem	Módulo de Elasticidade (MPa)	
	Menor Valor	Maior Valor
REF	46080,52	54245,48
5% CCA M	54124,09	70001,24
10% CCA M	39492,28	54701,72

Fonte: Autoria própria, 2018.

4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Os resultados do ensaio de absorção e porosidade realizado na idade de 28 dias de cura nas dosagens investigadas estão expostos na Tabela 21.

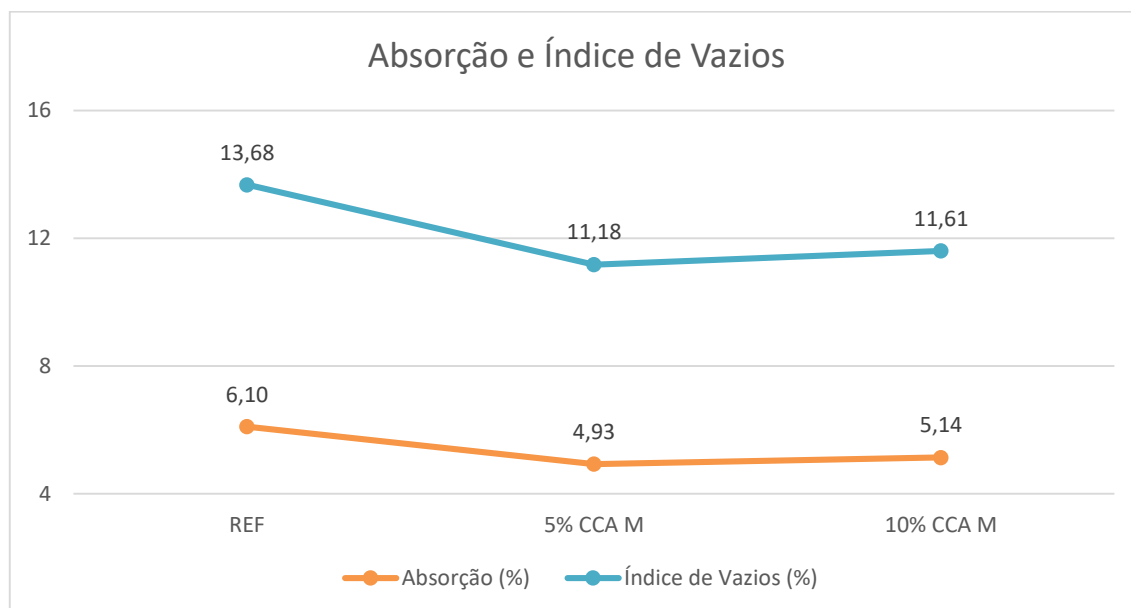
Tabela 21: Resultado de absorção de água e índice de vazios para as dosagens investigadas.

REFERENCIAL		
Corpos de Prova	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)
REF - 1 (AB)	6,02	13,50
REF - 2 (AB)	6,18	13,82
REF - 3 (AB)	6,11	13,71
Média	6,10	13,68
Desvio Padrão	0,06	0,13
Coef. de Variação (%)	1,05	0,97
5% CCA M		
Corpos de Prova	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)
5% CCA M - 1 (AB)	4,95	11,25
5% CCA M - 2 (AB)	4,83	10,96
5% CCA M - 3 (AB)	5,01	11,33
Média	4,93	11,18
Desvio Padrão	0,08	0,16
Coef. de Variação (%)	1,53	1,43
10% CCA M		
Corpos de Prova	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)
10% CCA M - 1 (AB)	5,16	11,67
10% CCA M - 2 (AB)	5,08	11,48
10% CCA M - 3 (AB)	5,17	11,67
Média	5,14	11,61
Desvio Padrão	0,04	0,09
Coef. de Variação (%)	0,76	0,78

Fonte: Autoria própria, 2018.

A seguir, tem-se uma representação gráfica (Figura 49) apresentando o valor da média de absorção de água e índice de vazios de cada dosagem de concreto investigada.

Figura 49: Valores de absorção e índice de vazios, em porcentagem, para as dosagens investidas.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Como análise inicial da representação gráfica acima (Figura 49), percebe-se uma redução da porcentagem de absorção de água e do índice de vazios nas dosagens 5% CCA M e 10% CCA M quando comparadas com a mistura de referência. Também é conclusivo que o menor valor de absorção de água e do índice de vazios ocorreu no traço 5% CCA M.

No que diz respeito a absorção, quando comparada com a dosagem referência, a redução foi em torno de 19,21% para o traço 5% CCA M e 15,81% para a dosagem 10% CCA M. Já em referência ao índice de vazios, a redução foi de aproximadamente 18,29% para a mistura 5% CCA M e 15,14% para o traço 10% CCA M, quando comparado com a dosagem referência.

Lima (2016) observou o mesmo comportamento determinado na pesquisa, onde os traços de concreto com adição de CCA apresentaram maior redução da absorção de água. O valor determinado de absorção foi de 5,90%, 4,64%, 4,74% e 4,62% para as misturas referencial, 5%, 10% e 15% de substituição de cimento Portland pela CCA, respectivamente.

Segundo Duarte (2008), este comportamento pode ser justificado pelo fenômeno físico conhecido como efeito filler. Para o autor, nem toda a CCA necessariamente participa das reações pozolânicas produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), mas sim como material de enchimento ocupando um espaço onde poderia existir um poro. Ou seja, nestes casos a CCA participa como material de enchimento dos poros, ocasionando um refinamento dos poros ou redução total da porosidade ao ocupar espaços vazios mesmo de forma inerte.

Analisando esse contexto, e tendo em vista que Tutikian e Helene (2011) asseguram que o conceito de durabilidade está associado aos mecanismo de transporte ou de penetração de agentes agressivos em materiais porosos, um possível aumento na durabilidade de misturas de concreto com adição de CCA pode ser alcançada devido à redução de porosidade e refinamento dos poros.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi investigar a viabilidade técnica no aproveitamento da cinza de casca de arroz (CCA), produzida sem combustão controlada, em adição por substituição de parte do cimento Portland em dosagens de concreto. Para isto se realizaram ensaios para a caracterização da CCA adquirida, como o ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica da CCA com o cimento Portland. Além disso, foi realizado o ensaio para a determinação da absorção de água e índice de vazios do concreto e ensaio de compressão axial aos 28 e 91 dias de cura, com a conjunta aplicação do método da correlação digital de imagens.

Do referencial teórico, constatou-se que características físicas e químicas são fundamentais para que a CCA adquira uma boa atividade pozolânica. Uma consideração importante a ressaltar sobre as características físicas estar relacionada ao excelente resultado obtido pelo processo de tratamento físico na qual a CCA foi submetida. Após a CCA passar pelo processo de tratamento físico, o valor da superfície específica da mesma foi de aproximadamente $7722 \text{ cm}^2/\text{g}$, sendo este maior que o valor da superfície específica determinado para o cimento Portland que foi de $5230 \text{ cm}^2/\text{g}$. Esse comportamento indica que o grau de finura apresentando pela CCA após o tratamento físico foi maior que o do cimento Portland, o principal aglomerante de misturas de concreto.

Com relação a resistência à compressão, observa-se uma aumento desta propriedade mecânica com a incorporação parcial da CCA nas dosagens de concreto. Destaca-se que nas duas idades de cura, 28 e 91 dias, houve um acréscimo considerável de resistência à compressão da mistura 5% CCA M em comparação ao traço de referência, no entanto, foi constatado uma tendência de estabilização, nas duas idades de cura, do valor de resistência à compressão a medida que o teor de substituição de CCA foi aumentada para 10%.

No que se refere a absorção de água e índice de vazios, foi possível constar novamente a viabilidade da adição parcial da CCA nas dosagens de concreto. Foi verificado uma redução na absorção de água e no índice de vazios do traço 5% CCA M quando comparado com a dosagem referência, aos 28 dias de cura. Novamente a tendência de estabilização foi reparada, onde o aumento de absorção de água e índice de vazios da mistura 10% CCA M foi bastante reduzido em comparação ao traço 5% CCA M.

No que diz respeito ao consumo de cimento Portland, a utilização da CCA diminuiu sensivelmente o consumo deste insumo nas misturas de concreto. Em referência ao traço 10% CCA M, o maior teor de CCA adicionado, o consumo de cimento Portland para 1 metro cúbico

de concreto foi 335,45 quilogramas, enquanto que para a mistura de referência foram necessários 372,73 quilogramas. Ou seja, foi possível uma redução de aproximadamente 37 quilogramas de cimento Portland com a substituição pela CCA.

Com a aplicação do método da correlação digital de imagens, foi possível obter e analisar campos de deslocamento e de deformação dos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão axial, e com isso conhecer o comportamento das amostras de concreto durante determinados momentos ao longo do ensaio. Em referência ao módulo de elasticidade tangente, foi observado um aumento deste parâmetro mecânico na dosagem 5% CCA M quando comparado com o valor obtido para a mistura referência. Já para o traço 10% CCA M, foi constatado uma redução do módulo de elasticidade tangente em comparação ao valor da dosagem referência. No entanto, tendo como base conceitos estáticos, foi possível levantar a hipótese de que a adição da CCA em traços de concreto causa pouca interferência no módulo de elasticidade tangente.

Portanto, analisando esse cenário, é possível confirmar a viabilidade técnica para o aproveitamento da cinza de casca de arroz (CCA) em adição por substituição de parte do cimento Portland em dosagens de concreto. Entretanto, ressalta-se a necessidade de uma mão de obra especializada para a aplicação desta adição mineral devido aos cuidados necessários no processo de quantificação de materiais, pois a quantidade de resíduo adicionado a mistura de concreto é em função do peso do aglomerante principal. Além disso, devido a CCA possuir a característica de absorver bastante água, há uma necessidade de utilizar um aditivo superplastificante para que seja possível realizar a mistura dos componentes e obter uma trabalhabilidade considerável.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

AKASAKI, J. L.; SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; BARSBOSA, M. B. **Influência da adição de cinza de casca de arroz nos tempos de pega e retração por secagem.** UNESP, Campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, PPGEC/2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Annual Book of ASTM Standards.** ASTM C 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Philadelphia, 2005.

ARANHA, Norberto et al. A lei de Hooke e as molas não-lineares, um estudo de caso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 38, n. 4, p.1-10, 2016.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. L.], v. 5, n. 5, p.555-575, out. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2015. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

BARRETO JUNIOR, Erly. **Utilização do método de correlação de imagens na caracterização de materiais metálicos e poliméricos**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

BENTES, Hugo Pantoja Hagmann. **Cálculo de deformações através do método de correlação de imagens**. 2010. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: Segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2016. 415 p.

CEZAR, Daiana de Souza. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Mestrado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

Concreto & Construções - Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo. [s. L.]: IBRACON, v. 53, n. 1, mar. 2009.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de resíduos agro-industriais: Cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, p. 22-25, 2005.

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

FERREIRA, Manoel Dênis Costa. **Análise inversa utilizando o método dos elementos de contorno e correlação digital de imagens**. 2012. 173 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FRANÇA, J. M. B. **Extensometria: Um estudo sobre as principais técnicas**. 2011. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2011.

GASTALDINI A. L. G. et al. Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: A technical and economical feasibility study. **Cement & Concrete Composites**, [s. L.], v. 32, n. 1, p.783-793, ago. 2010.

GONÇALVES, Gislayne Elisana et al. **Síntese e caracterização de mulita utilizando sílica obtida da casca de arroz**. Revista Escola Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p.367-372, set. 2009.

GEYER, André Luiz Bottolacci; SÁ, Rodrigo Resende. (2006, Aparecida de Goiânia). **A importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco**. Boletim Informativo da Realmix (Boletim Técnico). 2 ed. p. 8.

HABEEB, Ghassan Abood; MAHMUD, Hilmi Bin. Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. **Materials Research**, Kuala Lumpur, v. 13, n. 2, p.185-190, mar. 2010.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 659 p.

HILD, F.; ROUX, S. **Correli Q4: A Software for “Finite-element” Displacement Field Measurements by Digital Image Correlation**. Cachan: Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008. Disponível em: <<http://w3.lmt.ens-cachan.fr/PDFs/HILD.2008.7.pdf>> Acesso em: 12 jan. 2016.

KRUGER, Patrícia; SOUZA, Annelise Breus; KONOVAL, William Uczak (2013, agosto). **Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD**. 8ª Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Ponta Grossa. 8 p.

KUNTZ, L. M. **The “Greening” of the concrete industry: Factors contributing to sustainable concrete.** 2006. 41f. Thesis (Master of Engineering). Massachusetts Technology Institute. Cambridge, 2006.

LIMA, Nataniel Wontoon Barbosa. **Efeito da substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca arroz em propriedades do concreto relacionadas à sua resistência e durabilidade.** 2016. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 573 p.

MEIRA, Leticia Ribeiro. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem.** 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MILANI, A. P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica do material Solo-Cimento-Cinza de Casca de Arroz e seu desempenho como parede monolítica.** Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas – SP, 2008.

NORONHA, Mateus Icaro Pitombeira. **Análise do comportamento mecânico do concreto com substituição parcial do aglomerante cimento Portland pela cinza da casca de arroz utilizando o método da correlação digital de imagens.** 2016. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

PAULA, Marcos O. et al. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 3, p.353-357, 2009.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**, [s. L.], v. 53, n. 1, p.14-19, mar. 2009.

PEDROZO, Éder Claro. **Estudo da utilização de cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

PENNAFORT JUNIOR, L. C. G. et al. Caracterização mecânica do compósito PVC/fibra de coco pelos métodos de emissão acústica e de correlação digital de imagem. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, [s. L.], v. 26, n. 1, p. 25-32, jun. 2014.

PINHEIRO, L. **Fundamentos do Concreto e Projetos de Edifícios**. 2007. Disponível em:<http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf>. Acesso em: 28 de Jan. de 2018.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 232f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

QUEIROZ, Daniela Cintra de Araújo et al. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. L.], v. 20, n. 1, p.227-238, mar. 2015.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; MAHDIKHANI, M.; AHMADIBENI, Gh. The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes. **International Journal Of Civil Engineerng**, [s. L.], v. 7, n. 1, p.83-91, jun. 2009.

ROQUE, J. A.; MORENO JUNIOR, A. L.:(2005, novembro). **Considerações sobre vida útil do concreto**. 1ª Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado. São Carlos. 11 p.

SENA, L. V. T. **Análise do comportamento mecânico do concreto submetido ao ensaio de compressão diametral: Análise experimental com o uso da técnica da correlação de imagens.** 2013. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2013.

SILVA, Carlos Adriano Rufino. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz.** 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SILVA E. J.; TASHIMA M. M.; AKASAKI J. L. Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinza de casca de arroz (CCA). **Holos Environment**, [s. L.], v. 7, n. 1, p.72-86, jun. 2007.

SOSBAI (Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado). **ARROZ IRRIGADO: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil.** Pelotas: SOSBAI, 2016. 200 p.

SOUZA, Felipe Basquiroto de et al. Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento Portland por cinza da casca de arroz. **Revista Iniciação Científica**, Criciúma, v. 12, n. 1, p.5-18, 2014.

SUTTON, M. A.; ORTEU, J.J.; SCHREIER, H. W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements, Springer, p.81-117, New York, 2009.

TRINDADE, Guilherme Höehr. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos.** 2011. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria, Rs, 2011.

TUTIKIAN, Bernardo F; HELENE, Paulo. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; ISAIA, G. C. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction And Building Materials**, [s. L.], p.371-378, jul. 2010.