



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ENNES DO RIO ABREU

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO
PRODUZIDO COM A CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND E SUA
VIABILIDADE ECONÔMICA**

Recife-PE
2021



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ENNES DO RIO ABREU

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO
PRODUZIDO COM A CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND E SUA
VIABILIDADE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Castro Borges

Recife-PE
2021

A162a

Abreu, Ennes do Rio.

Avaliação das características do concreto produzido com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland e sua viabilidade econômica / Ennes do Rio Abreu, 2021.

131 f. : il.

Orientadora: Eliana Cristina Barreto Monteiro.

Coorientador: Pedro Castro Borges.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2021.

1. Materiais de construção - Durabilidade.
2. Construção civil. 3. Cana-de-açúcar - Derivados.
4. Concreto - Corrosão. 5. Sustentabilidade. I. Título.

CDU 691

Pollyanna Alves - CRB-4/1002

ENNES DO RIO ABREU

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO
PRODUZIDO COM A CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND E SUA
VIABILIDADE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Castro Borges

Aprovada em: 05/02/2021.

BANCA EXAMINADORA



Eliana Cristina Barreto Monteiro (UNICAP- PE)
(Orientadora interna)



Angelo Just da Costa e Silva (UNICAP-PE)
(Examinador interno)



João Manoel de Freitas Mota (IFPE-PE)
(Examinador externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado força, sabedoria, saúde e dedicação em todos os momentos e está sempre me guiando. Agradeço por mais essa vitória.

A minha orientadora, Prof.^a Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro, pela disponibilidade, dedicação e confiança durante a elaboração desta pesquisa, ao meu coorientador Prof. Dr. Pedro Castro Borges, por enriquecer a pesquisa com seus comentários, recomendações e esclarecimentos ao longo do processo e a Prof.^a Mercedes Balancán Zapata pela atenção, incentivo e colaboração através dos ensaios e análises realizadas na Cinvestav.

As instituições UNICAP e Cinvestav por autorizarem a execução dos ensaios, pela colaboração e apoio prestados durante as atividades experimentais.

Aos alunos de iniciação científica, Marília Gabriela Silva (UNICAP), Dandara Vitória (UNICAP) e Igor Teixeira (UNICAP). Aos mestres Alberto Mena (Cinvestav), Alexia Zozaya (Cinvestav), aos mestrandos Rodrigo Can May (Cinvestav), Pedro Naal (Cinvestav) e aos laboratoristas Washington (UNICAP) e Gleizer (UNICAP), que foram fundamentais com suas experiências na ajuda com os experimentos pelo comprometimento e dedicação à elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Edneide e Manuel pelo amor, incentivo e determinação para a concretização deste desafio. Aos meus familiares, pelo incentivo que sempre me proporcionaram nesta etapa tão importante da minha vida. Às minhas amigas Beatrice e Tawinne, por toda força, amizade e carinho.

Ao diretor, Ernando e ao supervisor Nonato da empresa Emypro que colaboraram para que eu pudesse chegar ao fim desta dissertação e aos colegas de trabalho pelo aprendizado no dia a dia.

Às empresas Cimento Nacional e Usina São José pela doação de materiais.

Aos membros da Banca Examinadora por aceitarem ao convite e por disporem de seu tempo na avaliação desse trabalho.

A todos aqueles, mesmo que não citados, mas não esquecidos, ajudaram na realização e conclusão desse trabalho.

RESUMO

O cimento Portland é um dos materiais mais consumidos na construção civil, porém, há uma grande emissão de CO₂ na produção do cimento, por consequência surge a busca por materiais alternativos na construção que reduzam os impactos ambientais e os custos de produção. Sendo o Brasil um dos principais produtores mundiais no complexo sucroalcooleiro, a cana-de-açúcar representa grande importância do agronegócio na economia do país. O bagaço é um subproduto da cana que durante a queima em caldeiras é gerada a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Com os avanços das pesquisas, verificou-se que a predominância dos compostos químicos da cinza do bagaço da cana-de-açúcar é de dióxido de silício (SiO₂). O objetivo desta pesquisa é avaliar as propriedades mecânicas e a influência das características da substituição parcial de CBCA em proporções de 10%, 15% e 20% e 0% como referência, na durabilidade do concreto produzido com cimento Portland do tipo CPV ARI com relação água/ aglomerante 0,55. Para análises de durabilidade, foram confeccionados corpos-de-prova, onde foram analisados por técnicas eletroquímicas para avaliação da corrosão, através do ensaio de potencial de corrosão (Ecorr), intensidade de corrosão (Icorr), resistividade e resistência à polarização. Ainda em relação à durabilidade, foi realizada a caracterização morfológica das partículas com identificação dos elementos químicos presentes pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Assim como, avaliou-se pelo método direto a pozolanicidade, a composição mineralógica e química dos materiais com a técnica de difração de raio-X (DRX) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Sobre a viabilidade econômica, foram realizados levantamentos bibliográficos para melhor embasamento e constatações da pesquisa. Os resultados obtidos indicam como fases cristalinas SiO₂, Fe₂O₃, KAlSiO₄ e Al(PO₃)₃ ficando evidenciado que os corpos de prova produzidos com CBCA atingiu valores mais eletronegativos de potencial de corrosão ao longo do tempo, proporcionando uma condição mais favorável a corrosão. Concluindo que as características físico-químicas das cinzas dependem significativamente do grau de cristalinidade das fibras do bagaço, da granulometria das cinzas e das condições de queima do bagaço e que a CBCA é um resíduo industrial com grande disponibilidade, podendo substituir o cimento em baixos teores com significativas vantagens.

Palavras-chave: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Durabilidade. Corrosão. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Portland cement is one of the most consumed materials in civil construction, however, there is a large CO₂ emission in the production of cement, consequently there is a search for alternative materials in construction that reduce environmental impacts and production costs. As Brazil is one of the main world producers in the sugar and alcohol complex, sugarcane represents great importance for agribusiness in the country's economy. Bagasse is a by-product of sugarcane that, during burning in boilers, is generated from sugarcane bagasse ash (CBCA). With the advances in research, it was found that the predominance of chemical compounds from the sugarcane bagasse ash is silicon dioxide (SiO₂). The objective of this research is to evaluate the mechanical properties and the influence of the characteristics of the partial replacement of CBCA in proportions of 10%, 15% and 20% and 0% as a reference, in the durability of the concrete produced with Portland cement of the type CPV ARI with respect to water / binder 0.55. For durability analysis, specimens were made, where they were analyzed by electrochemical techniques for corrosion evaluation, through the corrosion potential test (E_{corr}), corrosion intensity (I_{corr}), resistivity and polarization resistance. Still in relation to durability, the morphological characterization of the particles was carried out with identification of the chemical elements present by the scanning electron microscopy (SEM) technique. As well, pozzolanicity, the mineralogical and chemical composition of the materials were evaluated using the X-ray diffraction (XRD) technique and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. On economic feasibility, bibliographic surveys were carried out for better support and research findings. The obtained results indicate as crystalline phases SiO₂, Fe₂O₃, KAlSiO₄ and Al (PO₃)₃, showing that the specimens produced with CBCA reached more electronegative values of corrosion potential over time, providing a more favorable condition for corrosion. Concluding that the physical-chemical characteristics of the ashes depend significantly on the degree of crystallinity of the bagasse fibers, on the granulometry of the ashes and on the burning conditions of the bagasse and that CBCA is an industrial residue with great availability, being able to substitute the cement in low contents with significant advantages.

Keywords: Ash Sugarcane Bagasse. Durability. Corrosion. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de cana-de-açúcar, em mil toneladas, por safra.....	13
Figura 2 - PIB do agronegócio da cadeia sucroenergética (R\$ bilhões de 2017).....	14
Figura 3 – Processo de geração da CBCA, (a) recebimento, (b) análise e (c) lavagem da cana.....	16
Figura 4 – Processo de geração da CBCA, (d) preparo através do nivelador, (e) desfibrador e (f) moagem	17
Figura 5 - Processo de geração da CBCA, (g) extração do caldo, (h) estocagem e (i) depósito.....	17
Figura 6 - Processo de geração da CBCA, (j) e (k) queima do bagaço da cana na caldeira, (l) CBCA nos tanques de decantação	17
Figura 7 - Fluxograma do processo de geração da CBCA.....	18
Figura 8 - Total de emissões brutas de CO2	25
Figura 9 - Substituição de combustíveis fósseis – Biomassa de resíduos	26
Figura 10 - Países líderes na produção de cimento em 2019 (em milhões de toneladas métricas)	27
Figura 11 - Consumo anual de cimento no Brasil (em milhões de toneladas)	27
Figura 12 - Fluxograma de uso de CBCA	30
Figura 13 - Representação do ângulo θ no estado de difração	34
Figura 14 - Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa	38
Figura 15 - Usina São José em Igarassu	39
Figura 16 – Amostra de Referência – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (1.000x e 5kv).....	46
Figura 17 – Amostra com 10% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (1.000x e 15kv).....	46
Figura 18 - 15% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (2.000x e 15kv).....	47
Figura 19 - 15% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (1.000x e 15kv).....	47
Figura 20 – 20% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (8000x e 15kv)	48
Figura 21 - Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 0%, 10% e 15% de CBCA.....	49
Figura 22 - Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 20% de CBCA.....	50
Figura 23 - Forma prismática (9cm x 5cm x 7cm)	53
Figura 24 - Posição das barras no corpo de prova de concreto	54
Figura 25 - Corpos-de-prova prismáticos após a moldagem	54
Figura 26 - Difratoograma da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)	67
Figura 27 - Difratoograma do cimento de alta resistência inicial (CPV- ARI)	68
Figura 28 - Difratoograma da amostra de argamassa com 0% de CBCA.....	68
Figura 29 - Difratoograma da amostra de argamassa com 10% de CBCA.....	69
Figura 30 - Difratoograma da amostra de argamassa com 15% de CBCA.....	69
Figura 31 - Difratoograma da amostra de argamassa com 20% de CBCA	70
Figura 32 - Comportamento da barra 63 - úmido.....	76
Figura 33 - Curva de polarização do eletrodo de trabalho 63 - úmido	76
Figura 34 - Comportamento da barra 63 - seco.....	77

Figura 35 - Curva de polarização do eletrodo de trabalho 63 - seco	77
Figura 36 - Gráfico do potencial de corrosão em função do tempo	78
Figura 37 - Gráfico ilustrando a intensidade de corrosão em função do tempo	79
Figura 38 - Gráfico ilustrando a intensidade de corrosão em função do tempo, dos corpos de prova úmidos	80
Figura 39 - Gráfico ilustrando a intensidade de corrosão em função do tempo, dos corpos de prova secos	80
Figura 40 - Difratoograma da amostra de argamassa com 0% de CBCA.....	103
Figura 41 - Difratoograma da amostra de argamassa com 10% de CBCA.....	104
Figura 42 - Difratoograma da amostra de argamassa com 15% de CBCA.....	104
Figura 43 - Difratoograma da amostra de argamassa com 20% de CBCA.....	105
Figura 44 - Difratoograma da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)	105
Figura 45 - Difratoograma do cimento de alta resistência inicial (CPV- ARI)	106
Figura 46 - Resistência de polarização (013) – corpo de prova úmido - 02/03/20	109
Figura 47 - Resistência de polarização (014) - corpo de prova úmido - 02/03/20	109
Figura 48 - Resistência de polarização (015) - corpo de prova úmido - 02/03/20	110
Figura 49 - Resistência de polarização (016) - corpo de prova úmido - 02/03/20	110
Figura 50 - Resistência de polarização (049) - corpo de prova úmido - 02/03/20	110
Figura 51 - Resistência de polarização (050) - corpo de prova úmido - 02/03/20	111
Figura 52 - Resistência de polarização (057) - corpo de prova úmido - 02/03/20	111
Figura 53 - Resistência de polarização (058) - corpo de prova úmido - 02/03/20	111
Figura 54 - Resistência de polarização (063) - corpo de prova úmido - 02/03/20	112
Figura 55 - Resistência de polarização (064) - corpo de prova úmido - 02/03/20	112
Figura 56 - Resistência de polarização (071) - corpo de prova úmido - 02/03/20	112
Figura 57 - Resistência de polarização (072) - corpo de prova úmido - 02/03/20	113
Figura 58 - Resistência de polarização (091) - corpo de prova úmido - 02/03/20	113
Figura 59 - Resistência de polarização (092) - corpo de prova úmido - 02/03/20	113
Figura 60 - Resistência de polarização (013) - corpo de prova seco - 03/03/20	114
Figura 61- Resistência de polarização (014) - corpo de prova seco - 03/03/20	114
Figura 62- Resistência de polarização (015) - corpo de prova seco - 03/03/20	114
Figura 63- Resistência de polarização (016) - corpo de prova seco - 03/03/20	115
Figura 64- Resistência de polarização (049) - corpo de prova seco - 03/03/20	115
Figura 65- Resistência de polarização (050) - corpo de prova seco - 03/03/20	115
Figura 66- Resistência de polarização (057) - corpo de prova seco - 03/03/20	116
Figura 67- Resistência de polarização (058) - corpo de prova seco - 03/03/20	116
Figura 68- Resistência de polarização (063) - corpo de prova seco - 03/03/20	116
Figura 69- Resistência de polarização (064) - corpo de prova seco - 03/03/20	117
Figura 70- Resistência de polarização (071) - corpo de prova seco - 03/03/20	117
Figura 71- Resistência de polarização (072) - corpo de prova seco - 03/03/20	117
Figura 72- Resistência de polarização (081) - corpo de prova seco - 03/03/20	118
Figura 73- Resistência de polarização (082) - corpo de prova seco - 03/03/20	118
Figura 74- Resistência de polarização (091) - corpo de prova seco - 03/03/20	118
Figura 75- Resistência de polarização (092) - corpo de prova seco - 03/03/20	119
Figura 76- Resistência de polarização (013) - corpo de prova úmido 04/03/20	119
Figura 77- Resistência de polarização (014) - corpo de prova úmido 04/03/20	119

Figura 78- Resistência de polarização (015) - corpo de prova úmido 04/03/20	120
Figura 79- Resistência de polarização (016) - corpo de prova úmido 04/03/20	120
Figura 80- Resistência de polarização (049) - corpo de prova úmido 04/03/20	120
Figura 81- Resistência de polarização (050) - corpo de prova úmido 04/03/20	121
Figura 82- Resistência de polarização (057) - corpo de prova úmido 04/03/20	121
Figura 83- Resistência de polarização (058) - corpo de prova úmido 04/03/20	121
Figura 84- Resistência de polarização (063) - corpo de prova úmido 04/03/20	122
Figura 85- Resistência de polarização (064) - corpo de prova úmido 04/03/20	122
Figura 86- Resistência de polarização (071) - corpo de prova úmido 04/03/20	122
Figura 87- Resistência de polarização (072) - corpo de prova úmido 04/03/20	123
Figura 88- Resistência de polarização (091) - corpo de prova úmido 04/03/20	123
Figura 89- Resistência de polarização (092) - corpo de prova úmido 04/03/20	123
Figura 90- Resistência de polarização (013) - corpo de prova seco 05/03/20	124
Figura 91- Resistência de polarização (014) - corpo de prova seco 05/03/20	124
Figura 92- Resistência de polarização (015) - corpo de prova seco 05/03/20	125
Figura 93- Resistência de polarização (049) - corpo de prova seco 05/03/20	125
Figura 94- Resistência de polarização (050) - corpo de prova seco 05/03/20	125
Figura 95- Resistência de polarização (057) - corpo de prova seco 05/03/20	126
Figura 96- Resistência de polarização (058) - corpo de prova seco 05/03/20	126
Figura 97- Resistência de polarização (063) - corpo de prova seco 05/03/20	126
Figura 98- Resistência de polarização (064) - corpo de prova seco 05/03/20	127
Figura 99- Resistência de polarização (071) - corpo de prova seco 05/03/20	127
Figura 100- Resistência de polarização (072) - corpo de prova seco 05/03/20	127
Figura 101- Resistência de polarização (081) - corpo de prova seco 05/03/20	128
Figura 102- Resistência de polarização (082) - corpo de prova seco 05/03/20	128
Figura 103- Resistência de polarização (091) - corpo de prova seco 05/03/20	128
Figura 104- Resistência de polarização (092) - corpo de prova seco 05/03/20	129

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Tanques de decantação	40
Fotografia 2 - Antes do peneiramento da CBCA.....	41
Fotografia 3 - Após o peneiramento CBCA	41
Fotografia 4 - Barras de aço antes da limpeza.....	42
Fotografia 5 - Barras de aço após a limpeza	43
Fotografia 6 – Difratômetro de raios X (DRX).....	44
Fotografia 7 - Amostra após os procedimentos	45
Fotografia 8 – Amostras das pastas adicionadas aos moldes	51
Fotografia 9 – Identificação das amostras.....	52
Fotografia 10 – Trituração das amostras com almofariz e pistilo em porcelana	52
Fotografia 11 - Realização do ensaio de abatimento de tronco de cone – Slump Test	55
Fotografia 12 - Etapas de umedecimento de indução da penetração de íons cloreto	56
Fotografia 13 – Potenciostato/ Galvanostato/ ZRA modelo Reference 600, marca Gamry	57
Fotografia 14 – Célula eletroquímica	59
Fotografia 15 – Multímetro de alta impedância.....	59
Fotografia 16 – Equipamento medidor de resistividade- M.C. Miller, modelo 400A	60
Fotografia 17 – Vista geral de um MEV modelo JSM7600F, marca JEOL.....	61
Fotografia 18 – Referência – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (300x, 2.000x e 5kv)	62
Fotografia 19 – 10% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (10.000x, 2000x e 15kv)	62
Fotografia 20 – 15% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (2.000x, 10.000x e 15kv)	63
Fotografia 21 – 20% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (2000x, 1000x e 15kv)	63
Fotografia 22 – Espectrofotômetro, modelo Frontier IR/FIR, marca PerkinElmer	65
Fotografia 23 - Detalhe da presença de partículas de quartzo na cinza (CBCA)	71
Fotografia 24 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 10%.....	71
Fotografia 25 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 15%.....	72
Fotografia 26 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 20%.....	72
Fotografia 27 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 15%	74
Fotografia 28 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 20%	75
Fotografia 29 – Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 0%, 10%, 15% e 20% de CBCA – absorbância.....	83
Fotografia 30 – Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 0%, 10%, 15% e 20% de CBCA – reflectância	84
Fotografia 31 – Preparação das Amostras.....	94
Fotografia 32 – Metalização das amostras – Equipamento Quanta Quorum Q150R ES.....	94
Fotografia 33 – Microscópio eletrônico de varredura modelo JSM7600F, marca JEOL.....	95
Fotografia 34 – Microscópio eletrônico de varredura (CBCA)	96
Fotografia 35 – Microscópio eletrônico de varredura (CPV – ARI)	96
Fotografia 36 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE - Referência	97

Fotografia 37 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 10%.....	98
Fotografia 38 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 15%.....	98
Fotografia 39 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 20%.....	99
Fotografia 40 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS - Referência.....	99
Fotografia 41 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 10%	100
Fotografia 42 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 15%	101
Fotografia 43 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 20%	101
Fotografia 44 – Difratoômetro de raios X (DRX) – Preparação de amostra	102
Fotografia 45 – Difratoômetro de raios X (DRX) – amostras	103
Fotografia 46– Pesagem do NaCl	107
Fotografia 47 – Agitador magnético e preparação da solução	108
Fotografia 48 – Corpos de prova são secos em estufa a 60°C	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de cogeração elétrica global a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar ..	15
Tabela 2 - Influência das temperaturas de combustão do bagaço de cana-de-açúcar sobre as propriedades das cinzas geradas.....	19
Tabela 3 - Composição química dos óxidos da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	21
Tabela 4 - Principais compostos do cimento Portland	23
Tabela 5 - Redução adquirida com o uso da CBCA	28
Tabela 6 - Classificação do risco de corrosão em função do potencial de corrosão	35
Tabela 7 - Tratamento da CBCA	41
Tabela 8 - Proporção dos materiais utilizados na produção das pastas	51
Tabela 9 - Resultados obtidos de Slump Test	55
Tabela 10 - Etapas do procedimento de indução da penetração de cloretos	56
Tabela 11 -Comportamento qualitativo das barras em função da intensidade de corrosão.....	58
Tabela 12 - Custo dos insumos de 1m ³ de concreto 30 MPa sem CBCA.....	81
Tabela 13 - Custo dos insumos de 1m ³ de concreto 30MPa com CBCA	81
Tabela 14 - Custo médio operacional da lavoura de cana-de-açúcar em reais (R\$)	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASSOCANA - Associação dos Plantadores de Cana da Média Sorocabana

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BEN - Balanço Energético Nacional

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

BSE – Elétrons retroespalhados

CaO – Óxido de cálcio

Cinvestav - Centro de Pesquisa e Estudos Avançados de IPN

C₂S - Silicato dicálcico

C₃A - Aluminato tricálcico

C₃S - Silicato tricálcico

C₄AF - Ferroaluminato tetracálcico

CH – Ca(OH)₂

CBCA – Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar

Cl - Cloro

CO₂ - Gás Carbônico

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CO₂ - Gás Carbônico

Co₃O₄ - Óxido de Cobalto

CP - Corpo de prova

CPV ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Cr₂O₃ - Óxido de Cromo

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

EDS – Energia Dispersiva

F_{ck} - Resistência Característica do concreto à compressão aos 28 dias

Fe₂O - Óxido de Ferro II

Fe₂O₃ - Óxido de Férnico

FTIR - Espectroscopia no infravermelho com transmissão de Fourier

GNR – Getting the Numbers Right

DRX - Difração de Raios X

g - Gramas

ha - Hectare

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Brasil

kg - Quilograma

K₂O Óxido de Potássio

CO₂ - Gás Carbônico

MgO - Óxido de magnésio

MEV - Análise por microscopia eletrônica de varredura

mm - Milímetros

µm - Micrometro

MnO - Óxido de Manganês

MPa - Megapascal

Na₂O - Óxido de Sódio

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

P₂O₅ - Pentóxido de Fósforo

PIB - Produto Interno Bruto

R_p – Resistência de polarização

SiO₂ - Dióxido de Silício

SO₃ - Anidro Sulfídrico

SNIC - Sindicato Nacional de Cimento

TiO - Óxido de Titânio

UNICA - União da Industria da Cana-de-açúcar

UNICAP – Universidade Católica de Pernambuco

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MME - Ministério das Minas e Energia

Mt – Milhões de toneladas

t – Tonelada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.2 JUSTIFICATIVA	10
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo geral	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 PRODUÇÕES DE CANA- DE- AÇÚCAR	13
2.2 CUSTO DE PRODUÇÃO DA CANA.....	14
2.3 RESÍDUOS GERADOS NAS USINAS DE CANA- DE- AÇÚCAR	15
2.5 PROCESSOS DE COMBUSTÃO	19
2.6 CINZA DO BAGAÇO DE CANA- DE- AÇÚCAR (COMPOSIÇÃO QUÍMICA).....	20
2.7 CONCRETOS COM A INCORPORAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DE CANA	22
2.8 CIMENTO PORTLAND.....	23
2.8.1 Produção do cimento Portland	23
2.8.2 Impacto ambiental na fabricação do cimento Portland	24
2.9 ESTIMATIVA DA PRESERVAÇÃO AMBIENTAL	24
2.10 ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE CUSTO	26
2.11 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	28
2.12 CORROSÃO DAS ARMADURAS	29
2.13 VIABILIDADE ECONÔMICA DE UTILIZAÇÃO DA CBCA	30
2.14 MÉTODOS DE ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO	31
2.15 MÉTODOS PARA ANÁLISE DE POZOLANICIDADE.....	33
2.16 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO.....	34
2.16.1 Registro do potencial de corrosão	34
2.16.2 Resistividade	35
2.16.3 Resistência de polarização	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 MATERIAIS	38

3.1.2	Agregados Naturais	39
3.1.3	Água	39
3.1.4	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA).....	39
3.1.5	Armaduras	42
3.1.6	Caracterização dos materiais anidros.....	43
3.1.6.1	Técnica de Difração de Raios X (DRX):.....	44
3.1.6.2	Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV):.....	45
3.1.6.3	Espectroscopia no infravermelho com transmissão de Fourier (FTIR):	48
3.2	MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE	50
3.3	MÉTODO DE ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO	53
3.3.1	Moldagem de corpos de prova 9cm X 5cm X 7cm (concreto)	53
3.3.2	Ensaio com o concreto no estado fresco.....	54
3.3.3	Semiciclos de secagem e imersão parcial.....	56
3.4	MEDIDAS ELETROQUÍMICAS	57
3.5	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) ...	60
3.6	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1	TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	66
4.2	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	70
4.2.1	Análise por microscopia eletrônica de varredura – detector SE.....	70
4.2.2	Análise por microscopia eletrônica de varredura – detector EDS.....	72
4.3	POTENCIAL DE CORROSÃO (E _{corr})	75
4.4	INTENSIDADE DE CORROSÃO (I _{corr})	79
4.5	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	82
4.6	ANÁLISE DA ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE CUSTO	84
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS.....	85

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	92
APÊNDICE B – MÉTODO DE ANÁLISE PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO...105	105
APÊNDICE C – CUSTO OPERACIONAL DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	103

1. INTRODUÇÃO

O Balanço Energético Nacional – BEN (2018), do Ministério das Minas e Energia (MME), demonstra que a oferta brasileira de energia está baseada essencialmente em três fontes: os combustíveis fósseis (petróleo e derivados), biomassa da cana e a hidroeletricidade. Desta forma a biomassa tornou-se uma importante matéria-prima alternativa para a produção de energia. Há 574 usinas geradoras à biomassa no Brasil totalizando 15.404 MW e 406 usinas térmicas à biomassa no setor sucroenergético 11.747 MW (UNICA, 2020).

Na fase de produção do açúcar e do álcool, o resíduo proveniente de maior volume é o bagaço de cana-de-açúcar. Porém, nos últimos anos, o bagaço foi muito valorizado por sua utilização como matriz energética de termoelétricas. De modo geral, o processo de produção de energia elétrica utilizando o bagaço é baseado em sua queima nas caldeiras da usina gerando vapor. O vapor gerado é utilizado para movimentar turbinas, que por sua vez movimentam os geradores elétricos (VASCONCELOS, 2013).

De acordo com a Norma Técnica COBEN 03/88, para cada tonelada de cana é gerado cerca de 0,27 toneladas de bagaço. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de cana-de-açúcar no ano civil 2017 alcançou 635,6 milhões de toneladas. Este montante foi 5,2% inferior ao registrado no ano civil anterior, quando a moagem foi de 670,6 milhões de toneladas. Baseando-se nas proporções adotadas pela COBEN, acima citadas, e considerando toda produção do Brasil (safra 2016: 670,6 milhões de toneladas) de cana-de-açúcar, se um quarto dessa produção se transformar em bagaço (181,06 milhões de toneladas) e for queimado nas usinas, então o Brasil produziu, na safra 2016, aproximadamente 45,26 milhões de toneladas de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA).

A busca pelo aproveitamento dos recursos naturais e a utilização dos subprodutos gerados em atividades industriais, devem satisfazer principalmente as necessidades técnicas e socioeconômicas, mas sem afetar a qualidade de vida da população ou das futuras gerações. As utilizações desses materiais oriundos de resíduos são vantajosas devido à diminuição no estoque de matéria prima derivada de recursos naturais não renováveis, que geralmente são extraídos de maneira indiscriminada, muitas vezes irracional.

1.2 JUSTIFICATIVA

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) ilustra, em seu Monitoramento Agrícola Anual e Acompanhamento da Safra Brasileira da Cana-de-Açúcar, que o Brasil é o maior produtor mundial da planta, favorecido pelas grandes áreas cultiváveis, condições climáticas, relevo e temperatura do país, tornando-o promissor para a exportação dessa mercadoria. Ao longo da extração do caldo da cana-de-açúcar é produzida grande quantidade de bagaço, biomassa de suma importância como fonte energética. O bagaço de cana-de-açúcar proveniente do processo de extração da sacarose é um material lignocelulósico e abundante fonte renovável de carbono (CHRISTOFOLETTI, 2010). Cerca de 95% de todo o bagaço produzido no Brasil são queimados em caldeiras para geração de vapor gerando, como resíduo, a cinza de bagaço.

A temperatura elevada de queima (CORDEIRO *et al.*, 2009) e a combustão incompleta podem afetar o grau de cristalinidade da sílica presente nas cinzas (ALAVEZ-RAMIREZ *et al.*, 2012). Para Sessa (2013), de acordo com as condições de queima adotadas, é possível manter a sílica contida no bagaço de cana-de-açúcar em seu estado amorfo. Essa característica pode possibilitar o emprego desse resíduo como pozolana e, conseqüentemente, diminuir as despesas e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente. Além disso, a incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar pode agregar valor econômico ao resíduo agroindustrial e proporcionar vantagens técnicas e ambientais com a substituição parcial de cimento Portland.

As cinzas possuem uma alta concentração de sílica SiO_2 , além da presença de alumínio, ferro, óxidos alcalinos e alcalino-terrosos em menores quantidades (SOUZA, 2011; CORDEIRO, 2006). Em função do seu arranjo químico, este material apresenta-se potencialmente como aditivo mineral para pastas, argamassas e concretos (PAYÁ *et al.*, 2002), pois quando adicionadas ao cimento, combinam-se ou são ativadas pelo hidróxido de cálcio liberado nas reações de hidratação do clínquer, originando compostos com propriedades ligantes.

Ante o exposto, esta pesquisa se propõe a estudar as propriedades mecânicas em corpos de prova com a incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland, tendo em vista a fabricação de um concreto com um acréscimo em sua vida útil e a durabilidade; a proposta está vinculada a redução do consumo de cimento na produção de concretos ao longo do tempo. Deste modo, possibilitando uma diminuição no consumo de

cimento, o que indica que atende à sustentabilidade da construção e que seu custo não deve ser elevado. Este estudo, em que um resíduo agroindustrial seria utilizado em substituição parcial ao cimento Portland, apresenta vantagem econômica, ambiental e técnica significativas, aliado à durabilidade.

1.3 OBJETIVOS

Nas seções seguintes estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desenvolvidos nesta pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

Caracterizar as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), examinando o seu potencial como elemento do concreto, substituindo parcialmente o cimento Portland frente a penetração de íons cloreto, através do potencial de corrosão, por meio de um estudo experimental de laboratório.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Realizar um levantamento bibliográfico com o intuito de obter embasamento teórico referente a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento Portland, a fim de possibilitar a análise dos dados;
2. Apresentar a caracterização química, física e mineralógica dos materiais utilizados;
3. Realizar ensaio de aceleração da corrosão por indução dos íons cloretos com intuito de avaliar a influência do (CBCA) em função da durabilidade;
4. Analisar a viabilidade econômica da CBCA para substituições em concreto em obra.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos.

No Capítulo 2 são mencionados os principais fundamentos teóricos a respeito da importância da produção da cana-de-açúcar para a economia do país e dos seus resíduos, gerados nas usinas

de cana-de-açúcar, as substituições na fabricação do concreto, estimativa ambiental e estimativa de redução de custo.

O Capítulo 3 apresenta o procedimento experimental utilizado, como também, toda metodologia no desenvolvimento da pesquisa.

São apresentadas no Capítulo 4 compreende os resultados e discussões.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

No final do trabalho, encontram-se os Apêndices com os principais procedimentos detalhados dos ensaios e resultados gerais (Apêndices A, B e C).

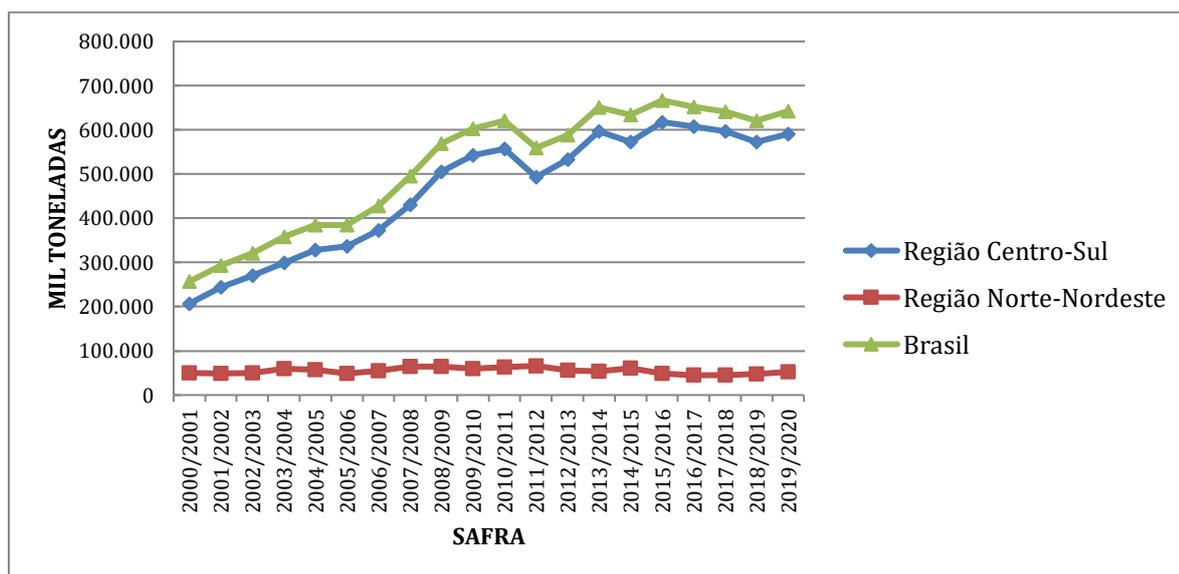
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRODUÇÕES DE CANA- DE- AÇÚCAR

Originária do sudeste da Ásia, a cana-de-açúcar é cultivada em uma extensa área territorial, compreendida entre os paralelos 35° de latitudes Norte e Sul, apresentando melhor rendimento em climas tropicais (MAPA, 2007).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), o Brasil é um dos principais maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, são 370 unidades produtoras em atividade hoje no País, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro, apresentando uma produção de aproximadamente 630 milhões de toneladas por ano. A Figura 1 demonstra o crescimento da produção em toneladas de cana-de-açúcar na região Centro- Sul (que agrega os Estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste) respondendo por 93% deste volume, enquanto os 7% restantes cabem aos Estados da região Norte- Nordeste do Brasil.

Figura 1 - Produção de cana-de-açúcar, em mil toneladas, por safra

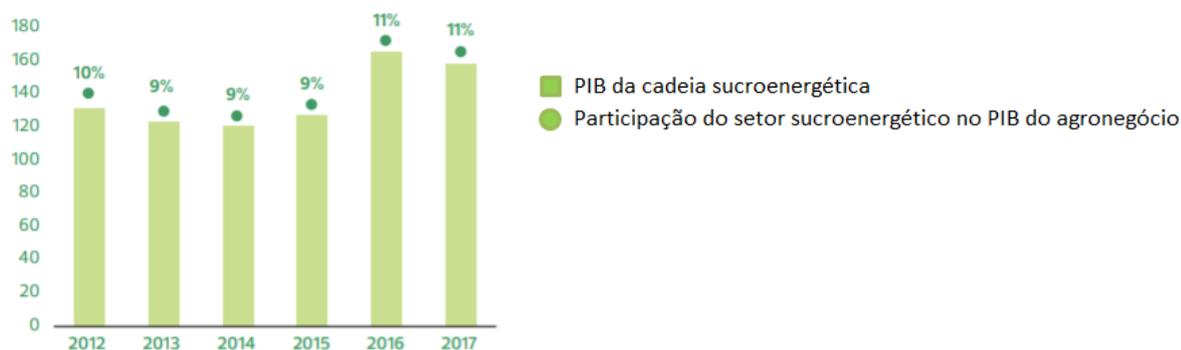


Fonte: Adaptado de UNICA (2020)

A cadeia sucroenergética destaca-se no contexto do agronegócio e da economia brasileira, tendo importante contribuição na geração de renda e empregos (UNICA, 2018).

Conforme União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2019), o valor bruto movimentado pela cadeia sucroenergética supera US\$ 100 bilhões, com um PIB de aproximadamente US\$ 40 bilhões (montante equivalente a cerca de 2% do PIB brasileiro), conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 - PIB do agronegócio da cadeia sucroenergética (R\$ bilhões de 2017)



Fonte: Adaptado de UNICA (2019)

2.2 CUSTO DE PRODUÇÃO DA CANA

Segundo Macedo (2008), aproximadamente 60% da cana-de-açúcar processada é cultivado pela própria usina. No cultivo da cana todas as despesas referentes à produção, como tratos culturais e plantio, como também os custos de transporte e colheita são assumidos pela usina, além do importante parcela integrada ao custo da terra. De forma geral pode-se assumir que o custo médio da cana cultivada pela usina está em torno de R\$35/ tonelada de cana, considerando 6 cortes e uma produtividade média de 84 toneladas de cana/ hectare (CHAVES, 2006).

Um modelo detalhado sobre a estrutura do custo operacional da produção de cana é exposto pela Associação Rural dos Fornecedores e Plantadores de Cana da Média Sorocabana (ASSOCANA), ver Apêndice C.

O açúcar do Centro-Sul há muitos anos proporciona o menor custo de produção do mundo, em média R\$ 410/ t. A produção mundial hoje tem o custo avaliado em US\$ 120/ t, até 20 Mt (é a produção no Centro-Sul do Brasil); de 20 Mt para 65 Mt o custo sobe para US\$ 200-250 / t; e sobe até US\$ 400 / t, para a faixa de 65 Mt até 100 Mt. O Brasil é o maior exportador de açúcar do mundo, com 38,6 milhões de toneladas produzidas e 27,8 milhões de toneladas exportadas

no ciclo 2017/2018 – quantias equivalentes a 20% da produção global e 45% da exportação mundial, respectivamente (UNICA, 2019). A adoção de práticas cada vez mais sustentáveis na produção de cana também colaborou para a evolução e fortalecimento da imagem positiva do setor nesse tempo.

2.3 RESÍDUOS GERADOS NAS USINAS DE CANA- DE- AÇÚCAR

Os principais resíduos agroindustriais resultantes do setor sucroalcooleiro são a palha da cana, o bagaço da cana, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a torta de filtro e o vinhoto.

De acordo com Dantas Filho (2009), o bagaço e o vinhoto são resíduos oriundos do processamento industrial e a palha é um resíduo gerado na colheita da cana. O bagaço é o resíduo sólido da produção de açúcar e álcool, destinado basicamente à geração de energia, nas formas térmica, mecânica e elétrica. Essa energia é capaz de suprir toda a demanda das unidades produtoras e ainda gerar excedentes exportáveis à rede elétrica. A cana-de-açúcar é a matéria-prima que permite os menores custos de produção de açúcar e álcool, devido à energia consumida no processo de ser produzida a partir dos seus próprios resíduos (MAPA, 2007). O Potencial de cogeração nos principais países produtores é expresso na Tabela 1.

Tabela 1 – Potencial de cogeração elétrica global a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar

PAÍSES	Produção de cana (milhões de toneladas / ano)	Porcentagem da produção global (%)	Potencial de eletricidade (GW)	Demanda nacional de eletricidade (TW)	Cogeração potencial de bagaço como uma porcentagem da demanda elétrica (%)
Brasil	366.32	28.6	38.62	335.9	11.5
Índia	290	21.48	29	497.2	5.83
Tailândia	74.07	5.49	7.47	90.91	8.15
Paquistão	52.05	3.88	5.49	62.27	8.36
México	45.12	3.34	4.51	186.7	242
Colômbia	38.8	2.71	3.88	39.38	9.91
Cuba	34.7	2.57	3.47	13.38	25.93
Total	926.89	69.98	95.02	1267.78	317.83

Fonte: Adaptado de AKRAM (2009)

As etapas do processo de corte da cana-de-açúcar até a queima do bagaço em caldeira são apresentadas nas Figuras de 3 a 6. Após o corte, a cana-de-açúcar é transportada para a unidade industrial, onde o caminhão é pesado (a), assim que sai da balança, o caminhão carregado de cana posiciona-se próximo a uma sonda (b), onde é coletada uma amostra de aproximadamente 10kg de cana-de-açúcar e analisada no Pagamento de cana por teor de sacarose (PCTS). Na sequência, a cana é levada para uma mesa alimentadora (c) para ser lavada para retirar o solo e impurezas provenientes da lavoura. Em seguida, passa pelo setor de preparo através nivelador (d), picador, desfibrador (e) e enviada à moenda (f, g) para extração do caldo. Em geral, cerca de 96% do açúcar contido na cana é extraído e o bagaço é a fração resultante após os procedimentos de limpeza, preparo e extração do caldo. O bagaço é transportado da moenda para o depósito (h) onde permanece até a disposição final, que é a queima em caldeira. Em seguida ele é transportado por meio de uma esteira rolante (i) até a caldeira (j, k) onde é queimado restando as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, as águas residuais transportam as cinzas até os tanques de decantação (l), onde permanecem até sua destinação final. O fluxograma do processo de produção da geração da CBCA é apresentado na Figura 7. A umidade do bagaço que alimenta as caldeiras interfere diretamente no rendimento da combustão e nas características das cinzas geradas (NUNES, 2009).

Figura 3 – Processo de geração da CBCA, (a) recebimento, (b) análise e (c) lavagem da cana



Fonte: Elaboração da autora, 2021

Figura 4 – Processo de geração da CBCA, (d) preparo através do nivelador, (e) desfibrador e (f) moagem



Fonte: Elaboração da autora, 2021

Figura 5 - Processo de geração da CBCA, (g) extração do caldo, (h) estocagem e (i) depósito



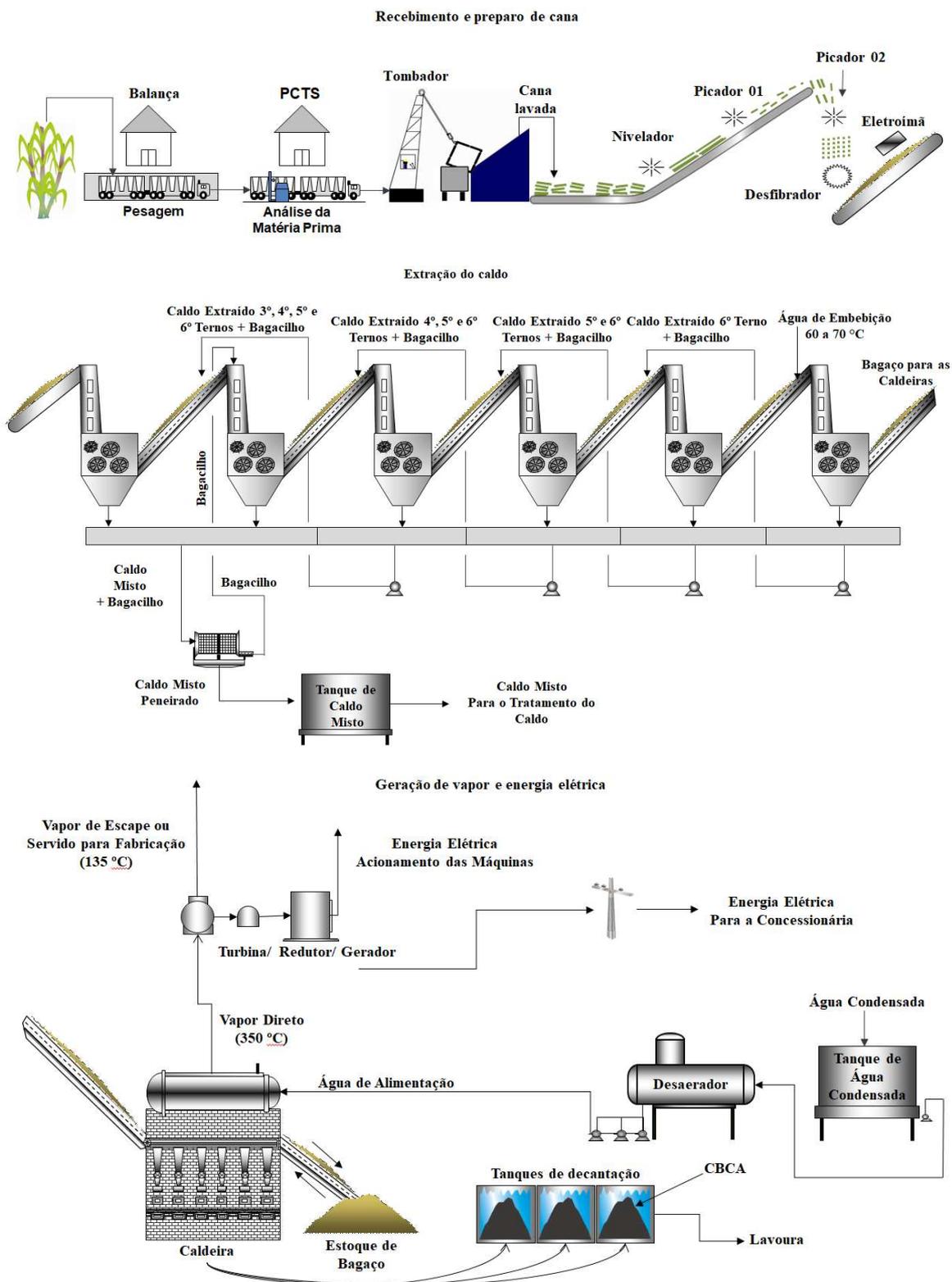
Fonte: Elaboração da autora, 2021

Figura 6 - Processo de geração da CBCA, (j) e (k) queima do bagaço da cana na caldeira, (l) CBCA nos tanques de decantação



Fonte: Elaboração da autora, 2021

Figura 7 - Fluxograma do processo de geração da CBCA



Fonte: Adaptado da Usina São José Agroindustrial (2021)

2.5 PROCESSOS DE COMBUSTÃO

Em função da temperatura no interior do salão da caldeira (600°C – 800°C) e do tempo de exposição ao calor, são geradas cinzas residuais com diferentes colorações. A cor é indicativa do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e, conseqüentemente, do seu teor de carbono (CORDEIRO, 2006). Desta forma, a cinza de cor escura (preta) tem alto teor de carbono e os tons mais claros apresentam uma queima completa. Além de influenciar no grau de cristalinidade da sílica, as condições de queima também afetam a área de superfície específica das partículas, propriedade com estreita relação com a reatividade da cinza (COOK, 1986). Conforme Vasconcelos (2013), outros fatores que influenciam nas características físicas e químicas da cinza podem ser: espécie botânica da cana, tipo de solo, condições climáticas, processo de colheita, moagem, safra e região do país em que foi colhida. A Tabela 2 demonstra que as propriedades da CBCA dependem das condições de queima. Apesar de pouco sabido, as cinzas também podem ser geradas em laboratório e nas fornalhas das pizzarias tendo seu uso como substituição à madeira em seus fornos.

Tabela 2 - Influência das temperaturas de combustão do bagaço de cana-de-açúcar sobre as propriedades das cinzas geradas

Temperatura de combustão do bagaço de cana de açúcar	Modificações que ocorrem durante o processo de queima do bagaço
< 100°C	Perda de massa do material é consequência da evaporação da água absorvida
350°C	Inicia a ignição do material mais volátil, dando início queima do bagaço
400°C < T < 500°C	Maior perda de massa, onde o carbono residual se oxida. A cinza torna-se rica em sílica amorfa
> 700°C	Pode conduzir a formação de quartzo ou acarretar na formação de outras formas cristalinas
> 800°C	A sílica presente na cinza é essencialmente cristalina

Fonte: Adaptado de PAULA (2006)

2.6 CINZA DO BAGAÇO DE CANA- DE- AÇÚCAR (COMPOSIÇÃO QUÍMICA)

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é gerada a partir da queima do bagaço nas fornalhas das caldeiras das usinas produtoras de açúcar e álcool. Para Cordeiro (2006), a cinza possui grande quantidade de dióxido de silício que podem ser oriundas da areia (quartzo), proveniente da lavoura, que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem no processamento da cana-de-açúcar. Segundo Neville (1997), a sílica quando cristalina possui pouca reatividade, o ideal é ela estar no estado amorfo. Além da sílica, a cinza possui álcalis e traços de óxido de ferro, alumínio, cálcio e magnésio (FREITAS *et al.*, 1998).

De acordo com Paula (2006), a queima do bagaço em condições não controladas origina cinza que pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica. Além disso, a quantidade de carbono tem grande influência na absorção de água, pois o material carbonoso é extremamente fino, o que ocasiona um aumento na demanda de água.

Diversos autores comprovaram a pozolanicidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, MARTIRENA HERNANDEZ *et al.*, 1998; MASSAZZA, 1998; Singh *et al.*, 2002; PAYÁ *et al.*, 2002; GANESAN *et al.*, 2007; AKRAN *et al.*, 2009; CORDEIRO *et al.*, 2009; SALES E ARAÚJO 2010; FARIA *et al.*, 2012; KIGOZI *et al.*, 2015; PAIVA, 2016; JOSHAGHANI E MOEINI, 2017; CÓRDOVA *et al.*, 2018; BERENGUER, 2019. A Tabela 3 apresenta a composição química dos óxidos do CBCA, na qual a soma dos principais óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) fica acima de 70%, conforme recomendado pela norma para pozolana NBR 12653 (2015) e sua respectiva norma internacional ASTM C 618 (2017).

Tabela 3 - Composição química dos óxidos da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Autores	Países	Composição														Total
		SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	CaO K ₂ O	Fe ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	MnO	Perda ao Fogo	
Martirena Hernández <i>et al.</i> , (1998)	Cuba	72,70%	8%	5,30%	3,90%	2,90%	0,10%	ND	ND	0,30%	0,80%	1,60%	ND	ND	0,80%	96,40%
Massazza (1998)	Itália	75%	2,80%	6,70%	6,30%	1,10%	ND	ND	ND	ND	1,10%	4%	ND	ND	0,90%	98%
Singh <i>et al.</i> , (2000)	Índia	63,20%	3,10%	9,70%	5,40%	2,90%	2,90%	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6,90%	94,10%
Payá <i>et al.</i> , (2002)	Colômbia	59,87%	3,36%	20,69%	5,76%	1,87%	1,06%	1,37%	ND	ND	1,11%	ND	ND	ND	0,63%	95,72%
Srivastava <i>et al.</i> , (2006)	Índia	51,50%	6,00%	10,80%	3,50%	1,10%	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	72,90%
Paula (2006)	Brasil	83,71%	1,18%	ND	6,54%	ND	0,68%	ND	ND	1,16%	ND	ND	ND	0,08%	ND	93,35%
Ganesan <i>et al.</i> , (2007)	Índia	64,15%	8,14%	9,05%	5,52%	2,85%	ND	1,35%	ND	ND	0,92%	ND	ND	ND	4,90%	96,88%
Akram <i>et al.</i> , (2009)	Paquistão	62,44%	6,16%	6,74%	5,77%	2,97%	0,72%	6,87%	ND	ND	3,15%	ND	ND	ND	2,58%	97,40%
Cordeiro <i>et al.</i> , (2009)	Brasil	78,30%	2,20%	8,60%	3,60%	1,70%	ND	3,50%	ND	ND	0,10%	1,10%	ND	0,10%	0,42%	99,62%
Sales e Araújo (2010)	Brasil	88,20%	0,60%	2,30%	5,10%	0,40%	0,10%	1,30%	ND	1,00%	0,10%	0,40%	ND	ND	0,35%	99,85%
Rukzon e Chindapasirt (2011)	Tailândia	65,00%	3,90%	4,80%	0,90%	ND	0,90%	2,00%	ND	ND	0,00%	ND	ND	ND	10,50%	88,00%
Faria <i>et al.</i> , (2012)	Brasil	61,60%	5,00%	5,90%	7,40%	1,20%	0,40%	6,20%	0,00%	1,50%	ND	1,00%	ND	ND	9,80%	100,00%
Gritsada y Natt (2013)	Colômbia	65,26%	4,01%	1,99%	ND	3,65%	0,21%	6,91%	1,10%	ND	ND	ND	ND	ND	15,34%	98,47%
Modani e Vyawahare (2013)	Índia	62,43%	11,80%	4,28%	6,98%	2,51%	1,48%	3,53%	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4,73%	97,74%
Sua-iam e Makul (2013)	Tailândia	65,26%	4,01%	6,91%	3,65%	1,10%	0,21%	ND	ND	ND	0,33%	ND	ND	ND	ND	81,47%
Pereira (2014)	Brasil	78,6%	1,3%	4,5%	4,9%	ND	0,7%	ND	ND	1,2%	0,2%	ND	ND	ND	4,4%	129,66%
Kigozi (2015)	Uganda	62,10%	1,00%	5,54%	5,42%	1,12%	ND	2,22%	ND	ND	0,81%	ND	ND	ND	ND	78,21%
Sundara e Venkata (2016)	Índia	70,50%	4,70%	1,36%	1,89%	4,68%	ND	12,16%	ND	0,06%	3,82%	ND	ND	ND	ND	99,17%
Silva (2016)	Brasil	49,30%	1,00%	32,90%	10,30%	0,30%	0,1	ND	ND	1,70%	0,10%	0,20%	ND	0,1	1,70%	89,31%
Gomes <i>et al.</i> , (2017)	Brasil	55,70%	15,34%	2,86%	3,51%	4,08%	ND	ND	ND	ND	0,37%	ND	ND	ND	ND	81,86%
Córdova <i>et al.</i> , (2018)	Colômbia	64,04%	4,65%	11,89%	7,61%	4,01%	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	92,20%
Berenguer (2019)	Brasil	71,06%	2,77%	4,73%	2,25%	2,43%	0,39%	ND	ND	0,66%	0,56%	1,47%	0,09%	0,19%	11,65%	98,25%
Macedo (2019)	Brasil	60,24%	4,17%	14,38%	6,92%	ND	1,32%	ND	ND	1,53%	0,29%	3,56%	0,11%	0,16%	ND	92,68%

A sigla ND indica valor não divulgado.

Fonte: Elaboração da autora, 2020

2.7 CONCRETOS COM A INCORPORAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DE CANA

Alguns estudos desenvolvidos relativos à análise da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral apontam para a viabilidade da cinza substituindo parcialmente o cimento Portland em argamassas, concretos, ou substituindo o agregado miúdo.

Castaldelli *et al.*, (2010), realizaram um estudo que corrobora o comportamento da cinza em concreto sem passar pelo processo de moagem. A cinza foi empregada como substituição parcial do cimento em proporções de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em massa no traço de concreto 1:5. Os resultados que autores constataram foram que a resistência à compressão, à medida que a porcentagem de cinza aumentava, a resistência aumentava, e quanto maior a porcentagem de cinza, menor a absorção de água por imersão, destacando o traço com 20% que possibilita construir com uma resistência aproximada de 30 MPa e absorção de 4%.

No ensaio de absorção observou-se uma “porcentagem ótima”, pois com 5% de substituição de massa de cimento, o concreto apresentou menor absorção. Isso mostra que a cinza preenche os vazios do concreto com mais eficiência, visto que todos os traços com substituição absorveram menos água do que o traço sem nenhuma substituição. Comparando os tempos de mistura, os resultados obtidos com tempo de mistura de 5 minutos foram mais eficientes que os resultados obtidos com tempo de mistura de 10 minutos (exceto 5%) (CASTALDELLI *et al.*, 2010).

Silveira (2010) analisou a influência da substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI pela CBCA em teores de 0%, 5%, 10% e 20% em massa empregando duas relações água/aglomerante (a/agl), de 0,37 e 0,60 e constatou que tanto os ensaios de transporte de massa, quanto os ensaios de permeabilidade, absorção por capilaridade e por imersão, indicaram a presença do teor ótimo em torno de 10% de substituição em ambos os concretos.

Segundo Sessa (2013), a incorporação da CBCA pode agregar valor econômico ao resíduo agroindustrial e proporcionar vantagens técnicas e ambientais com a substituição parcial de cimento Portland.

2.8 CIMENTO PORTLAND

De acordo com a norma ASTM C150 (1997), o cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido no processo de moagem do clínquer, composto especialmente por silicatos de cálcio. Suas matérias-primas são basicamente argila e calcário.

2.8.1 Produção do cimento Portland

O calcário e a argila são fontes de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 , além desses elementos, o clínquer também é composto por Fe_2O_3 que tem como fonte o minério de ferro. Do calcário, a cal é a parcela mais aproveitada para fabricação do cimento e compreende 56% do total da matéria bruta, ou seja, de cada tonelada de calcário só se aproveitam 560 kg (LIMA, A. 2011). Os principais componentes do cimento Portland são indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição	Abreviação
Silicato dicálcio (belita)	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Silicato Tricálcio (alita)	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Aluminato tricálcio	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcio (ferrita)	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

Para Sessa (2013) a alita apresenta rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor quando comparado com as outras fases, a belita é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas e produz C-S-H e hidróxido de cálcio em menor volume, em comparação com a alita, o aluminato tricálcio contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia, favorece bastante o calor de hidratação e quando presente na forma cristalina é o responsável pela rapidez da pega. Já o ferroaluminato tetracálcio também se hidrata rapidamente, mas exerce pouca influência sobre as propriedades da pasta.

2.8.2 Impacto ambiental na fabricação do cimento Portland

Segundo Cordeiro (2006), o CO₂ emitido pela indústria do cimento Portland é liberado durante a calcinação do calcário e queima de combustíveis fósseis utilizados no processo de fabricação do clínquer.

Para a produção de uma tonelada de cimento são gerados entre 0,73 a 0,99 toneladas de CO₂, a depender do teor de clínquer no cimento, pois existem alguns tipos de cimentos que contém uma quantidade maior de clínquer e outros menores devido as suas adições (HASANBEIGI; PRINCE, 2012). Uma grande dificuldade encontrada na indústria do cimento Portland, são os altos custos vinculados aos processos e técnicas para diminuição da emissão de CO₂ (ROOTZEN e JOHNSON, 2016). Um dos maiores desafios para as indústrias é incorporar a crescente demanda de produção à adoção de medidas sustentáveis. Diversos estudos analisam a substituição parcial do clínquer por resíduos industriais ou agrícolas que poderiam atuar como materiais cimentícios ou pozolânicos (CAVALCANTI e RIBEIRO, 2013; CORDEIRO e BARROSO, 2011; COCIÑA *et al.*, 2013; FERREIRA *et al.*, 2014).

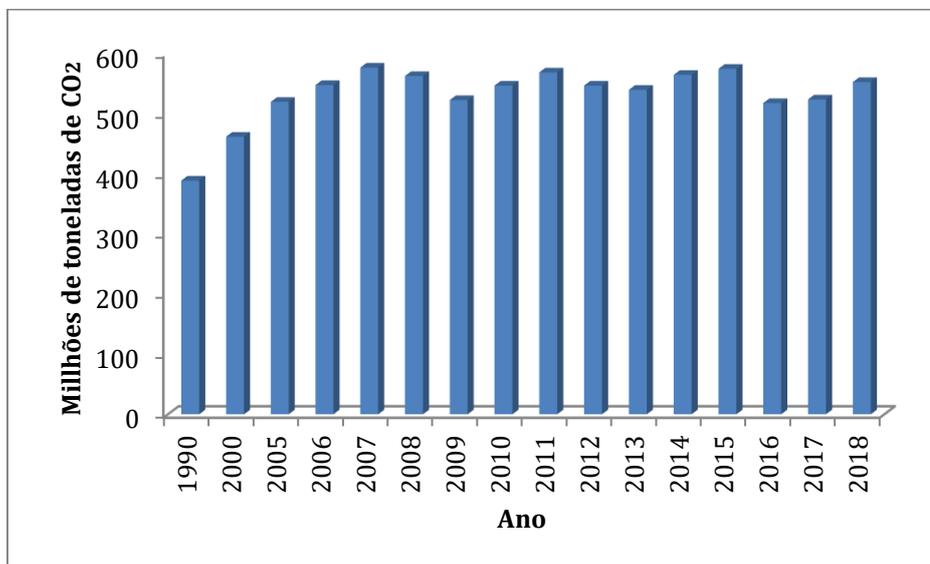
2.9 ESTIMATIVA DA PRESERVAÇÃO AMBIENTAL

Adotando, a perspectiva ambiental, alguns dos benefícios gerados são a redução da quantidade de resíduos provenientes da CBCA em aterros sanitários, lixões e terrenos baldios, ocasionando impactos ambientais. Outros fatores são o consumo de água e a quantidade de CO₂ emitido, principalmente durante o processo de produção do clínquer, o que corresponde 90% entre a descarbonatação e a queima de combustíveis fósseis e os outros 10% são oriundos do transporte da matéria-prima e o consumo de eletricidade das fábricas. Conforme o Inventário Nacional dos Gases do Efeito Estufa do Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil (2010), são emitidos cerca de 600kg de CO₂ para cada tonelada de cimento, este se apresenta bem inferior à média mundial que é cerca de 900 kg de CO₂ resultam da produção de 1 tonelada de cimento e o consumo de água por tonelada de cimento pode chegar à 3.500 litros.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2019), a emissão de gases do efeito estufa pela indústria cimenteira corresponde globalmente cerca de 7% das emissões totais de

dióxido de carbono emitido no mundo. No Brasil, esta porcentagem é reduzida, a participação é cerca de 2,6%, devido várias ações de sustentabilidade praticadas ao longo dos últimos anos pela Indústria.

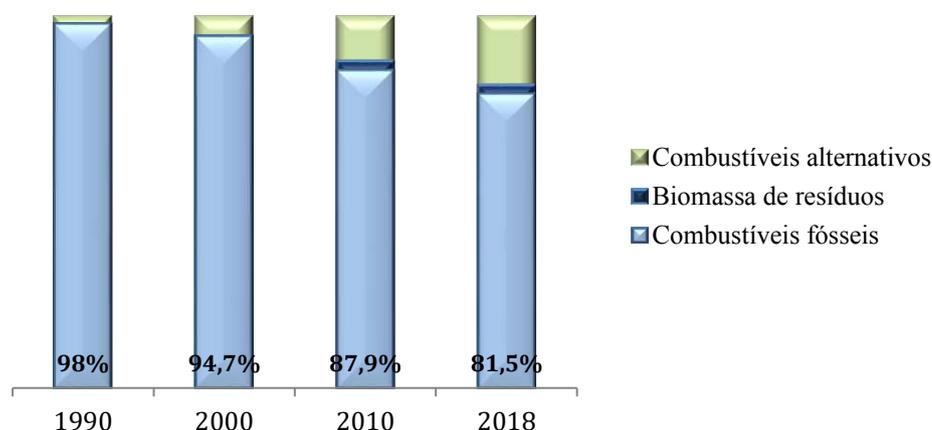
Figura 8 - Total de emissões brutas de CO₂



Fonte: Getting the Numbers Right – GNR (2018)

Segundo Getting the Numbers Right (2019), a Indústria de Cimento demonstra que desde o ano de 1990 até 2018 foi alcançada uma redução significativa de 19,2% em CO₂ por tonelada de cimento, conforme ilustra a Figura 8. A proporção de combustíveis alternativos usados é agora 9,5 vezes maior do que em 1990 e a eficiência energética também foi melhorada em 18% (GNR, 2018).

Figura 9 - Substituição de combustíveis fósseis – Biomassa de resíduos



Fonte: Getting the Numbers Right – GNR (2018)

Grandes quantidades de biocombustíveis devem ser produzidas e ofertadas no mercado mundial para substituir os combustíveis fósseis derivados do petróleo. Um exemplo dos avanços alcançados até o momento é o uso de biomassa e combustíveis alternativos, como resíduos municipais e industriais, de acordo com a Figura 9. Esses materiais residuais foram desviados do aterro sanitário e da incineração e são coprocessados durante a fabricação de cimento. O coprocessamento oferece melhor desempenho ambiental do que o aterro sanitário e a incineração. É uma opção de gestão de resíduos prática, econômica e segura, GNR (2018).

Todavia, as estimativas do potencial brasileiro de redução da emissão de CO₂ e do consumo de água por meio da CBCA em substituição parcial do cimento Portland, fundamental componente do concreto, mostram-se promissores.

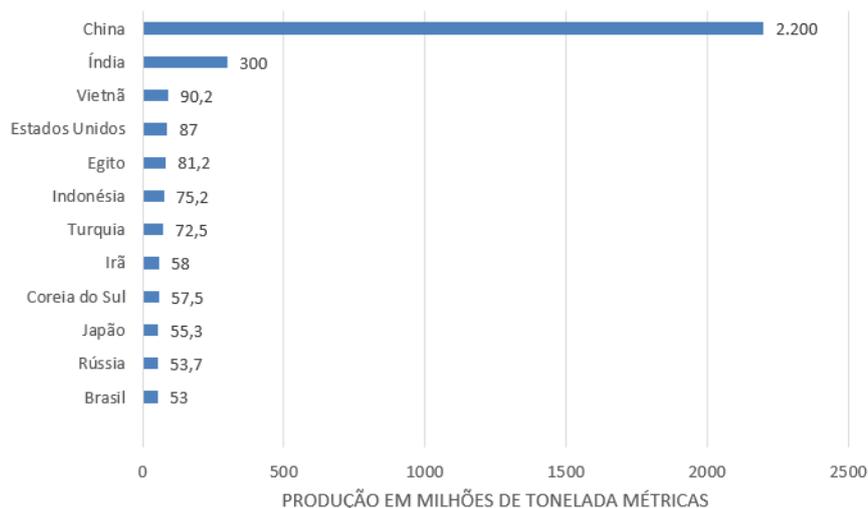
2.10 ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE CUSTO

Segundo Statista (2019) a China apresentou a maior produção mundial de cimento em 2019 com cerca de 2,2 bilhões de toneladas, conforme ilustrado na Figura 10.

Conforme Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019), o consumo aparente de cimento, independentemente do crescimento de 2,4% em 2013, prosseguiu com a desaceleração

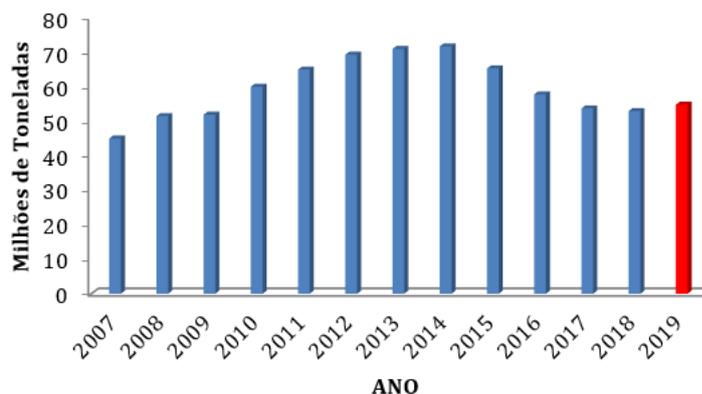
apontada nos dois anos anteriores. Ao todo, foram 71 milhões de toneladas consumidas em todo território nacional. O parque industrial continuou crescendo, com inauguração de novas unidades e aumento da capacidade de fábricas já existentes, permitindo a produção atingirem um patamar de 70,2 milhões de toneladas, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 10 - Países líderes na produção de cimento em 2019 (em milhões de toneladas métricas)



Fonte: Statista (2019)

Figura 11 - Consumo anual de cimento no Brasil (em milhões de toneladas)



Fonte: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2019)

Segundo a SNIC (2019), a produção nacional de 2019 foi de 54.793.794 toneladas, empregando cálculo de porcentagem simples, constatou-se que a substituição parcial de clínquer por 15% de CBCA no cimento para a produção de concreto, proporciona uma redução no consumo de cimento de aproximadamente 46.574.724,9 toneladas. A conversão do montante de toneladas em sacos de 50 kg de cimento produz aproximadamente 931.494,498 sacos de cimento. Adotando-se o preço do saco de cimento do mês novembro de 2020 para R\$ 24,00 reais, o montante obtido é de R\$ 22.355.867,95 milhões de reais. Se comparado ao montante gerado pelo concreto com 100% de clínquer que é de R\$ 26.301.021,12 milhões de reais. Como pode ser observado, nota-se que a redução adquirida com o uso do CBCA é aproximadamente R\$ 3.945.153,17 milhões de reais, conforme ilustra a Tabela 5.

Tabela 5 - Redução adquirida com o uso da CBCA

Produção nacional de 2019	54.793.794 toneladas
Substituição parcial do cimento Portland por 20% de CBCA	43.835.035,2 toneladas
Sacos de 50kg de cimento	876.700,704 sacos
Preço do saco de cimento R\$24,00	R\$ 21.040.816,90 ~ US\$ 3.882.248,49
Concreto com 100% de clínquer	R\$ 26.301.021,12 ~ US\$ 4.852.810,61
Redução adquirida	R\$ 5.260.204,22 ~ US\$ 970.562,2

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

2.11 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Conforme a Norma Brasileira Regulamentadora NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade “Consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

A durabilidade do concreto pode ser determinada como a sua capacidade de resistir a danos inerentes ao meio ambiente do qual o mesmo está inserido, sendo esta não só uma intrínseca propriedade do concreto bem como um atributo, ao qual não pode ser diretamente medido, apesar de que possa ser analisada através do desempenho do material quando submetido a determinadas condições de exposições (ZAKARIA e CABRERA, 1996).

A vida útil, a segurança, a confiabilidade e o risco dos sistemas de infraestrutura tornaram-se questões emergentes nos últimos anos devido às catástrofes naturais e humanas, questões de sustentabilidade e ao aquecimento global (FELIX *et al.*, 2018). Com o intuito de conceber uma estrutura com uma baixa necessidade de manutenção durante a sua vida útil, medidas devem ser tomadas já na fase de concepção e, ainda, é necessário realizar o controle quando a estrutura está em serviço (ELLINGWOOD *et al.*, 2016).

2.12 CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão das armaduras apresenta-se como a patologia com o maior índice de ocorrência em estruturas de concreto armado (KARI *et al.*, 2014). O período de iniciação da corrosão ocorre quando os agentes agressivos atravessam o cobrimento do concreto e alcança a armadura em quantidades suficientes para provocar a sua despassivação.

Segundo González *et al.*, (1996), a perda da passividade natural da armadura do concreto pode ser alterada pela presença de íons cloreto em concentrações suficientes para romper de forma localizada a película passiva ou pela redução do pH do concreto devido ao efeito da carbonatação.

A corrosão da armadura de aço no concreto é um processo eletroquímico, causado pelas diferenças nas concentrações de íons dissolvidos, de maneira que parte do metal se torna

catódica e outra anódica, resultando na perda de volume do material e na formação de produtos de corrosão, material secundário com volume de 3 a 10 vezes maior que o inicial (Mehta *et al.*, 2014; Geiker *et al.*, 2016). As áreas anódicas e catódicas surgem como resultado de diferenças de potencial elétrico das regiões das armaduras (Helene, 1986).

2.13 VIABILIDADE ECONÔMICA DE UTILIZAÇÃO DA CBCA

A busca por materiais sustentáveis de construção tem influenciado os pesquisadores a empregarem resíduos agrícolas como importante fonte de recursos opcionais. No entanto, a viabilidade de aplicação desses resíduos está ligada à determinada conjuntura econômica onde predomina a escassez de materiais convencionais de construção incorporada ao elevado custo de sua aquisição. Outrossim, a utilização desses resíduos pode gerar a melhora nas propriedades tecnológicas dos elementos onde os mesmos vêm sendo utilizados. O fluxograma apresenta os principais aspectos referentes às vantagens do uso da CBCA na Figura 12.

Segundo Toledo Filho *et al.* (2007), se no Brasil fosse substituído 20% do cimento destinado à produção de concreto, por cinza de bagaço de cana-de-açúcar, a redução na emissão de CO₂ seria da ordem de 6 milhões de toneladas por ano.

Figura 12 - Fluxograma de uso de CBCA



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

2.14 MÉTODOS DE ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO

Knoll (1935), relatou o conceito de um microscópio eletrônico de varredura e foi o trabalho mais antigo e reconhecido que deu início a microscopia eletrônica de varredura. Mais adiante, (ZWORYKIN *et al.*, 1942), descreveram que a emissão de elétrons secundários poderia ser responsável pelo contraste topográfico da imagem gerada. A fase seguinte foi o desenvolvimento do detector de elétrons secundários pelo mesmo autor (ZWORYKIN *et al.*, 1942). Posteriormente Everhart e Thornley (EVERHART; THORNLEY, 1960) utilizaram um cintilador para converter os elétrons em luz, os quais eram, então, transmitidos a um fotomultiplicador. Muitos avanços foram conquistados e modernamente os instrumentos foram equipados com estrutura digital que permite armazenamento temporário da imagem para análise ou até mesmo a transferência por rede.

De acordo com Dedavid *et al.* (2007), quando o feixe primário incide na amostra, parte dos elétrons difunde-se e constitui um volume de interação cuja forma depende principalmente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra. Para serem detectados, as partículas e/ou os raios eletromagnéticos resultantes da interação do feixe eletrônico com a amostra devem retornar à superfície da amostra e daí atingirem o detector. A profundidade máxima de detecção, portanto, a resolução espacial, depende da energia com que estas partículas ou raios atingem o detector, ou são capturadas pelo mesmo. A imagem formada a partir do sinal captado na varredura eletrônica de uma superfície pode apresentar diferentes características, uma vez que a imagem resulta da amplificação de um sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra. Diferentes sinais podem ser emitidos pela amostra. Dentre os sinais emitidos, os mais utilizados para obtenção da imagem são originários dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retroespalhados (DEDAVID, 2007).

Ainda em concordância com Dedavid *et al.* (2007), os elétrons secundários na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) resultam da interação do feixe eletrônico com o material da amostra. Estes elétrons resultantes são de baixa energia (<50eV), e formarão imagens com alta resolução (3-5 nm). Na configuração física, somente os elétrons secundários produzidos próximos à superfície podem ser detectados. O contraste na imagem é dado, sobretudo, pelo relevo da amostra, que é o principal modo de formação de imagem no MEV. Os elétrons secundários, elétrons de baixa energia, gerados pelas interações elétron-átomo da amostra têm

um livre caminho médio de 2 a 20 nm, por isso, somente aqueles gerados junto à superfície podem ser reemitidos e, mesmo estes, são muito vulneráveis à absorção pela topografia da superfície. Os elétrons retroespalhados, por definição, possuem energia que varia entre 50eV até o valor da energia do elétron primário. Os que apresentam energia próxima à dos elétrons primários, são aqueles que sofreram espalhamento elástico, e são estes que formam a maior parte do sinal de BSE. Os de alta energia, por serem resultantes de uma simples colisão elástica, provêm de camadas mais superficiais da amostra. Logo, se somente este tipo de elétrons forem captados, as informações de profundidade contidas na imagem serão poucas se comparadas com a profundidade de penetração do feixe (DEDAVID, 2007).

O detector de energia dispersiva (EDS) possibilita a análise química em um ponto específico das amostras ou em uma área das amostras em termos qualitativos, quantitativos e semiquantitativos. É recomendável utilizar microanálises químicas para a determinação da composição das fases (TAYLOR, 1997).

Segundo Taylor (1998), a análise pontual por EDS atua em uma reduzida área e representam assim a mistura de vários produtos de hidratação com diferentes tipos de composição. É possível adquirir uma estimativa da composição dos relevantes produtos da hidratação de cimento, como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), Etringita, CH (hidróxido de cálcio), e AFm (monossulfoaluminato de cálcio).

A análise da presença dos produtos hidratados no cimento é feita em função da observação conjunta dos quocientes das massas atômicas dos óxidos, como representado:

$$C - S - H: \quad 0,8 \leq \frac{Ca}{Si} \leq 2,5 \quad \frac{(Al + Fe)}{Ca} \leq 0,2$$

$$CH: \quad \frac{Ca}{Si} \geq 10 \quad \frac{(Al + Fe)}{Ca} \leq 0,04 \quad \frac{S}{Ca} \leq 0,04$$

$$AFm: \quad \frac{Ca}{Si} \geq 4 \quad \frac{(Al + Fe)}{Ca} \leq 0,4 \quad \frac{S}{Ca} \leq 0,15$$

2.15 MÉTODOS PARA ANÁLISE DE POZOLANICIDADE

O procedimento de Difractometria de Raios X (DRX) é essencial na análise estrutural de materiais sólidos, onde o difratograma é um gráfico da intensidade da radiação espalhada em função do ângulo de espalhamento (SKOOG, 2009). Segundo Cordeiro (2006), esse procedimento permite definir a composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes em um material.

A lei fundamental que retrata o fenômeno da difração de raio x, isto é, que relaciona o comprimento de onda incidente, a distância entre os átomos e o ângulo de desvio do feixe incidente, é a lei de Bragg Equação (1). O embasamento desta lei constitui-se em que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão dos planos paralelos de átomos no interior do cristal, deste modo cada plano reflete unicamente uma pequena fração da radiação.

$$2d \cdot \text{sen}\theta = nr\lambda \quad (1)$$

Onde:

D, distância interplanar para o conjunto de planos da estrutura;

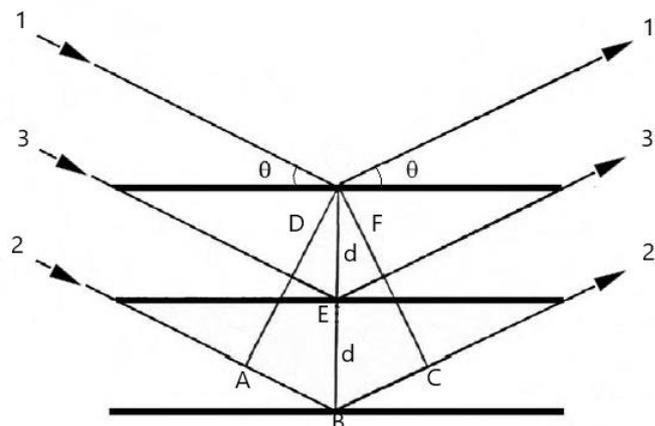
N, um número inteiro (ordem de difração);

θ , ângulo de incidência de raio X, medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos;

λ , comprimento de onda da radiação incidente.

A equação que explana a lei de Bragg pode ser visualizada no esquema da Figura 13, que é uma explicação geométrica do fenômeno de difração num reticulado de átomos.

Figura 13 - Representação do ângulo θ no estado de difração



Fonte: Adaptado de Cullity, (1978)

Quando a estrutura cristalina da matéria é conhecida, pode-se depreender a forma do padrão de difração gerado por ele. Todavia normalmente em cristalografia realiza-se o trabalho contrário, deduzindo a estrutura cristalina através do padrão de difração (CULLITY, 1978).

2.16 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

Algumas técnicas eletroquímicas são usualmente aplicadas ao estudo da corrosão das armaduras, tais como: registro do potencial de corrosão (Stratful, 1973) e (Bauer; Souza, 1988); resistência de polarização (Bauer, 1995) e (Monteiro, 1996) e resistividade elétrica (Farias; Tezuka, 1992).

2.16.1 Registro do potencial de corrosão

O método de teste padrão para potenciais de meia célula de aço de reforço não revestido em concreto - ASTM C 876 (2015) fundamenta-se na determinação da diferença de potencial elétrico entre o aço das armaduras e um eletrodo de referência que se coloca em contato com a superfície do concreto. As condições principais que podem produzir condições equivocadas nas medidas de potencial são: variações de temperatura, teor de umidade de concreto, taxa de

oxigênio disponível, espessuras diferentes de revestimento de concreto, presença de fissuras no concreto e a existência de correntes erráticas (Andrade, 1992).

A norma ASTM C 876 (2015) estabelece como referência do estado de corrosão, valores para probabilidade de corrosão, com relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS), conforme indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação do risco de corrosão em função do potencial de corrosão

Potencial de corrosão (mV)	Probabilidade de corrosão	Análise
Mais positivo que - 200mV	< 10%	Ausência de corrosão
Entre -200mV e -350mV	Incerta	Indícios de corrosão
Mais negativo que -350mV	> 90%	Corrosão ativa

Fonte: Adaptado da ASTM C 876, (2015)

2.16.2 Resistividade

Segundo Cascudo (1997), as propriedades do concreto variam significativamente durante o processo de hidratação, portanto, fatores tais como relação água/cimento, tipo do cimento e a idade do concreto são de grande importância que influenciam diretamente na resistividade elétrica.

A resistividade elétrica é um parâmetro relacionado com a permeabilidade, e conseqüentemente, com a resistência do concreto à penetração de agentes agressivos, tais como o dióxido de carbono e os cloretos (Andrade e D'Andrea, 2011).

2.16.3 Resistência de polarização

Segundo Wolynec (2003) a resistência de polarização (R_p) de um sistema corrosivo é determinada como a inclinação da curva de polarização do potencial elétrico da armadura ou metal em função da intensidade da corrente de polarização ao potencial de corrosão da armadura

(E_{corr}). A tangente da curva potencial-corrente na região do potencial de corrosão corresponde à grandeza R_p .

A intensidade de corrosão é fornecida pela densidade da corrente aplicada, dividida pela mudança de potencial, que é expressada pela Equação (2) desenvolvida por Stern e Gear (1957).

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

Sendo B , uma constante, cujo seu valor altera com o tipo de aço e com o ambiente que está localizado. Portanto, essa relação dar-se-á que “seu valor está variando entre 26 e 52 mV”. Para testes em campo, orienta-se o valor de 26 mV, que representa a corrosão de armadura. Nesta pesquisa foi adotado o valor de 26 mV. O R_p é decorrência da aplicação de uma pequena perturbação elétrica a armadura e mede a mudança no potencial ou intensidade que ocorre, onde essas perturbações não devem causar alterações maior que +20 mV, de acordo com a Equação (3).

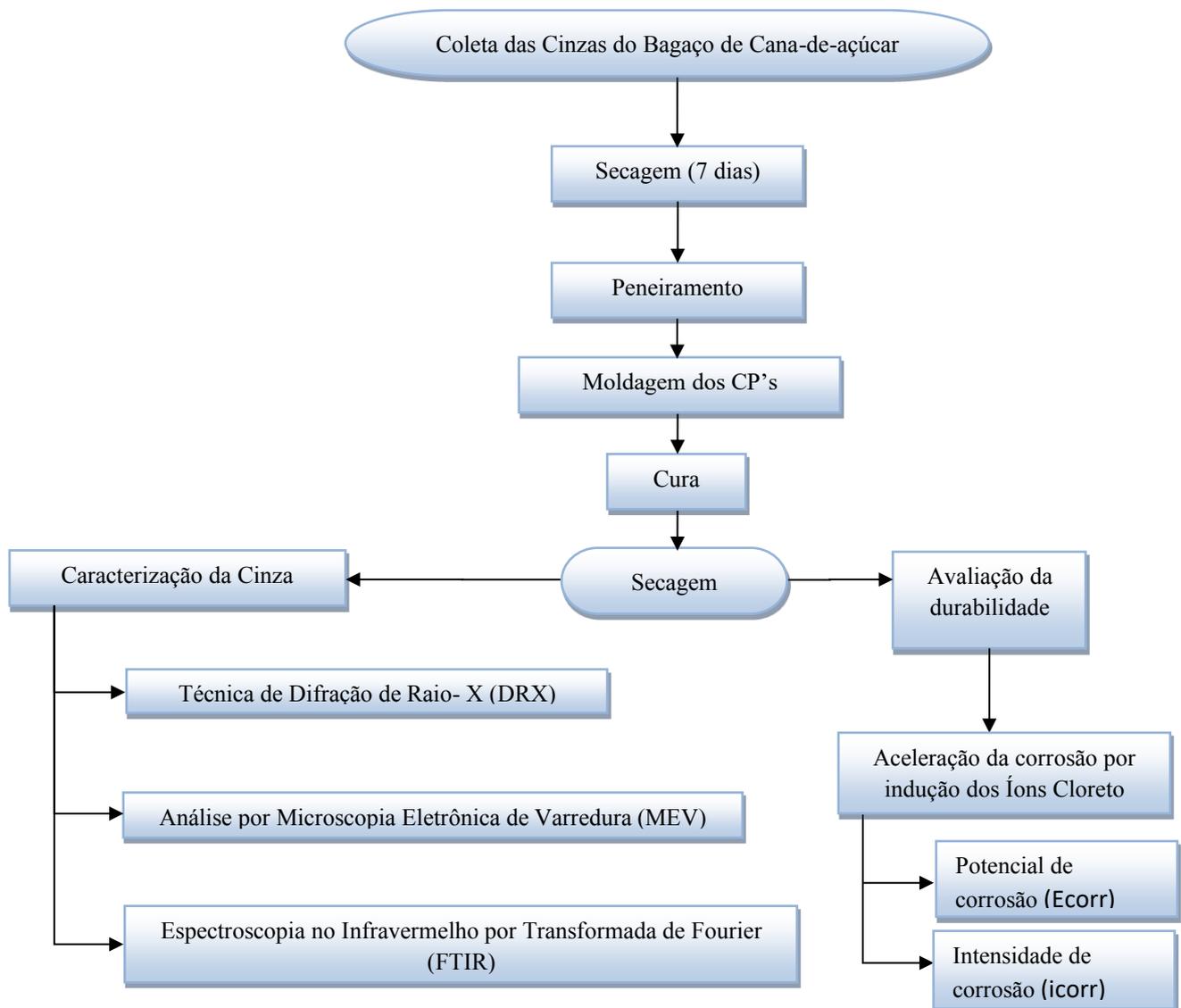
$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad \Delta E \rightarrow 0 \quad (3)$$

Onde, a resistência à polarização está relacionada com a velocidade de corrosão, I_{corr} e densidade da corrente de corrosão que flui entre as zonas catódica e anódica durante a corrosão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada nesta pesquisa seguiu o fluxograma apresentado na Figura 14, onde são mostradas as principais atividades desenvolvidas para alcançar os objetivos. A princípio para o desenvolvimento experimental do projeto, foi realizada a coleta da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) fornecida pela Usina São José, localizada no município de Igarassu, no estado de Pernambuco. As atividades fizeram uso dos laboratórios da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) e do Centro de Pesquisa e Estudos Avançados de IPN (Cinvestav). O estudo foi disposto de forma a avaliar as características do concreto produzido com a CBCA, incluindo a caracterização dos materiais convencionais utilizados e a dosagem experimental. Também foram realizadas algumas análises através de métodos químicos, físicos e mineralógicos. As amostras não passaram por tratamentos de moagem e calcinação sendo submetidas na sua condição natural uma vez que a finalidade do estudo é focar numa alternativa de baixo custo para utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar.

Figura 14 - Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Elaboração da autora, (2021)

3.1 MATERIAIS

Foram escolhidos os materiais a fim de serem produzidos concretos e pastas para todas as análises posteriores da pesquisa.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado no experimento foi o CPV ARI, normatizado pela NBR 16697 (ABNT,2018). Suas principais características técnicas são alta resistência inicial e regularidade

nas propriedades físico-químicas. A escolha deste tipo de cimento foi o baixo percentual de adições tendo uma influência mínima nos resultados.

3.1.2 Agregados Naturais

Areia normalizada pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Brasil) em conformidade com a NBR 7214 (2015) e cascalho da Unicap/ PE.

3.1.3 Água

A água utilizada foi oriunda da rede de abastecimento público da cidade do Recife (COMPESA) e da cidade de Mérida/ YUC.

3.1.4 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA)

As cinzas utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas e coletadas da Usina São José LTDA., situada em Igarassu, Região Metropolitana do Recife (RMR), dista cerca de 48 Km do Centro de Recife, no Estado de Pernambuco, na região nordeste do Brasil (Figura 15).

Figura 15 - Usina São José em Igarassu



Fonte: São José Agroindustrial (2019)

A Usina utiliza o bagaço resultante da moagem da cana-de-açúcar como combustível para geração de energia elétrica. A temperatura de queima varia de acordo com o teor de umidade do bagaço, ou seja, não ocorre de forma controlada, ficando compreendida entre 500°C a 700°C para 50% de umidade. Foram coletadas em uma de suas lagoas de decantação (Fotografia 1) aproximadamente 150 kg de CBCA úmida, cor escura, determinando processo de combustão

incompleto, conforme Cordeiro (2006). Estas foram depositadas em sacos plásticos e transportadas até o local no qual foram submetidas ao processo de secagem. Após secagem o material foi estocado no laboratório da Universidade Católica de Pernambuco.

Fotografia 1 - Tanques de decantação



Fonte: Elaboração da autora, (2019)

Para o processo de secagem, a CBCA foi depositada em lonas plásticas e devidamente espalhadas, na qual permaneceram por 7 (sete) dias expostas ao sol e a noite eram cobertas por lonas plásticas para que não fossem molhadas pela possibilidade de chuvas, ficando completamente secas.

Em seguida a cinza foi levada ao laboratório e submetida ao primeiro peneiramento, em peneira de abertura 4,75mm, para retirar folhas, pedras e outros materiais contaminantes, decorrentes do seu armazenamento a céu aberto nos tanques de decantação. A Fotografia 2 mostra o aspecto da cinza antes do peneiramento.

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar restante foi submetida ao processo de peneiramento na peneira #200 de abertura 0,075 mm (Fotografia 3), a fim de obter uma granulometria similar à do cimento. Foram obtidas aproximadamente 50 kg de CBCA pelo peneiramento na peneira #200.

Fotografia 2 - Antes do peneiramento da CBCA



Fonte: Elaboração da autora, (2019)

Fotografia 3 - Após o peneiramento CBCA



Fonte: Elaboração da autora, (2019)

A Tabela 7 expõe sinteticamente as etapas de manuseio da CBCA, até sua utilização como substituto parcial do cimento Portland no concreto.

Tabela 7 - Tratamento da CBCA

Coleta da CBC	Secagem	Peneiramento inicial	Peneiramento #200	Utilização no concreto
Tanques de decantação	7 dias	Retirar Impurezas	Granulometria de cimento	

Fonte: Elaboração da autora, (2019)

3.1.5 Armaduras

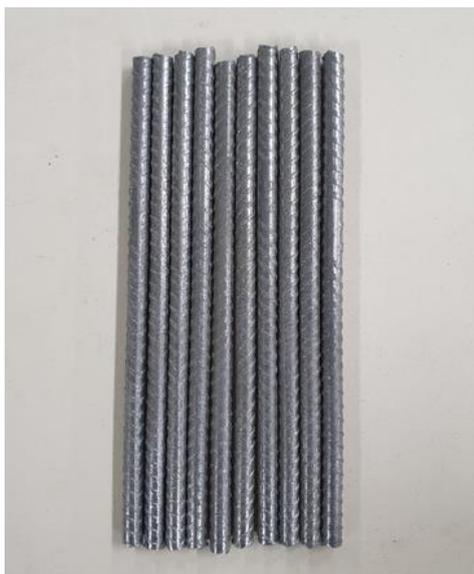
As armaduras utilizadas nos concretos armados, para verificação do potencial de corrosão, foram barras de aço carbono nervuradas, de diâmetro nominal \varnothing 6,3 mm e classificada como CA-50 de acordo com a NBR 7480 (ABNT, 2007). Inicialmente, as barras foram higienizadas de acordo com a norma internacional ASTM G1-03 (ASTM, 2017), depois foram cortadas no tamanho de 15 cm, em seguida foram dispostas em solução feita com 500 ml de Ácido Clorídrico, 3,5 g de Hexametilenotetramina e 1L de água por 15 minutos. Posteriormente, as barras foram lavadas em água corrente e com auxílio de escovas de aço foi feita a remoção da camada de óxido e de impurezas que interferissem na determinação da massa inicial ou provocassem desencadeamento do processo corrosivo em sua superfície. A Fotografia 4 ilustra o aspecto de como as barras estavam antes da limpeza e a Fotografia 5 apresenta como as mesmas ficaram após a limpeza. Após a limpeza, as barras foram pesadas em balança analítica e identificadas com uma numeração para realização das medidas eletroquímicas.

Fotografia 4 - Barras de aço antes da limpeza



Fonte: Elaboração da autora, (2019)

Fotografia 5 - Barras de aço após a limpeza



Fonte: Elaboração da autora, (2019)

3.1.6 Caracterização dos materiais anidros

Visando caracterizar quimicamente, fisicamente e mineralogicamente a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e o cimento CP V - ARI, foram selecionadas as técnicas abaixo:

- Técnica de difração de raio-X (DRX);
- Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Espectroscopia no infravermelho com transmissão de Fourier (FTIR).

Foram analisadas algumas propriedades e características das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, comprovando os elementos que viabilizassem a sua utilização como substituição parcial do cimento Portland.

3.1.6.1 Técnica de Difração de Raios X (DRX):

O reconhecimento das fases cristalinas de um material por difração de raios-X (DRX) é um mecanismo antigo utilizado na investigação da estrutura da matéria. A lei que apresenta o acontecimento da difração de raios X é a Lei de Bragg. A ocorrência de difração de raios X acontece em materiais cristalinos, devido ao fato do comprimento de onda dos raios X ser da mesma ordem de grandeza da distância interplanar de um cristal. O ângulo que o feixe incidente faz com o conjunto de planos escolhidos (θ) depende do comprimento de onda dos raios X (λ) e do espaçamento entre planos atômicos de um determinado cristal (d), conforme a Equação (1), que descreve a Lei de Bragg, sendo evidenciado na Figura 10.

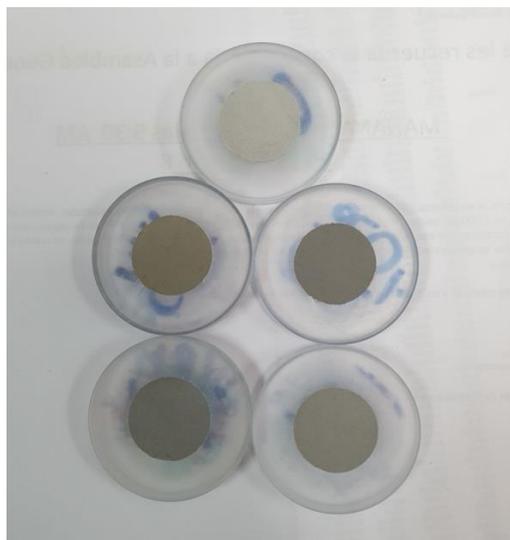
A composição mineralógica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar oriunda da usina (CBCA) e o cimento Portland CPV ARI foi determinada utilizando um difratômetro D8 Advance, Bruker (Fotografia 6), equipamento disponível no Laboratório Nacional de Nano e Biomateriais, localizado na Cinvestav - IPN na cidade de Mérida no México, que contém um tubo de alvo de cobre com comprimento de onda (λ) de 1,54060 Å, corrente de 10 mA e tensão de 30 kV. As fases presentes nas amostras foram em seguida reconhecidas com o auxílio do programa computacional X'Pert HighScore Plus, com base de dados centrada no sistema PDF (Powder Diffraction).

Fotografia 6 – Difratômetro de raios X (DRX)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 7 - Amostra após os procedimentos



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

A metodologia detalhada do preparo e execução do ensaio, bem como os detalhes dos difratogramas de todas as amostras anidras, estão indicados no Apêndice A.

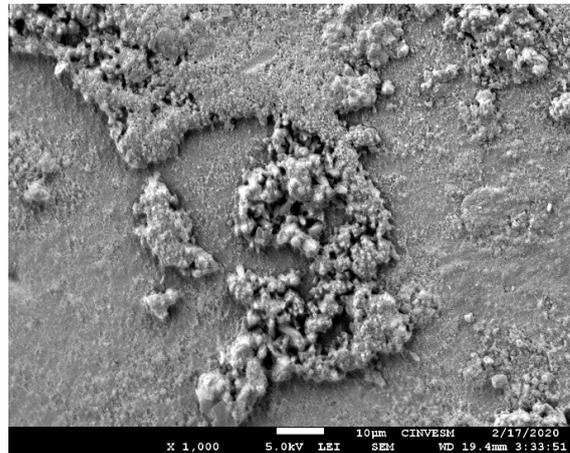
3.1.6.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV):

O recurso da Microscopia Eletrônica de Varredura ou Scanning Electron Microscopy (SEM) permitiu fazer uma análise morfológica das partículas e visualizar mudanças significativas no tamanho das partículas, aspectos e textura dos materiais utilizados na pesquisa, provocadas pelos tipos diferentes de amostras. A técnica de microscopia eletrônica de varredura utiliza um feixe de elétrons para percorrer a superfície da amostra, gerando a liberação de elétrons secundários que são empregados na formação das imagens a serem investigadas. Uma tensão de polarização é aplicada ao espécime enquanto o feixe de elétrons é emitido, permitindo imagens da superfície superior com apenas várias centenas de eV de elétrons incidentes, tornando possível obter imagens de alta resolução. As imagens foram obtidas utilizando o equipamento do Laboratório de Microestruturas, Cinvestav - IPN na cidade de Mérida no México, da marca JEOL, modelo JSM7600F que é equipado com os detectores de elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE). Como infraestrutura auxiliar à preparação das amostras, o laboratório dispõe do equipamento Quanta Quorum Q150R ES para

recobrimento com paládio aumentando a condutividade dos materiais não condutores. As Figuras 16 a 20 retratam a morfologia das partículas das amostras.

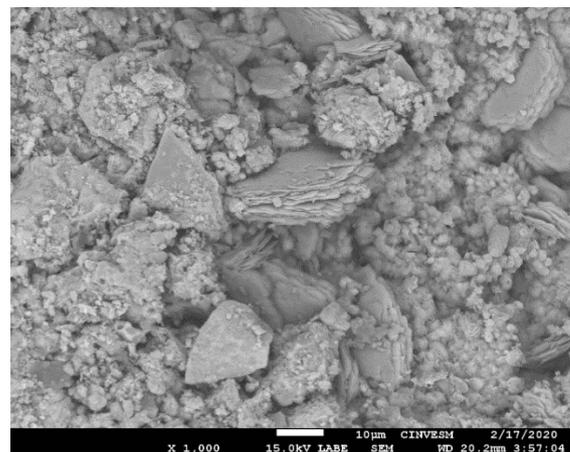
Os procedimentos detalhados da preparação e execução do ensaio, bem como os detalhes dos resultados gerais, estão apresentados no Apêndice A.

Figura 16 – Amostra de Referência – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (1.000x e 5kv)



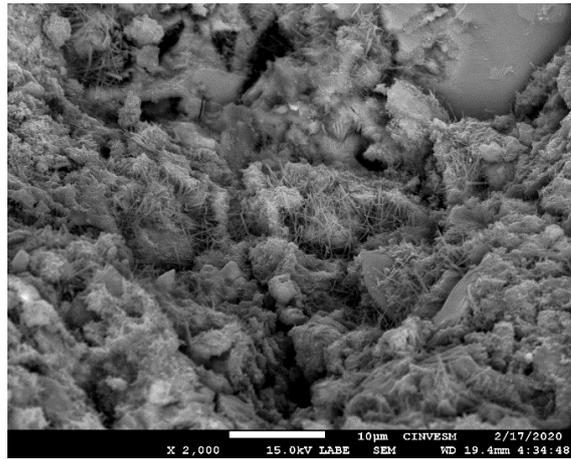
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 17 – Amostra com 10% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (1.000x e 15kv)



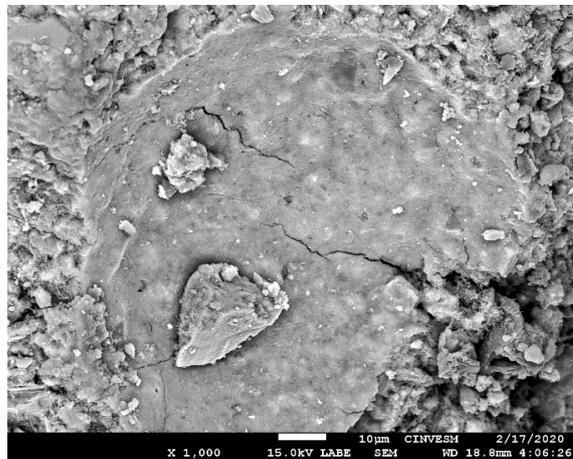
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 18 - 15% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (2.000x e 15kv)



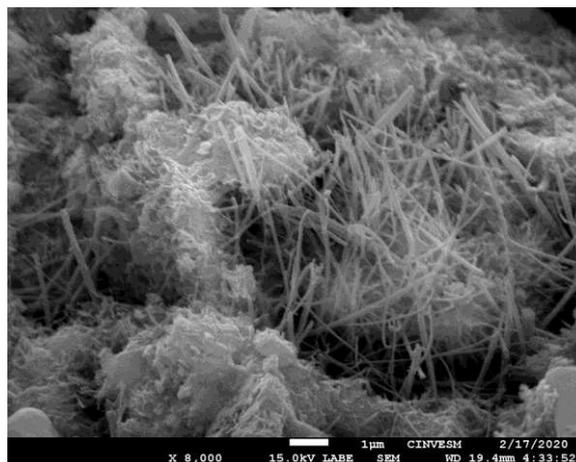
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 19 - 15% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (1.000x e 15kv)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 20 – 20% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (8000x e 15kv)



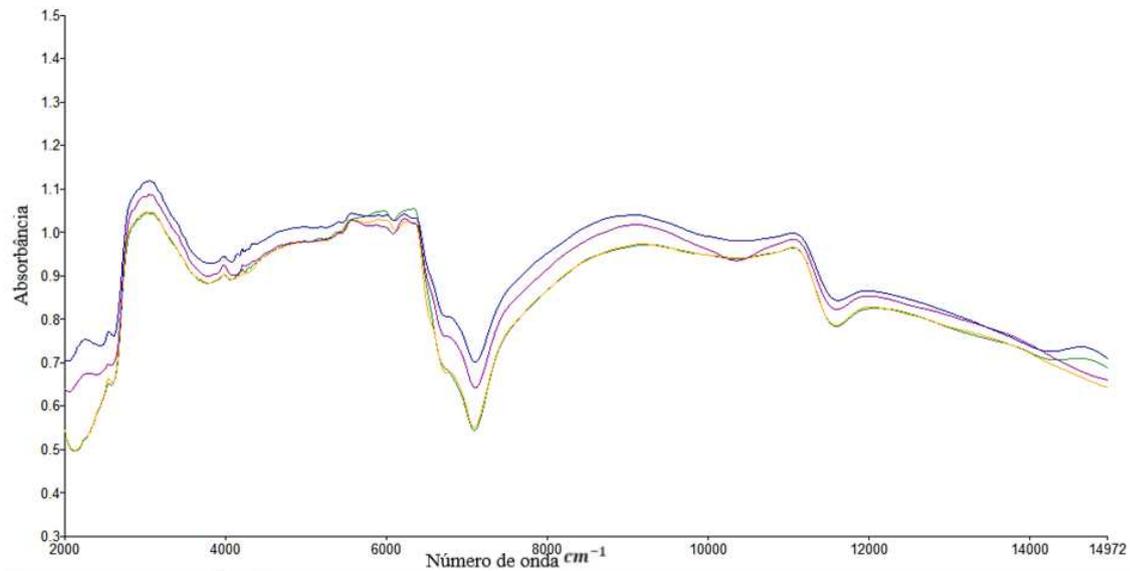
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

As imagens obtidas a partir de elétrons secundários através MEV, operando a 15kV, apresentam que as amostras apresentam formas de partículas irregulares, bastões e lamelares; também são detectadas cavidades (vazios).

3.1.6.3 Espectroscopia no infravermelho com transmissão de Fourier (FTIR):

A utilização da técnica de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy FTIR) na química do cimento, argamassas aumentou recentemente. O princípio de funcionamento é baseado na absorção em nível molecular de radiação na área do espectro infravermelho que produz transições vibracionais e/ ou rotacionais das moléculas. A análise foi realizada com um espectrômetro infravermelho da marca PerkinElmer Frontier, modelo IR/FIR que permitiu obter percepções mais profundas sobre as propriedades dos materiais da pesquisa. A espectroscopia forneceu uma compreensão da amostragem através da análise espectral, onde foi possível detectar uma série de picos que descrevem a composição química das amostras de argamassa contendo teores de 0%, 10%, 15% e 20% de CBCA. A análise pelo FTIR das amostras é ilustrada nos gráficos das Figuras 21 e 22.

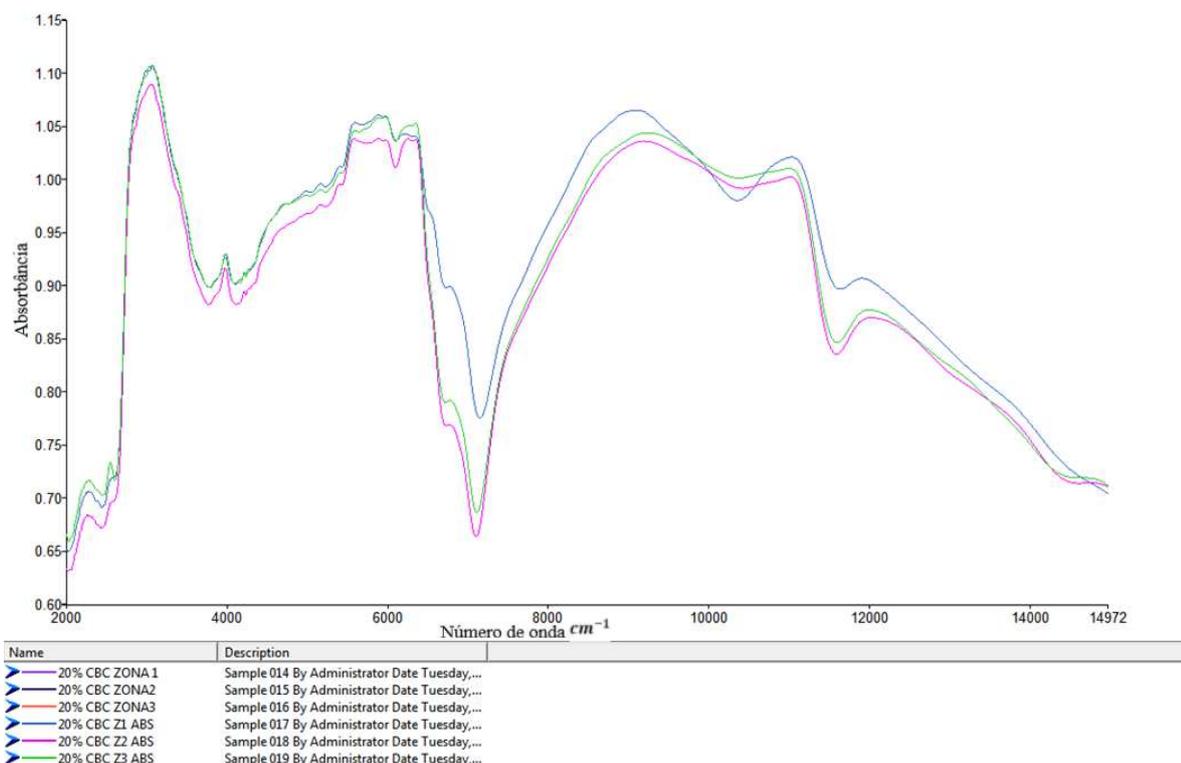
Figura 21 - Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 0%, 10% e 15% de CBCA



Name	Description
0% DE CBC	Sample 004 By Administrator Date Tuesday,...
Administrator 05	Sample 005 By Administrator Date Tuesday,...
0% DE CBC ABS	Sample 006 By Administrator Date Tuesday,...
10% DE CBC	Sample 007 By Administrator Date Tuesday,...
10% DE CBC R	Sample 008 By Administrator Date Tuesday,...
15% DE CBC R	Sample 009 By Administrator Date Tuesday,...
15 % DE CBC ABS	Sample 010 By Administrator Date Tuesday,...

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 22 - Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 20% de CBCA



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

3.2 MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE

Através do método direto foi verificada a pozolanicidade do material proposto na pesquisa.

3.2.1 Técnica de difração de raios-X

Visando o reconhecimento das fases hidratadas formadas, as pastas de referência foram produzidas a partir da mistura de cimento Portland e água sem a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. A seguir, foram substituídos diferentes teores de cimento por CBCA (10%, 15% e 20%, em peso) em misturas com relação água/ matérias sólidas igual a 0,48 (em massa), conforme apresentadas na Tabela 8.

Para o ensaio, as amostras foram primeiramente levadas à estufa 60°C até constância de massa. Em seguida, o material foi compactado em porta amostra com ajuda de uma placa de vidro.

Tabela 8 - Proporção dos materiais utilizados na produção das pastas

Proporções utilizadas				
Materiais utilizados	Cimento (g)	Água (g)	CBCA (g)	Relação a/ aglomerante
CPV - ARI (Ref.)	20		0	0,48
CBCA 10%	18	11	2	0,48
CBCA 15%	17	11	3	0,48
CBCA 20%	16	11	4	0,48

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

As amostras (pastas) foram preparadas na Universidade Católica de Pernambuco, a mistura dos materiais secos foi feita manualmente em um recipiente, posteriormente adicionou-se em um misturador mecânico 1/3 da quantidade de água, logo após o intervalo de tempo de 30 segundos se adicionou o restante da água 2/3, dando prosseguimento a mistura por um intervalo de tempo de 1 minuto e meio. Após o preparo as amostras foram adicionadas aos moldes e depois de 24h foram desmoldadas e adicionadas à cura submersa devidamente identificadas, conforme as Fotografia 8 e 9.

Fotografia 8 – Amostras das pastas adicionadas aos moldes



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 9 – Identificação das amostras



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Este procedimento e recomendação foram empregados na análise das pastas, utilizando o método do pó, conforme Cordeiro (2009). Na preparação das amostras para o ensaio propriamente dito, as amostras foram trituradas com almofariz e pistilo em porcelana (Fotografia 10), sendo aplicada uma alíquota da amostra em aproximadamente 1,0 grama do material passante na peneira 0,075mm.

Fotografia 10 – Trituração das amostras com almofariz e pistilo em porcelana



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

3.3 MÉTODO DE ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO

3.3.1 Moldagem de corpos de prova 9cm X 5cm X 7cm (concreto)

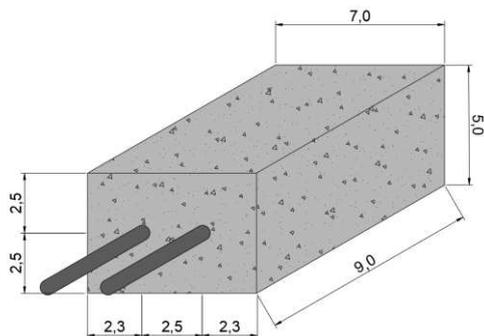
Para análise e avaliação da durabilidade do concreto segue o ensaio após 28 dias de cura submersa. Com o objetivo de verificar a eficiência da substituição parcial das matérias minerais. A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Com vista a obter parâmetros comparativos para a pesquisa, foi realizado um traço. Dividido em 4 famílias as quais se difere, pelo uso da CBCA com percentagens 0%, 10%, 15% e 20% em substituição parcial do cimento. Desta forma, optou-se por dosar o concreto com relação água/cimento (a/c), teor de água/materiais secos ($A\%$) e teor de argamassa (α), mais elevados. Os valores adotados foram: $a/c = 0,55$; $A\% = 10,5$ e $\alpha = 0,5$. Logo, o traço unitário padrão calculado foi 1: 1,5: 2,5: 0,55 em massa para cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente. A partir do traço de referência foram produzidos outros três traços, realizando a substituição parcial de 10%, 15% e 20% do cimento Portland pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar. O adensamento do concreto nas formas prismáticas foi realizado de forma manual através do uso de soquete, realizando 25 golpes em cada uma das três camadas. Após a moldagem os corpos de prova foram armazenados no laboratório da Universidade Católica de Pernambuco (Fotografias 23 e 25), durante o período de cura inicial de 24 horas. Posteriormente foram desmoldados e submetidos à cura úmida por 28 dias. A posição das barras dentro do corpo de prova de concreto é ilustrada na Figura 24.

Figura 23 - Forma prismática (9cm x 5cm x 7cm)



Fonte: Elaboração da autora, (2019)

Figura 24 - Posição das barras no corpo de prova de concreto



Fonte: Elaboração da autora,(2020)

Figura 25 - Corpos-de-prova prismáticos após a moldagem



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

As barras de aço foram pesadas em balança analítica com 0,01g de precisão. Essas barras foram fixadas de uma maneira que essas áreas estariam no centro das amostras de concreto.

3.3.2 Ensaio com o concreto no estado fresco

Para cada traço foi realizado o processo de determinação da consistência do concreto pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump test*), regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). O procedimento consistiu em primeiramente molhar o cone e a chapa metálica e logo após preencher o cone com o concreto em três camadas de igual altura, realizando o

adensamento de cada camada com 25 golpes manuais com uma barra de ferro. Por fim, foi retirado o cone verticalmente e mediu-se o abatimento da amostra, conforme Fotografia 11.

Após a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump test*), conforme Fotografia 11. Seguiu-se para a moldagem dos corpos de prova, tomando como base a NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Em seguida os corpos de prova foram identificados e deixados no laboratório por um período de 24 horas na qual foram desmoldados e submetidos à cura submersa por um período de 28 dias.

Fotografia 11 - Realização do ensaio de abatimento de tronco de cone – Slump Test



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

A Tabela 9 apresenta os valores decorrentes do *Slump test* para os concreto elaborados.

Tabela 9 - Resultados obtidos de Slump Test

Substituição (%)	Slump test (cm)
0% (Referência)	4
CBCA 10%	3
CBCA 15%	2
CBCA 20%	2

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

3.3.3 Semiciclos de secagem e imersão parcial

Os corpos de prova, após secados em ambiente de laboratório por 28 dias, foram submetidos diretamente ao procedimento de indução da penetração de íons cloreto com semiciclos de secagem e imersão parcial em solução de 5% de NaCl. São apresentados na Tabela 10 os semiciclos.

Tabela 10 - Etapas do procedimento de indução da penetração de cloretos

Semiciclo	Duração	Condição
Secagem	1 dia	Estufa
Umedecimento	1 dia	Submerso

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

A condição de umedecimento, foi empregada uma solução contendo cloreto de sódio diluído a 5%. Segundo Cascudo (2000), esse teor é similar ao valor descrito pela literatura para a concentração de NaCl encontrada na água do mar, em torno de 3,5%. Foi colocado um aparato de plástico no fundo do recipiente e o nível da solução do recipiente foi mantido em uma posição que satisfizes parcialmente a altura da área do corpo de prova, conforme mostra a Fotografia 12.

Fotografia 12 - Etapas de umedecimento de indução da penetração de íons cloreto



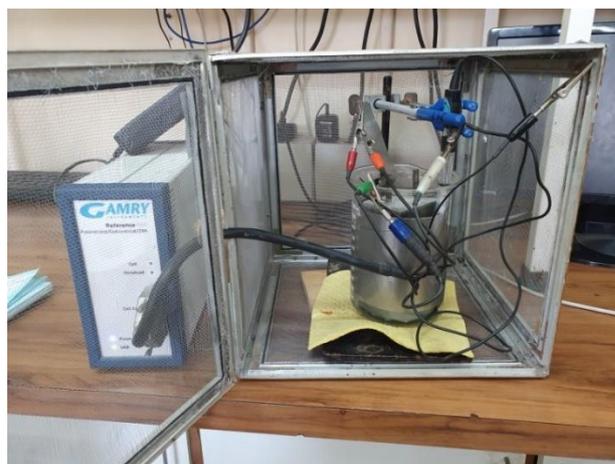
Fonte: Elaboração da autora,(2020)

A condição de secagem consistiu em dispor os corpos de prova em estufa, mantendo-se a temperatura em 60°C.

3.4 MEDIDAS ELETROQUÍMICAS

Para obtenção das medidas eletroquímicas foram utilizadas as técnicas de potencial de corrosão e impedância eletroquímica, através do Potenciostato Gamry, modelo Reference 600, conforme ilustrado na Fotografia 13, utilizado para a obtenção de um controle preciso do potencial eletrodo.

Fotografia 13 – Potenciostato/ Galvanostato/ ZRA modelo Reference 600, marca Gamry



Fonte: Elaboração da autora,(2020)

A velocidade instantânea de corrosão, i_{corr} , foi estabelecida utilizando a expressão conhecida como equação de Stern; Geary (1957), de acordo a Equação (2). As grandezas medidas ao longo do ensaio foram intensidade de corrosão (i_{corr}), potencial de corrosão (E_{corr}) e resistência ôhmica.

O acompanhamento dos valores de i_{corr} no decorrer do ensaio acelerado permitiu a avaliação cinética do processo de corrosão das armaduras, a intensidade de corrosão por ser um dos parâmetros eletroquímicos mais precisos utilizados na fase de iniciação da corrosão. A Tabela 11 demonstra qual o nível de corrosão das armaduras pela obtenção dos dados do i_{corr} analisados nos parâmetros eletroquímicos.

Tabela 11 -Comportamento qualitativo das barras em função da intensidade de corrosão

icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nível de Corrosão
<0.1	Desprezível
0,1 – 0,5	Moderado
0,5 -1	Elevado
>1	Muito Elevado

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

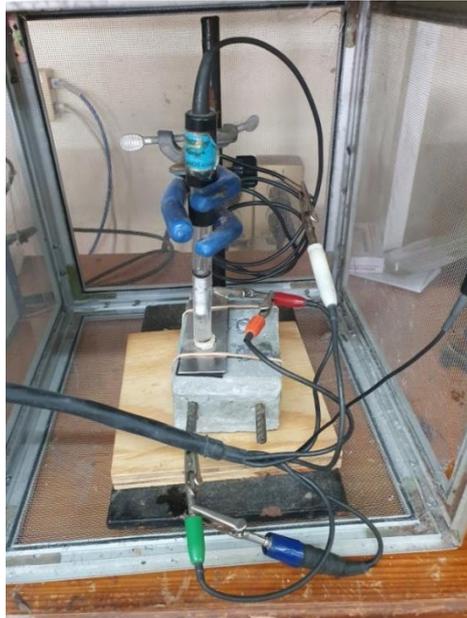
A fase de iniciação da corrosão é identificada quando os valores de icorr ultrapassam a faixa de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, chamada de zona de passivação.

O potencial de corrosão (E_{corr}) pode ser classificado como um indicador do estado de passivação das armaduras. De acordo com a norma ASTM C 876 (2015) associa uma probabilidade inferior a 10% de corrosão para valores de potenciais superiores a -126 mV, em relação ao eletrodo de calomelano saturado.

A resistência ôhmica permite analisar como as alterações das condições de exposição, sobretudo relativas à umidade, interferem na intensidade de corrosão.

A célula foi montada com 3 (três) eletrodos, sendo as barras de aço no interior do concreto eletrodo de trabalho, o eletrodo de calomelano saturado como eletrodo de referência e o contra eletrodo uma chapa retangular de aço inoxidável, conectados ao potenciostato/ galvanostato, e o registro feito pelo software do equipamento Gamry Echem Analyst. A Fotografia 14 demonstra a célula eletroquímica utilizada no estudo. Os fios com pinos azul e verde foram conectados ao eletrodo de trabalho. A conexão do conector de pino azul detecta a tensão do eletrodo de trabalho. A conexão do eletrodo de trabalho verde transporta a corrente da célula. O fio com o pino branco é conectado ao eletrodo de referência da célula. O potencial da célula medido é a diferença de potencial entre os conectores azul e branco. Foi conectado o plugue vermelho ao contador. O terminal do contra eletrodo é a saída do Reference 600 amplificador de potência do potenciostato. O cabo laranja é usado apenas no modo ZRA, onde detecta o potencial do contra eletrodo. O conector de pino preto foi conectado na extremidade da Referência 600 ao Solo Flutuante. Este é o circuito de aterramento para os circuitos analógicos na Referência 600. As conexões foram feitas de forma que o contato do metal não tocou em nenhuma das outras conexões.

Fotografia 14 – Célula eletroquímica



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

O equipamento utilizado na medição do potencial de corrosão consiste em um multímetro (capaz de registrar as medidas de diferença de potencial), um eletrodo de referência e uma esponja de alta condutividade, conforme a Fotografia 15.

Fotografia 15 – Multímetro de alta impedância



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Para obtenção dos resultados da resistividade foi utilizado o equipamento medidor da resistividade, conforme mostra a Fotografia 16.

Fotografia 16 – Equipamento medidor de resistividade- M.C. Miller, modelo 400A



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

3.5 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Segundo Alvarado (2018), a operação do microscópio eletrônico de varredura é baseado na varredura da superfície de uma amostra, usando um feixe de elétrons cujo diâmetro é diminuído por lentes eletromagnéticas. Então o feixe de elétrons interage com a amostra gerando vários tipos de sinais (elétrons secundários, retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, cátodo de luminescência etc.) coletados por um detector específico para cada um deles e produzindo um certo tipo de informação (por exemplo, elétrons secundários fornecem informações sobre o relevo da superfície das amostras).

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu observar a alteração do tamanho de partículas, a visualização da morfologia e identificação de elementos químicos presentes, as amostras foram estudadas após 28 dias de cura. Além disso, foi possível analisar fragmentos de amostras de pastas feitas com a substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI pela CBCA em teores de 0%, 10%, 15% e 20%. As amostras foram presas em um Stub com uma fita de carbono para obtenção das imagens, com o uso de metalização, revestida com fina camada de paládio através do metalizado a fim de torná-las condutoras.

A Microscopia eletrônica de varredura com elétrons retroespalhados (BSE) e análise química por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram efetuadas utilizando o equipamento da marca JEOL, modelo JSM7600F (Fotografia 17), o feixe de elétrons foi gerado a partir de

filamento de tungstênio (W) que aplicou uma tensão de 15kV na amostra para obtenção das imagens. Como infraestrutura auxiliar à preparação de amostras, o laboratório dispõe de um equipamento Quanta Quorum Q150R ES para recobrimento, com ouro ou paládio, de materiais não condutores. As imagens do microscópio foram tiradas em distintos números de aumentos 300, 2.000, 8.000 e 10.000x. Os resultados da morfologia das amostras estão apresentados nas Fotografias 18, 19, 20 e 21.

Todos os ensaios e procedimentos foram realizados no Laboratório de Microestruturas, Cinvestav - IPN na cidade de Mérida no México.

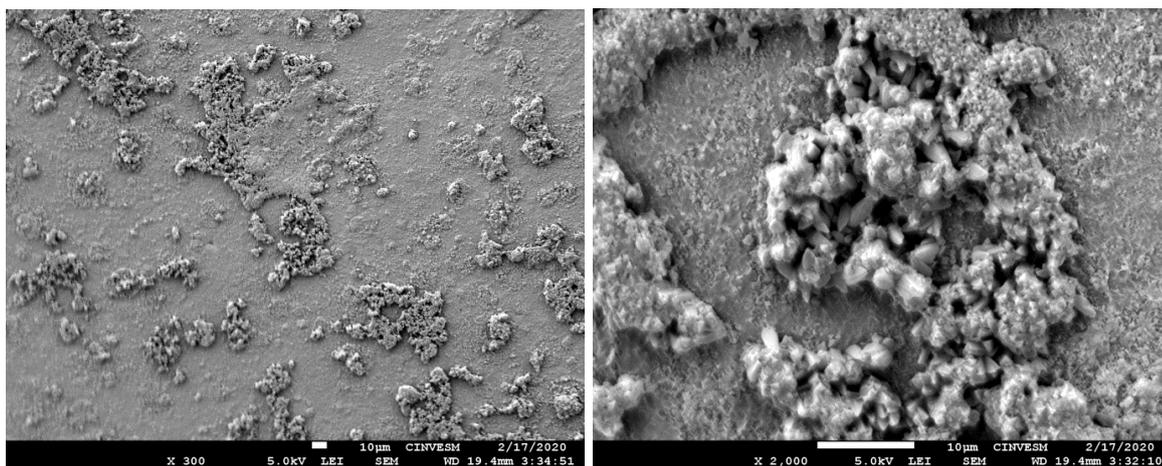
A metodologia detalhada da preparação e execução do ensaio, como também os detalhes dos resultados gerais, estão apresentados no Apêndice A.

Fotografia 17 – Vista geral de um MEV modelo JSM7600F, marca JEOL



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

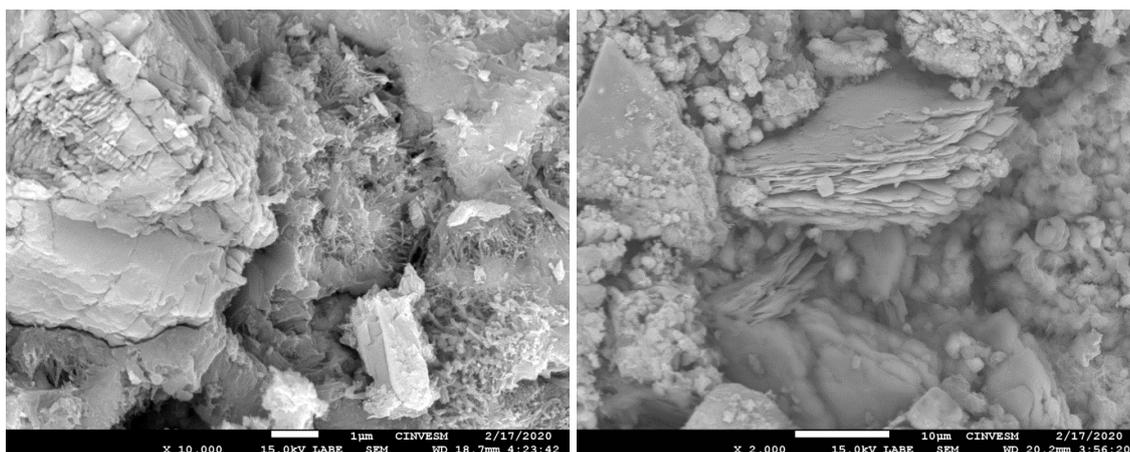
Fotografia 18 – Referência – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (300x, 2.000x e 5kv)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Verifica-se na amostra denominada de amostra de referência (REF) a frequência de aglomerados das partículas, por se tratar de materiais muito finos.

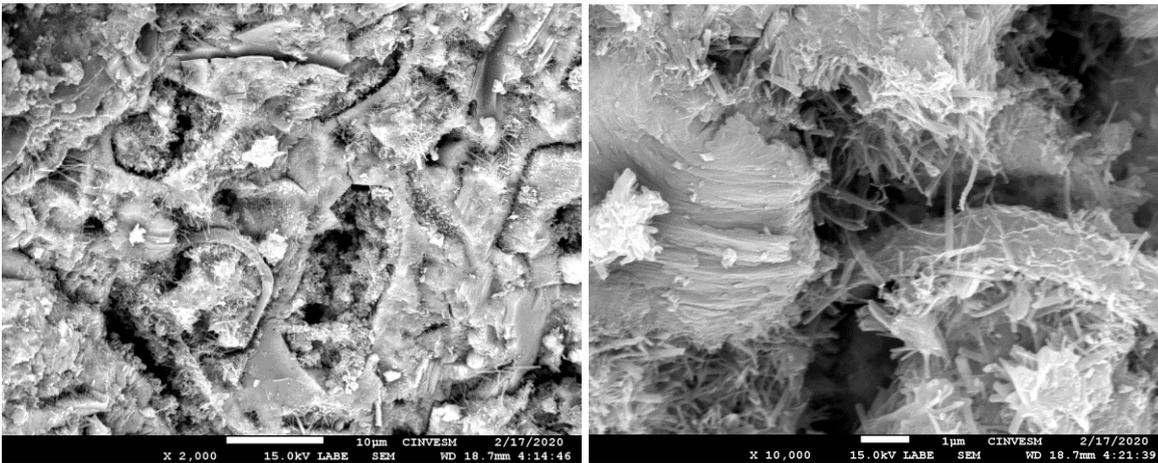
Fotografia 19 – 10% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (10.000x, 2000x e 15kv)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

A amostra com 10% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta formas de partículas irregulares, bastões e lamelares; também são detectadas cavidades (vazios). São observados a presença de gel do tipo C-S-H e partículas de quartzo.

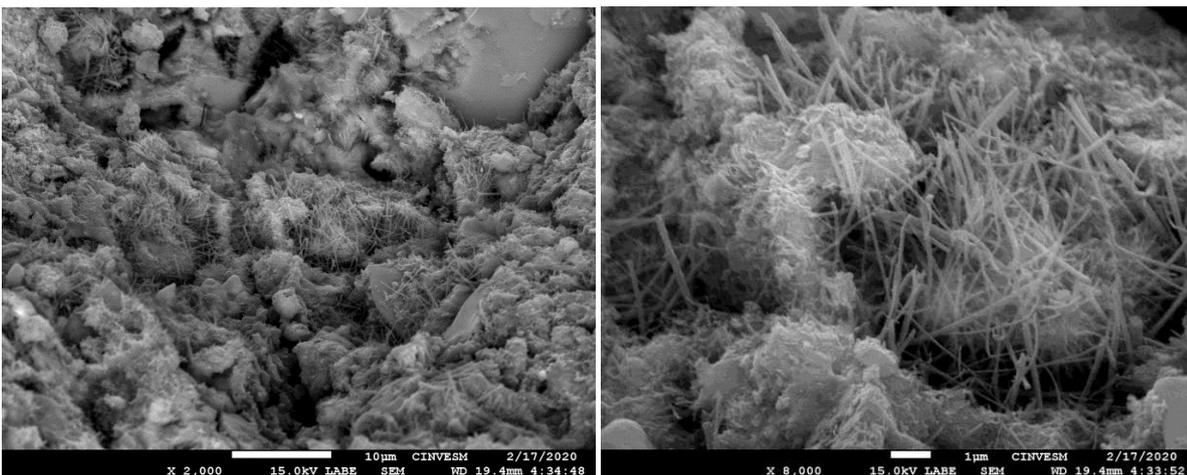
Fotografia 20 – 15% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (2.000x, 10.000x e 15kv)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Na amostra com 15% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar são observados a presença de gel do tipo C-S-H, partículas de quartzo, formação da etringita com suas agulhas.

Fotografia 21 – 20% de CBCA – Microscopia Eletrônica de Varredura com o uso de metalização e magnitude MAG (2000x, 1000x e 15kv)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

As amostras com 20% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar também apresentam formas de partículas irregulares, bastões e lamelares; também são detectadas fibras e cavidades (vazios), semelhante as partículas encontradas por Castaldelli *et al.*, (2016). Observa-se a formação da

etringita com suas agulhas, com uma aproximação de 8000x observa-se também a formação do C-S-H com suas camadas entre as agulhas.

3.6 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A técnica da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, ou simplesmente FTIR, tem como objetivo a determinação dos materiais orgânicos e materiais inorgânicos, porque na grande maioria, todas as espécies moleculares absorvem a radiação infravermelha. O FTIR é utilizado na obtenção de espectros de absorção, emissão, fotocondutividade ou de difração de Raman de infravermelhos de um sólido, líquido ou gás. Detectando todos os comprimentos de onda ao mesmo tempo, recolhendo dados de uma vasta gama espectral, apresentando maior aproveitamento da potência luminosa e melhor precisão do que os instrumentos dispersivos, que mede a intensidade num intervalo estreito de comprimentos de onda (SKOOG, 2006). O FTIR será utilizado para analisar os materiais encontrados na cinza e também determinar os materiais formados na hidratação do cimento com pozolana. O método de funcionamento consiste na absorção a nível molecular de radiação na zona de espectro infravermelho, que produz vibrações e rotações das moléculas. Para absorver radiação infravermelha, uma molécula deve sofrer uma mudança no momento dipolar, que é consequência da vibração ou rotação. Somente nessas circunstâncias que o campo elétrico da radiação pode interagir com a molécula e causar mudanças na amplitude de alguns movimentos (TASHIMA, 2012).

A forma mais precisa de identificação da absorbância solar de uma amostra consiste em medir sua refletância em espectrofotômetro. Esse tipo de análise varre a região espectral relativa ao ultravioleta, visível e infravermelho-próximo, possibilitando escolher as regiões que interessam.

A refletância é uma propriedade física fundamental para se entender o comportamento térmico dos materiais (IKEMATSU, 2007).

De acordo com Dornelles e Roriz (2007), a radiação solar que incide sobre um corpo opaco, uma parcela é absorvida e a outra refletida. O fragmento absorvido é transformado em calor e é proporcional a uma propriedade da superfície do corpo designada absorbância (α). A fração

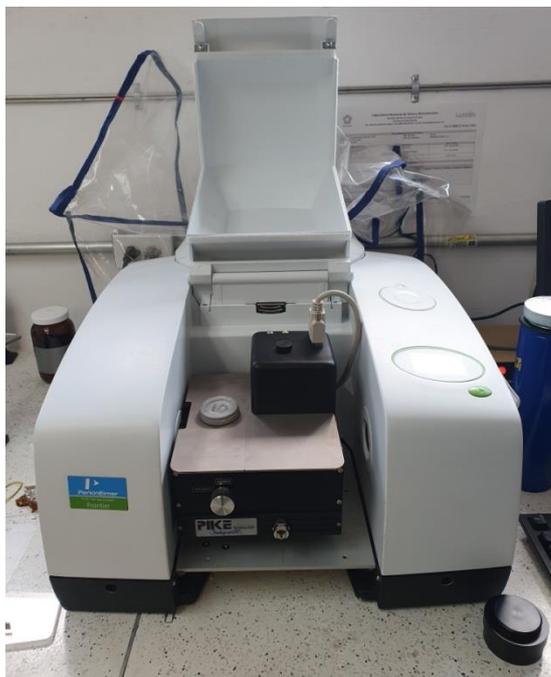
refletida é estabelecida pela refletância (ρ) da superfície. Em corpos opacos, a soma da refletância com a absorvância é igual à unidade, fato que admite definir qualquer uma dessas propriedades a partir da outra.

Avaliando que cada ligação possui uma banda única de adsorção de energia, é possível observar a composição e estrutura dos grupos funcionais, verificando a posição, o comprimento e a intensidade de absorção dos picos característicos do CBCA.

Para o ensaio, foram confeccionadas amostras do material em forma de pastilhas de 4,5 cm de diâmetro. As proporções dos materiais utilizados na produção das amostras para esta análise são apresentadas na Tabela 8.

O equipamento utilizado foi da marca PerkinElmer, modelo IR/FIR, disponível no laboratório de Espectroscopia óptica e térmica, Cinvestav - IPN na cidade de Mérida no México, conforme a Fotografia 22.

Fotografia 22 – Espectrofotômetro, modelo Frontier IR/FIR, marca PerkinElmer



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Constam as análises e os resultados encontrados, bem como, discussão importantes sobre a pesquisa.

4.1 TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A partir dos difratogramas obtidos foi possível identificar os minerais presentes nas amostras em estudo de forma qualitativa. No difratograma, verificam-se picos com diversas intensidades, referentes a diferentes planos cristalinos. O gráfico difratograma pode ser adquirido incidindo feixe em ângulos variáveis em uma amostra na forma de pó e colocando as intensidades em função do ângulo entre a onda incidente e a onda espalhada (ângulo de espalhamento 2θ).

As intensidades são calculadas dando importância a diversos aspectos físicos que estão presentes nas células unitárias BLEICHER e SASAKI (2000) e as disposições dos picos característicos dos minerais é uma função das dimensões dessa célula unitária LANGFORDY e LOUË (1996). As demais análises com todos os materiais utilizados na pesquisa (CBCA e CPV - ARI) encontram-se descritos no Apêndice A.

O método foi empregado na caracterização mineralógica da CBCA, do cimento Portland CPV – ARI, das pastas de referência (sem CBCA) e nas pastas contendo teores de 10%, 15% e 20%. Estas amostras foram analisadas após 28 dias de cura submersa por meio de difratometria de raios-X.

Nos resultados obtidos por DRX foi possível observar picos de sílica em formas de quartzo (PDF 00-046-1045), cristobalita (PDF 00-039-1425) e merrilite (PDF 01-084-7025). Também foi observado óxido em sua forma hematita (PDF 00-033-0664), além disso silicato de alumínio e potássio (PDF 00-046-0741).

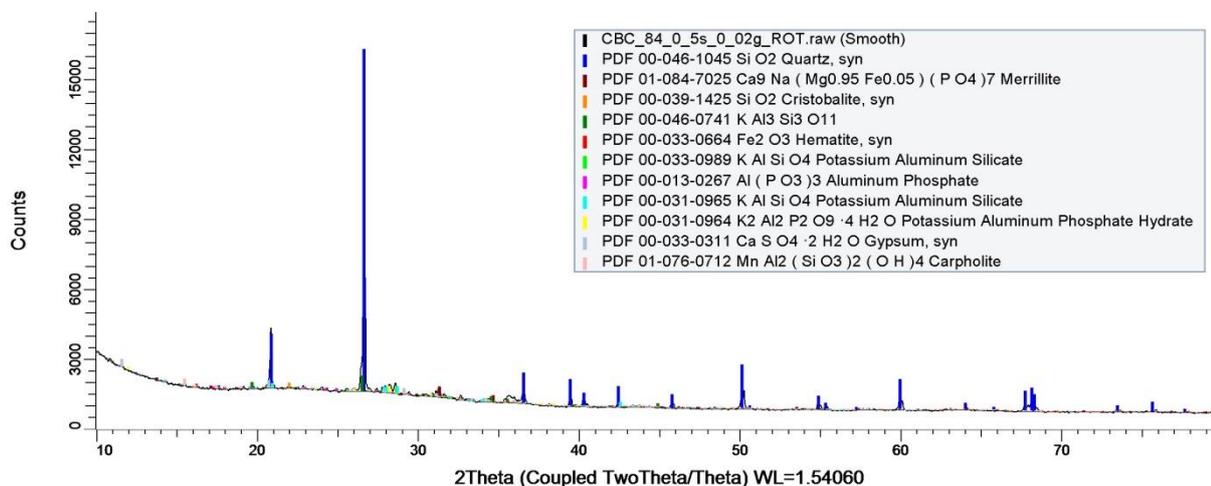
Verifica-se a presença de picos relativo principalmente a quartzo, devido a traços de minerais provenientes dos agregados, que não foram isolados da pasta de cimento, mesmo após peneiramento em peneira de abertura de 75 μm . O aparecimento desses minerais nas amostras resultou em picos de grande intensidade, que prejudicaram a visualização de outras fases de hidratação do cimento, além de ser inerte e não apresentar reatividade, em termos de atividade pozolânica. Entretanto, não se pode afirmar que não há presença de sílica amorfa nas amostras,

pois são de difícil detecção pelo difratômetro, principalmente quando estão presentes em pequenas quantidades. Tais resultados também foram observados pelos autores Cociña *et al.*, (2009) e Paiva (2016), que encontraram sílica cristalina e elevada quantidade de carbono, porém a CBCA demonstrou elevada atividade pozolânica na análise termogravimétrica, então sugere-se a realização complementar de análise termogravimétrica. Apesar disso, vale ressaltar que é necessária a identificação e quantificação das estruturas através de análises de DRX quantitativas pelo método de Rietveld.

A presença de óxido de silício (SiO_2) na forma de quartzo pode ser concedida a vários fatores, entre eles: a) contaminação do bagaço que fica exposto no pátio da usina; b) contaminação durante o corte da cana-de-açúcar, pois nem todo bagaço entra na fornalha após processo de moagem, ficando o excesso a céu aberto aguardando o seu retorno à queima; c) contaminação devido a intempéries.

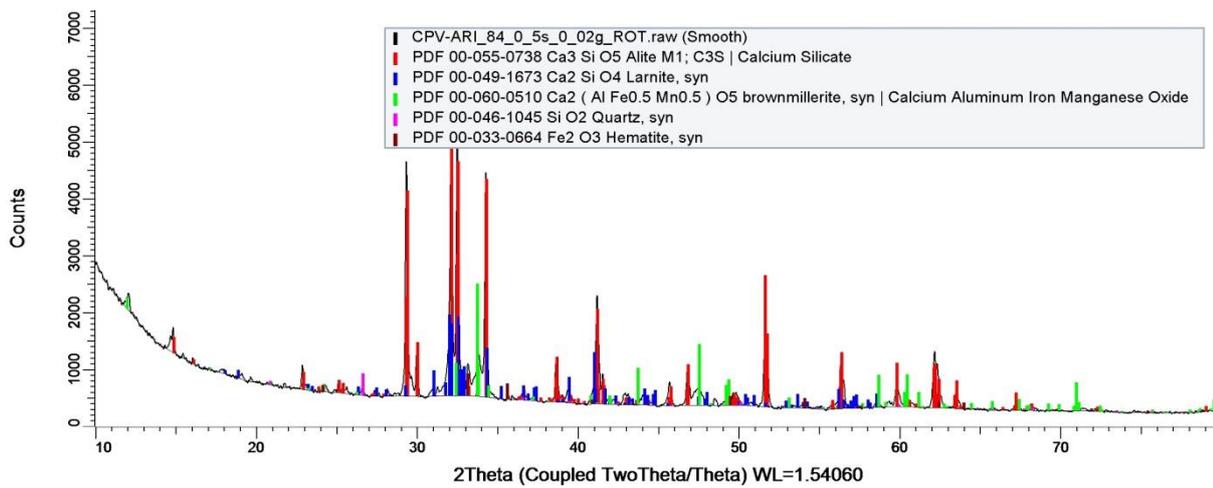
A Figura 26 mostra o difratograma da cinza do bagaço de cana-de-açúcar oriunda da usina, na Figura 27 mostra o difratograma do cimento CPV – ARI e as Figuras 28 a 31 mostram os difratogramas com teores de 0%, 10%, 15% e 20%.

Figura 26 - Difratograma da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)



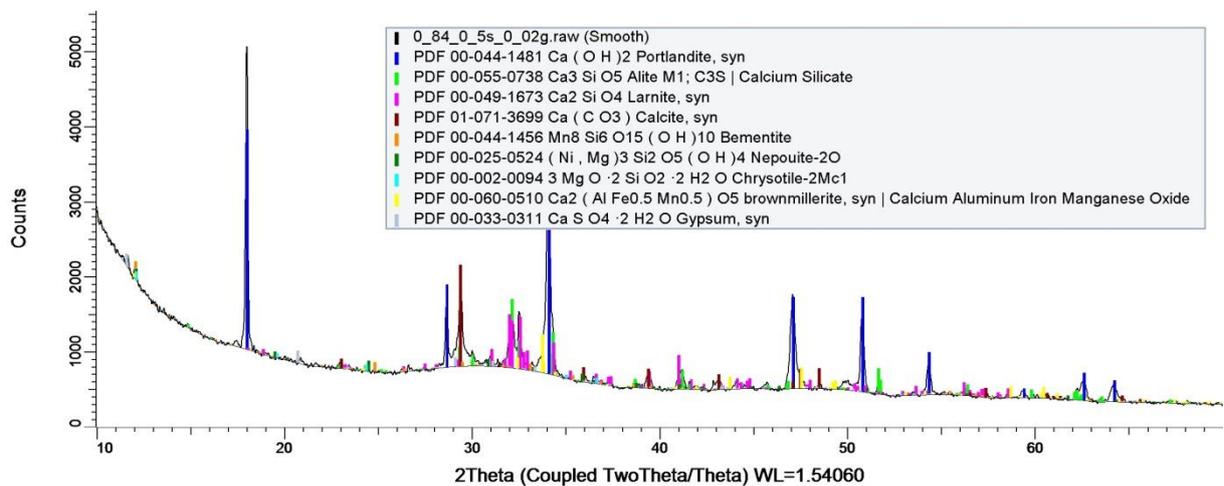
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 27 - Difratoograma do cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI)



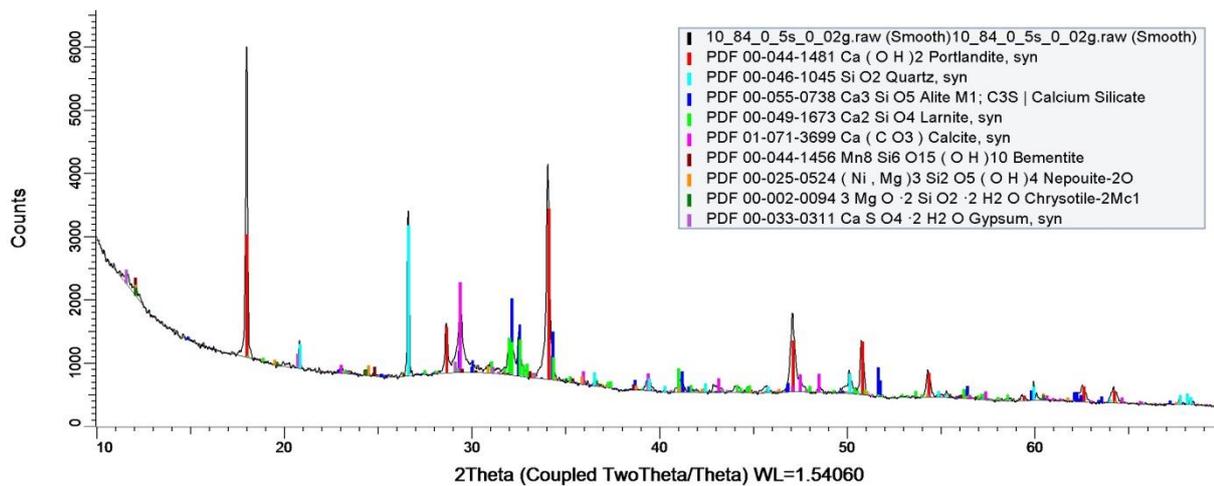
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 28 - Difratoograma da amostra de argamassa com 0% de CBCA



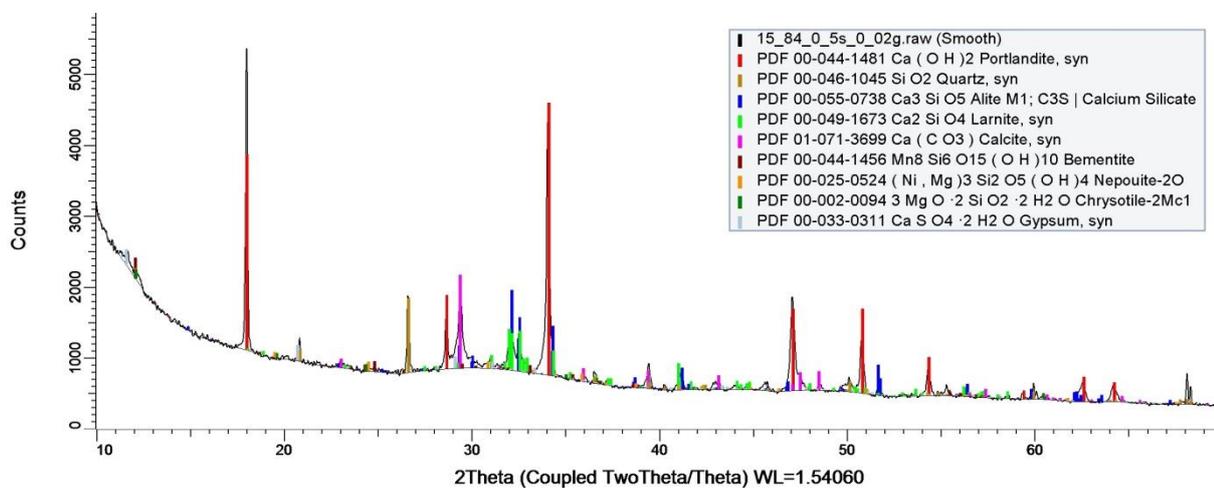
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 29 - Difratoograma da amostra de argamassa com 10% de CBCA



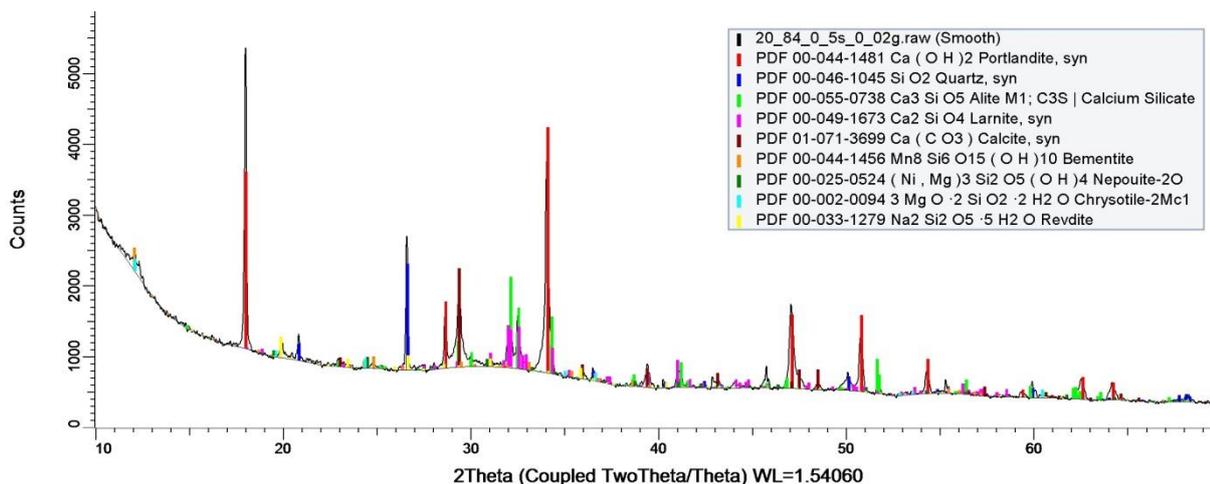
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 30 - Difratoograma da amostra de argamassa com 15% de CBCA



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 31 - Difratoograma da amostra de argamassa com 20% de CBCA



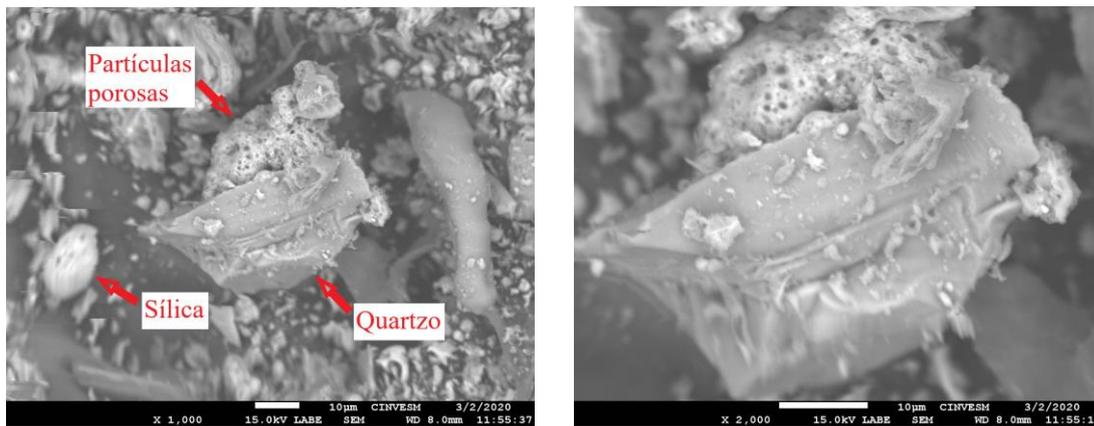
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

4.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

4.2.1 Análise por microscopia eletrônica de varredura – detector SE

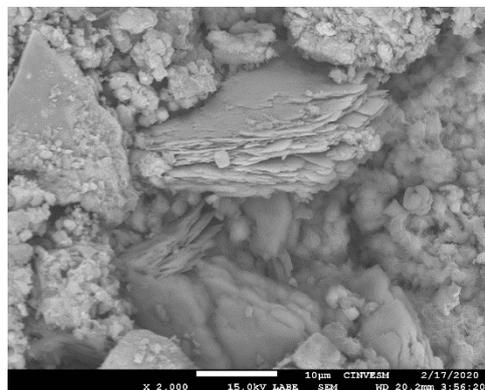
Nas análises por microscopia eletrônica de varredura, utilizando o detector secundário SE para as amostras de referências foi observado a formação de todas as fases. A Fotografia 23 com ampliação de 1000x permite a visualização de partículas características de quartzo presentes na cinza, o que confirma a presença de areia na cinza. Quanto a sílica presente na cinza, a mesma apresenta grãos arredondados e de tamanhos variados, ocorrência confirmada pelo EDS (Energy Dispersive X-Ray Detector), conforme Fotografia 24. De acordo com a Fotografia 25 e 26 é observado a formação da etringita com suas agulhas, com uma ampliação de 8000x observa-se a formação do C-S-H com suas camadas entre as agulhas.

Fotografia 23 - Detalhe da presença de partículas de quartzo na cinza (CBCA)



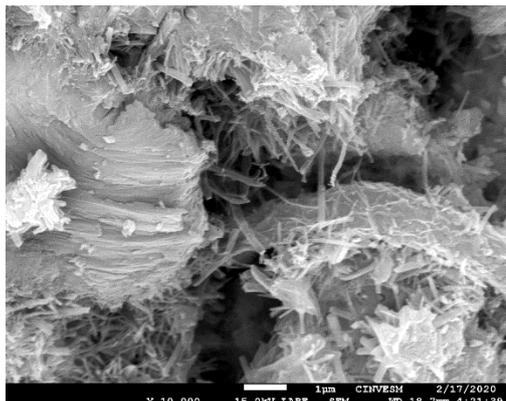
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 24 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 10%



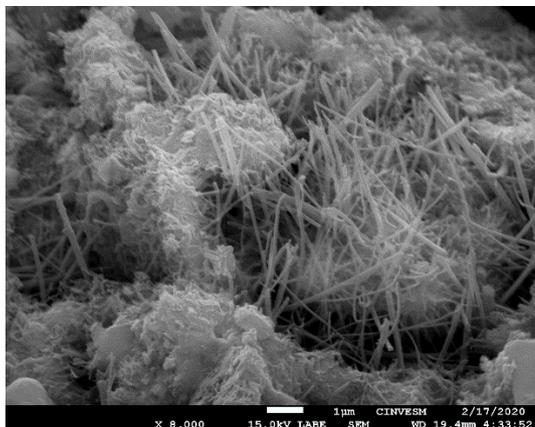
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 25 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 15%



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 26 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 20%



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

4.2.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura – detector EDS

Com a finalidade de identificar pontualmente os elementos presentes, foram feitas análises pontuais por um detector de espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Uma informação pertinente da técnica de microanálise por EDS é o cálculo das relações Ca/Si , Al/Ca , $\text{Ca}/(\text{Si} + \text{Al})$, $(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca}$ e S/Ca para o reconhecimento das fases: anidra, CH, C-S-H, matriz, escória, Aft, Afm. De acordo com a microanálise da fase C-S-H, a relação de Ca/Si pode variar, conforme relação a/c ou adições minerais ao concreto Sarkar et. al. (2000).

Uma das relações utilizadas para identificação da fase C-S-H é a razão molar Ca/Si (seu fundamento foi representado no Item 2.12.1).

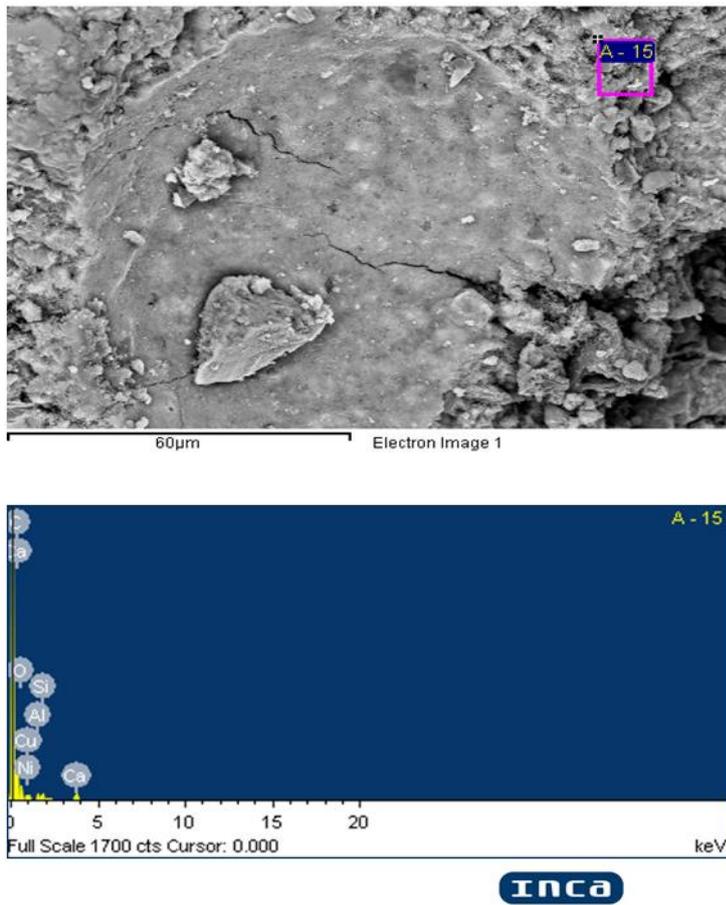
Para as amostras de 15% foi realizada a microanálise por EDS de acordo com a Fotografia 27 e 28, na qual foram identificados os elementos químicos pertencentes a fase silicato de cálcio hidratado C-S-H, com uma relação Ca/Si igual a 1,516, a qual está dentro da faixa comumente encontrada no gel C-S-H.

Para as amostras com 20% da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição do cimento, foi realizada a microanálise por detectores de elétrons retroespalhados, de acordo com a Fotografia 28, quando foram identificados todos os elementos químicos pertencentes a fase silicato de cálcio hidratado C-S-H, com uma relação Ca/Si igual a 1,815. Diante desse dado relevante e da técnica de microanálise por EDS, observamos a presença desses elementos químicos predominantemente, principais elementos compostos da fase do C-S-H, podendo assim concluir que as amostras com CBCA em substituição ao cimento Portland em teores de 15% e 20% apresentaram formações de C-S-H bastante representativas em relação as amostras de referências.

Os resultados da análise revelam a presença de Si, Ca, Al, C e O como principais elementos. Diante deste dado relevante e da técnica de microanálise por detectores de elétrons retroespalhados (EDS), observamos que a CBCA teve predominância de formas irregulares em tamanhos variados, tendo essa tendência sido observada por Deer *et al.*, (1992) em sua pesquisa relatando que a sílica é responsável por as cinzas proporcionarem estruturas diferentes, designando polimorfismo, e essa característica é devido possivelmente a presença de quartzo, tridimita e cristobalita. No EDS da cinza apresenta uma elevada quantidade de carbono, que conforme o estudo de Izidoro *et al.*, (2012), esse alto teor de carbono não queimado contribuem com grandes valores de perda por ignição e alta área superficial, aumentando a capacidade de adsorção do material. Desta forma, os resultados sugerem que o teor de carbono depende da temperatura de queima, mas o tamanho das partículas não é afetado, então cabe um estudo mais profundo visando a modificação física ou química das cinzas como a moagem e a calcinação e assim acurar suas propriedades e ampliar a utilização.

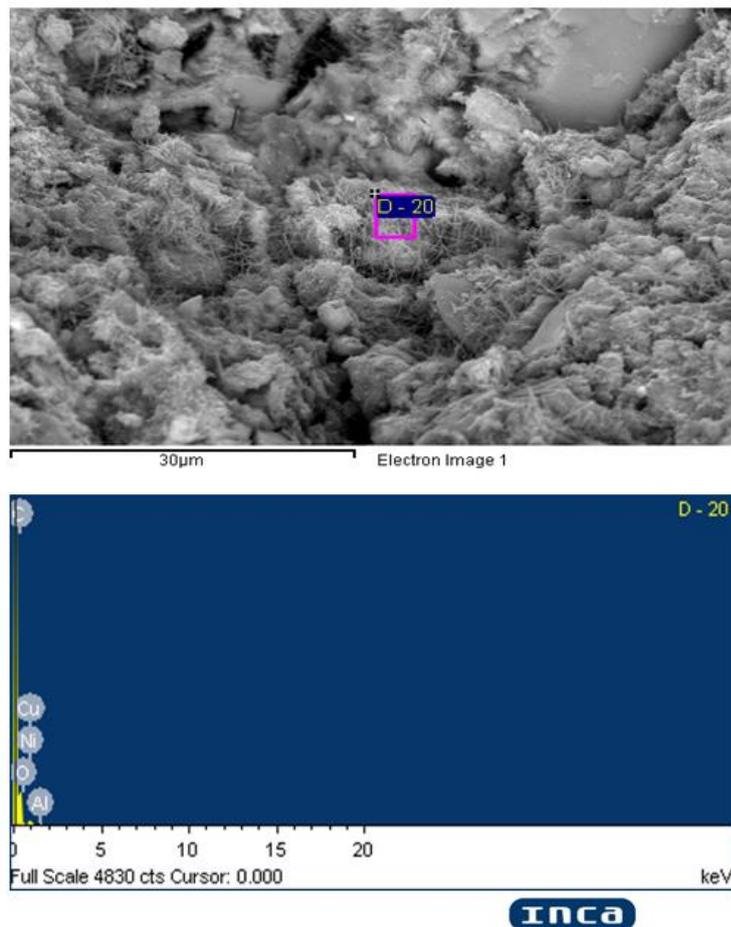
Os demais resultados com todas as amostras de concreto com 0%, 10%, 15% e 20% de substituição estão apresentados no Apêndice A.

Fotografia 27 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 15%



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 28 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 20%



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

4.3 POTENCIAL DE CORROSÃO (E_{corr})

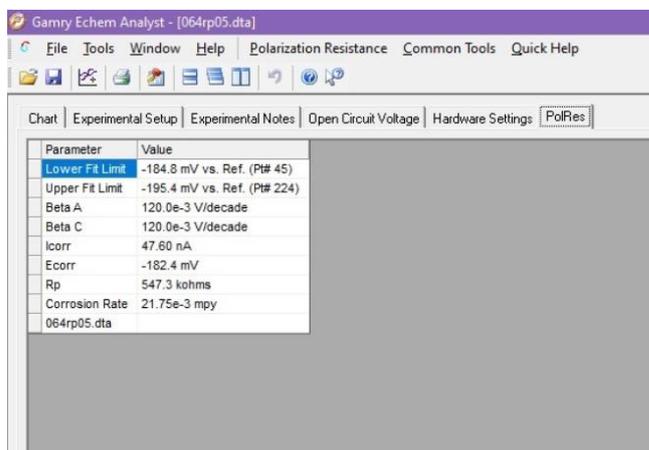
A norma C 876 (ASTM, 2015) expõe uma correlação entre um eletrodo de referência de Cu/SO_4Cu , intervalos de potencial e probabilidade de ocorrência de corrosão. Uma das vantagens dessa técnica é que pode utilizá-la em pequenos corpos-de-prova ou em estruturas que possuem grandes dimensões. A técnica do potencial de corrosão traz um resultado qualitativo junto ao pH que indica a garantia da durabilidade e/ou condições de vulnerabilidade do concreto em função a corrosão das barras de aço.

A resistência à polarização corrobora os resultados obtidos por medidas de E_{corr} , onde os

corpos de prova mostram um aumento na resistência à polarização nas incorporações de 15% e 20% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland.

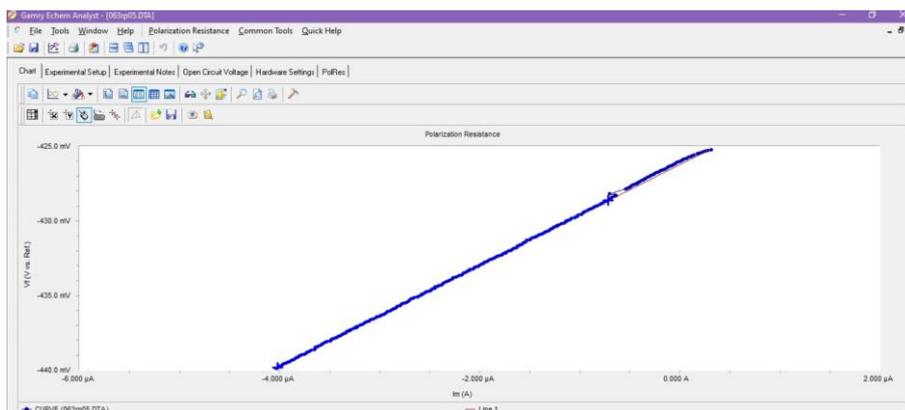
As determinações do E_{corr} (potencial de corrosão) e R_p (resistência de polarização) foram obtidos pelo software Gamry Echem Analyst, conforme ilustram as Figuras 32 a 35.

Figura 32 - Comportamento da barra 63 - úmido



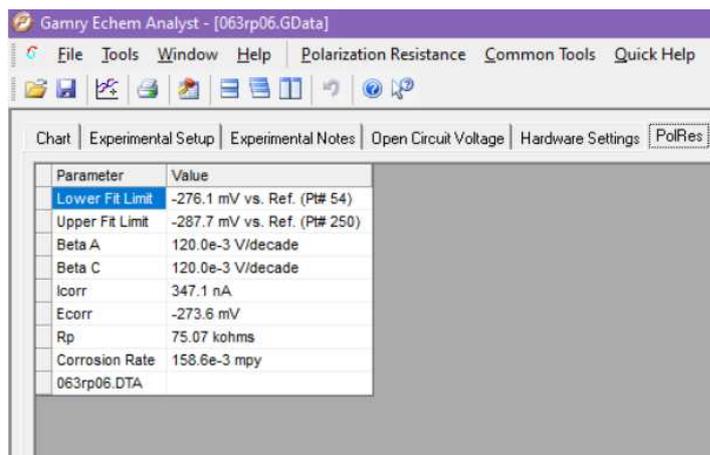
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 33 - Curva de polarização do eletrodo de trabalho 63 - úmido



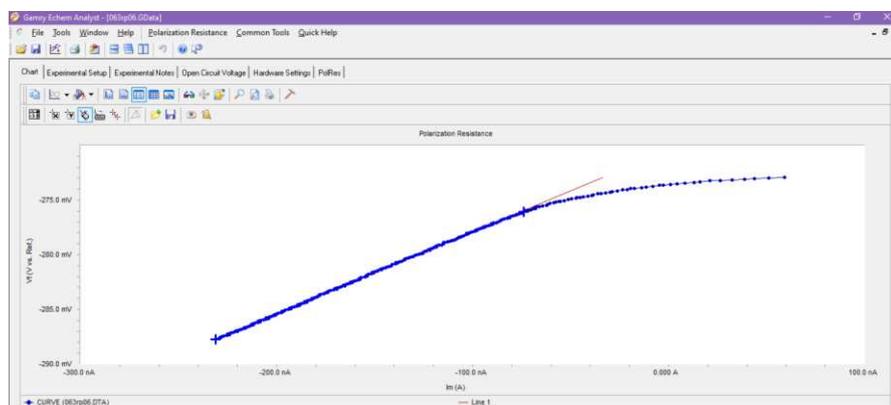
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 34 - Comportamento da barra 63 - seco



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

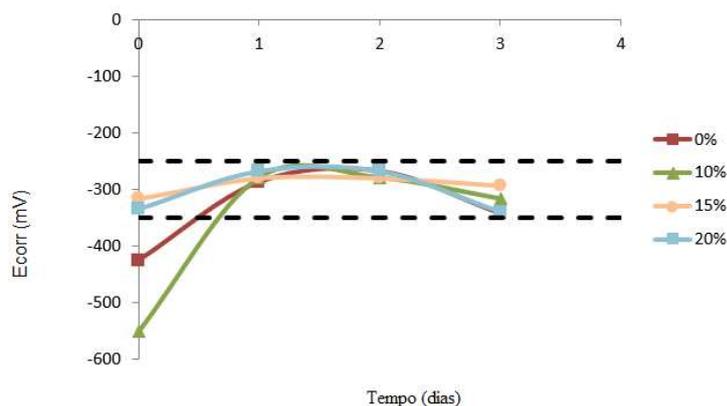
Figura 35 - Curva de polarização do eletrodo de trabalho 63 - seco



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

A Figura 36 ilustra o potencial de corrosão para os corpos de prova com a incorporação de 0, 10%, 15% e 20% da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland.

Figura 36 - Gráfico do potencial de corrosão em função do tempo



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

O traço de referência teve uma melhor trabalhabilidade, adensamento e menor índice de vazios, ou seja, a relação água/cimento foi considerada ideal tanto para o traço sem nenhuma substituição, tanto para o traço com 15% e de 20% contendo (CBCA).

Identifica-se que na família com cinza do bagaço de cana-de-açúcar com 10% a última medida do potencial de corrosão aos 15 dias, alcançou valores mais negativos tendo a probabilidade de 90% de corrosão, porém os inícios das leituras apresentam o início da despassivação das armaduras com valores de -650mV . O resultado de sua última medição, foi tangível aos corpos-de-prova de referência, indicando um valor de -400 mV aproximadamente, encontrando-se na faixa de corrosão ativa. No decorrer do ensaio, pode-se observar que os valores dos potenciais de corrosão acabam convergindo para valores próximos entre -350mV e -430mV , a família que obteve um comportamento regular na condição de corrosão ativa foi a de 15%.

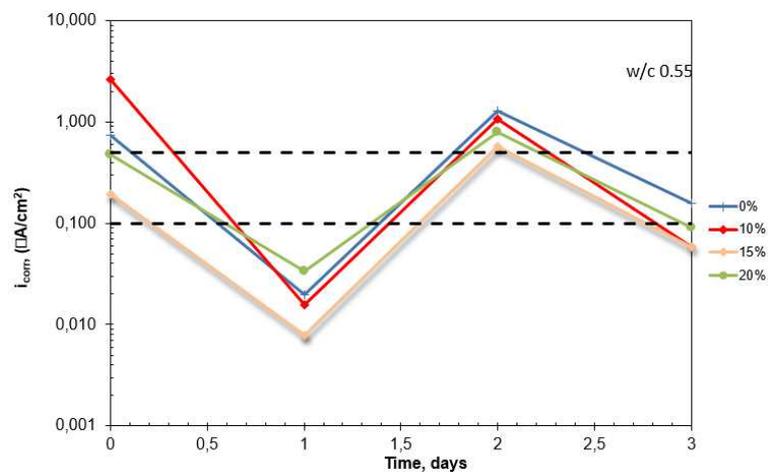
Para tanto, os resultados mostram que os corpos de prova com 20% de (CBCA) na composição matricial do concreto apresentam valores mais eletronegativos na leitura do potencial de corrosão na evolução do ensaio de indução de íons cloreto sendo este -430 mV , aproximadamente. Concluindo que o concreto produzido com CBCA em substituição parcial do cimento Portland atingiu valores mais negativos de potencial de corrosão ao longo do tempo, proporcionando uma condição mais favorável à corrosão. O procedimento detalhado do preparo e execução do ensaio, bem como os detalhes das curvas de polarização de todos os eletrodos de trabalho, estão apresentados no Apêndice A.

4.4 INTENSIDADE DE CORROSÃO (I_{corr})

A técnica permitiu estimar a velocidade instantânea de corrosão em casa momento do ensaio, o que nos leva à intensidade de corrosão total através da integração da curva de i_{corr} x tempo.

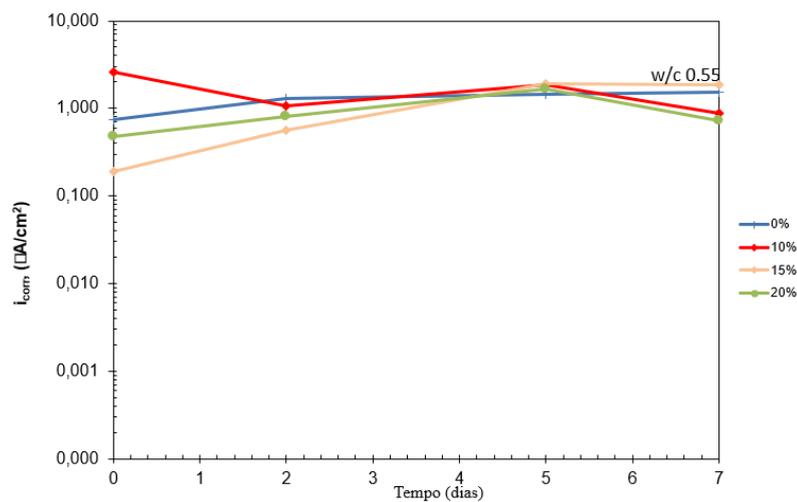
A Figura 37 demonstra os resultados da intensidade da corrosão para os corpos de prova com a incorporação de 0, 10, 15 e 20% da cinza em função da relação água/cimento e do tipo de cimento utilizado. Foi possível observar que os valores de potencial de corrosão tornaram-se mais eletronegativos quando estavam úmidos, confirmando a tendência mostrada nos valores encontradas de intensidade de corrosão.

Figura 37 - Gráfico ilustrando a intensidade de corrosão em função do tempo



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

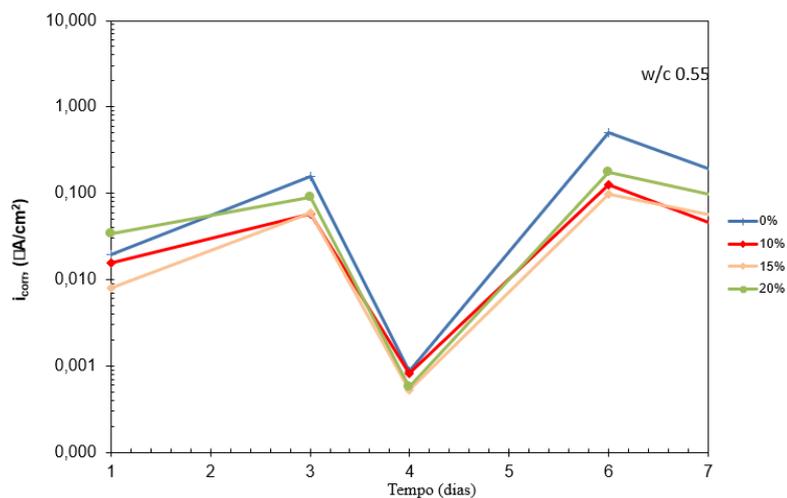
Figura 38 - Gráfico ilustrando a intensidade de corrosão em função do tempo, dos corpos de prova úmidos



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Na Figura 38, podemos identificar que no início do ensaio apenas o corpo de prova com 15% não tinha uma corrosão significativa, porém, todos os outros já poderiam se identificar uma possível corrosão. Ao término do ensaio, a família com 20% apresentava um resultado mais satisfatório, em conformidade com o ensaio anterior.

Figura 39 - Gráfico ilustrando a intensidade de corrosão em função do tempo, dos corpos de prova secos



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Já com os corpos de provas secos, apenas as amostras de referência mostraram um início de corrosão na terceira medida, como mostra a Figura 39.

Tendo em vista que para viabilizar o emprego da cinza do bagaço de cana-de-açúcar ela deve ser viável economicamente, foi elaborado um levantamento de custos dos materiais na região, buscando um denominador comum entre a aplicação de 15% do resíduo industrial e o custo do produto. Foi utilizado o mesmo traço dos corpos de prova 1:1,5:2,5 (cimento, areia, brita) com relação água/cimento de 0,55. A Tabela 12 e 13 apresentam os preços dos insumos utilizados na análise de 1m³ de concreto 30 MPa sem CBCA e com CBCA.

Tabela 12 - Custo dos insumos de 1m³ de concreto 30 MPa sem CBCA

Material	Kg	Valor Unitário	Valor Total
Cimento	220	R\$ 0,48	R\$ 105,00
Brita 0	550	R\$ 0,50	R\$ 275,00
Areia média	330	R\$ 0,35	R\$ 115,50
Água	121	R\$ 0,0064	R\$ 0,7744
Total			R\$ 496,87

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Tabela 13 - Custo dos insumos de 1m³ de concreto 30MPa com CBCA

Material	Kg	Valor Unitário	Valor Total
Cimento	187	R\$ 0,48	R\$ 89,76
CBCA (15%)	33	R\$ 0,0442	R\$ 1,4586
Brita 0	550	R\$ 0,50	R\$ 275,00
Areia média	330	R\$ 0,35	R\$ 115,50
Água	121	R\$ 0,0064	R\$ 0,7744
Total			R\$ 482,49

Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Para a análise da viabilidade econômica, foi adotado a família que apresentou no decorrer do estudo o resultado mais favorável, podendo arbitrar dessa forma uma redução de custo por 1m³ de concreto produzido com a CBCA em substituição parcial do cimento Portland. Nas composições apresentadas nas Tabelas 12 e 13 foram utilizados os preços de insumos disponíveis na tabela SINAPI-PE, sem desoneração do mês de dezembro/2020 no intuito de fazer uma análise mais aprimorada das composições de serviços. A CBCA é fornecida gratuitamente pela usina, sendo considerado, portanto, apenas o custo referente ao transporte e manuseio deste material.

Observando as Tabelas 12 e 13 o custo para produzir 1m^3 de concreto sem a cinza do bagaço de cana-de-açúcar é de 21,25% referente ao valor de cimento e o custo com a cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi de 18,60%, mostrando que o custo frente ao traço de referência foi de R\$496,87. Dessa forma, ao analisar os valores das composições das tabelas citadas, foi constatado uma redução de 2,89%, com a substituição de cinza proposta.

4.5 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

O estudo dos espectros presentes no FTIR, por comparação com bancos de dados específicos permitiu determinar o nível de cristalinidade, ou seja, se um composto é cristalino, amorfo ou se apresenta as duas fases. A análise das amostras produzidas com diferentes porcentagens de cinza do bagaço de cana-de-açúcar é ilustrada nos gráficos das Fotografias 29 e 30. Quatro espectros são mostrados nestas fotografias: o primeiro é a amostra de referência sem substituição parcial 0%, enquanto no segundo, terceiro e quarto a cinza é utilizada como substituição parcial do cimento em proporções de 10%, 15% e 20%.

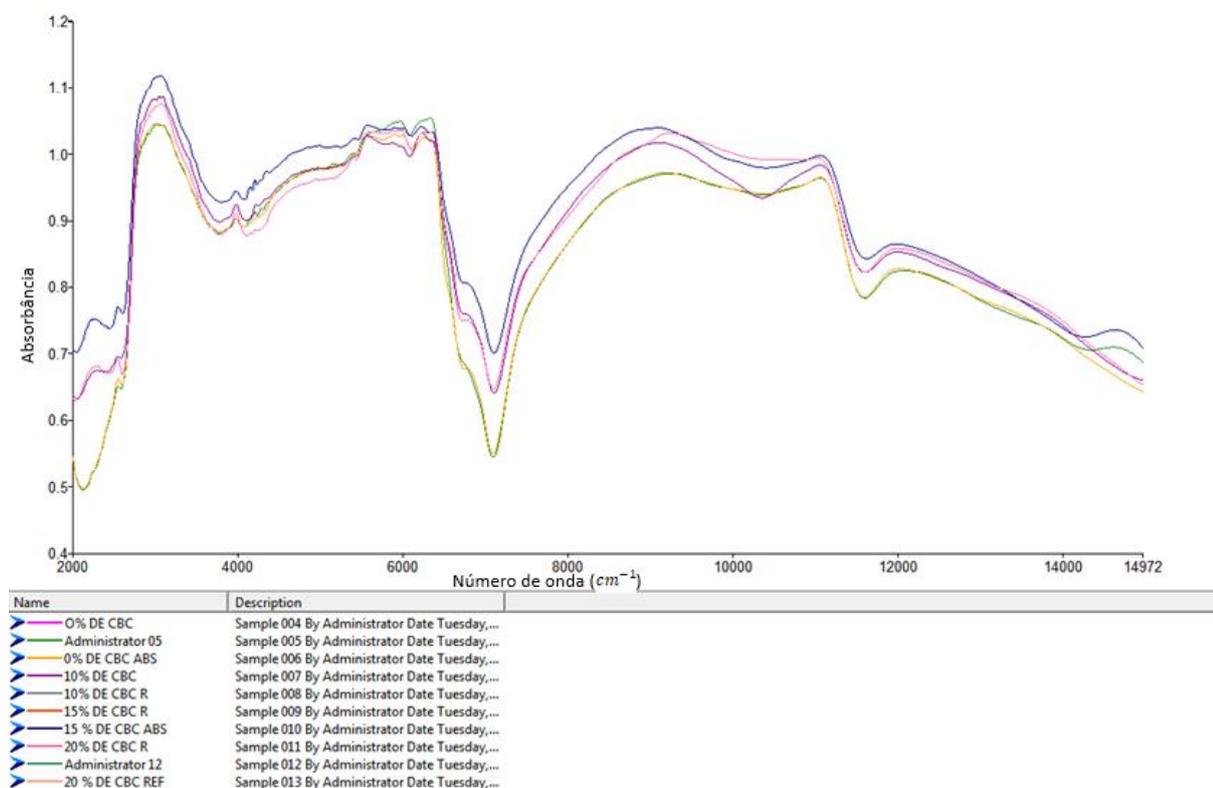
Uma molécula com simetria significa que os átomos estão arranjados em sua rede cristalina em uma forma simétrica, seguindo uma ordem contínua. Desta forma considera-se que o material apresenta um alto grau de cristalinidade. Por outro lado, um composto cristalino pode apresentar vibrações simétricas e assimétricas, porém sempre em um número de onda específico. A molécula assimétrica proporciona um alto grau de desordem em sua rede, sendo então classificada como material amorfo (MANSANEIRA, 2010).

Na interpretação dos espectros de FTIR a Figura 25 mostra absorção da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na zona vibracional de 2000 a 14972 cm^{-1} . A presença dos picos entre 3000 e 3500 cm^{-1} são carbonos ligados a oxigênios, enquanto as vibrações da ligação com a sílica (Si-H) está em torno de 2000 cm^{-1} , resultados esses que apresentam concordância no trabalho (MORAES, 2017). De acordo com a Fotografia 29 uma série de picos podem ser detectados, por volta de 7000 cm^{-1} é observada uma banda que pode corresponder as vibrações de valência de tetraedros de SiO_4 da ligação (O-Si-O), as bandas em torno por de 6500 cm^{-1} e 7500 cm^{-1} sofreram um estreitamento o que pode ser atribuído a uma maior organização da rede, onde a estrutura passa a ter comportamento de rede cristalina característica de SiO_2 , por volta de

11500cm^{-1} são observados picos não muito intensos, que podem ser produzidos devido às vibrações do grupo silanol (Si-OH).

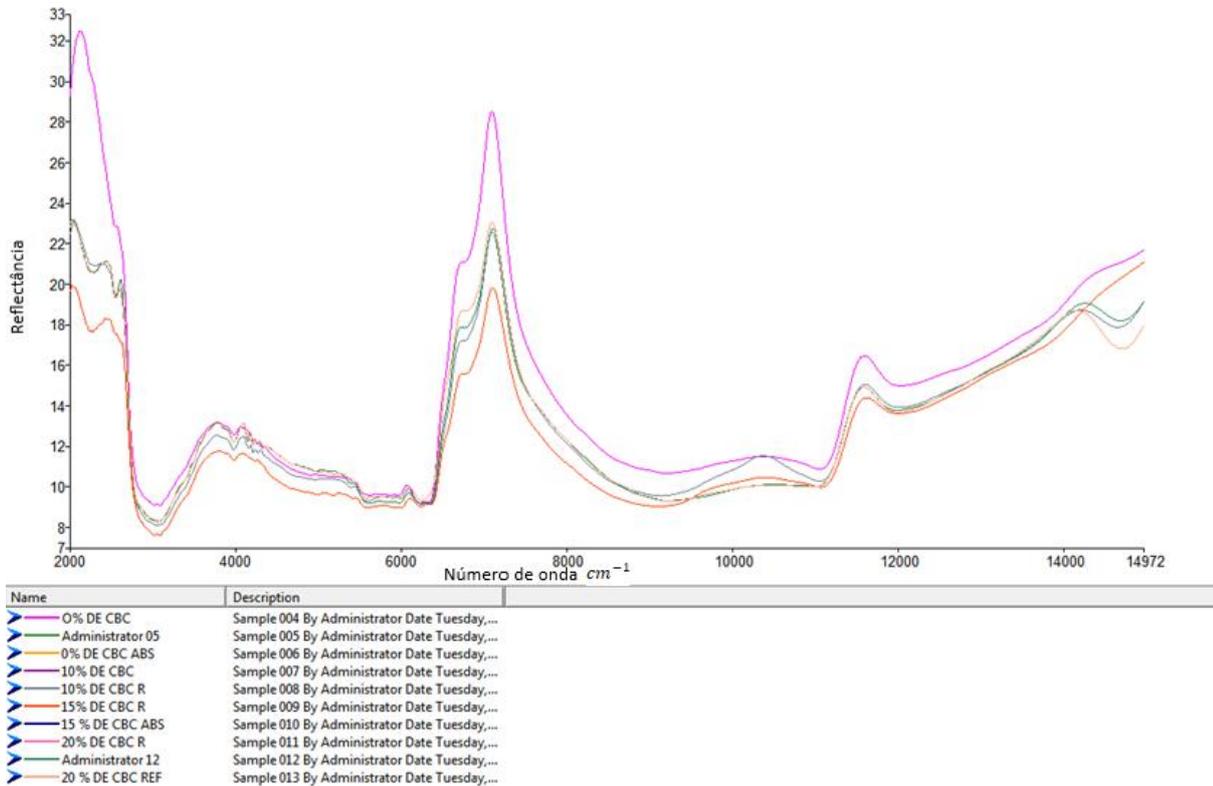
Segundo Charles & William (2001), a diferença nas magnitudes pode ser influenciada pela diferença do tamanho das partículas dos diferentes substratos, visto que a intensidade dos picos aumenta com a diminuição do tamanho das partículas. A composição química é variada e sua origem pode ser dada, entre outros fatores, pela mineralogia do solo onde a cana-de-açúcar foi plantada. Os principais elementos presentes na estrutura química são silício, cálcio, ferro, potássio e alumínio.

Fotografia 29 – Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 0%, 10%, 15% e 20% de CBCA – absorbância



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 30 – Gráfico da análise de FTIR dos corpos de prova produzidos com 0%, 10%, 15% e 20% de CBCA – reflectância



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

4.6 ANÁLISE DA ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE CUSTO

A redução de custo por m^3 de concreto utilizando a família produzida com 15% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland foi de 2,89%, o uso da CBCA não diminuiu significativamente o valor final do m^3 do concreto, por se tratar de uma pequena quantidade de material, porém se for levado em consideração o uso em grande escala, o concreto utilizado com a CBCA seria mais viável economicamente do que o concreto sem a cinza.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Perante as análises e resultados, serão expostas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Perante todas as análises e resultados expressos, é admissível chegar as seguintes conclusões:

Sob o ponto de vista ecológico, as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar foram apresentadas como uma opção viável tecnicamente para a fabricação de cimento ou concreto, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental gerado na construção civil da inclusão de produtos, como os resíduos em questão, criando iniciativas sustentáveis.

A diminuição do consumo de cimento não tem apenas finalidade de garantir maior duração das jazidas que fornecem matérias-primas para a produção do cimento ou redução dos impactos ambientais provenientes da exploração destas jazidas e da emissão de CO₂. O uso reduzido de cimento, ou melhor, de clínquer, é também vantajoso sob alguns pontos de vista técnicos.

É relevante evidenciar que as amostras CBCA não tiveram nenhum tipo de beneficiamento, além de serem expostas ao sol ficando completamente secas e peneiradas, na peneira de abertura 0,075mm, portanto, diante dos resultados adquiridos, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar pode ser considerada como um material que tem baixa pozolanicidade. Tornando-se possível a sua aplicação como material pozolânico, mas com determinados beneficiamentos, como por exemplo uma calcinação visto que os resultados sugerem que as condições de queima influenciam significativamente nas características das cinzas e moagem uma vez que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar indicou elevado grau de contaminação de areia do solo, influenciando a composição química das cinzas produzidas.

No estado endurecido a incorporação de cinzas com 20% de CBCA na composição matricial do concreto apresentou no ensaio de indução de íons cloretos valores mais eletronegativos na leitura do potencial e velocidade de corrosão ao longo do tempo. Podemos concluir que o concreto produzido com a cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland atingiu valores mais negativos de potencial de corrosão no decorrer do tempo,

proporcionando uma condição favorável à corrosão. Foi possível analisar também a mudança na medição dos corpos-de-prova úmidos e secos na variação do potencial de corrosão.

Diante dos resultados foi observado a necessidade de se avaliar mais profundamente os mecanismos de ação das cinzas e os critérios para definição de materiais pozolânicos.

Pode-se concluir, que a viabilidade do concreto produzido com a CBCA em substituição parcial do cimento Portland, obteve um potencial de lucro por 1 m³ de concreto de 1,03% utilizando a família com incorporação de 15% de cinza, apesar de obter resultado satisfatório em alguns aspectos, necessitam de aprofundamento nas pesquisas que tangem viabilidade econômica. Favorecendo o surgimento de métodos racionais que objetivam construir um ciclo renovável que percorra aspectos como exploração consciente, reaproveitamento de resíduos e lucro

Outro ponto importante é a não utilização da CBCA, configura-se uma prática inaceitável, uma vez que a mesma está disposta em grande quantidade pela indústria de cana-de-açúcar, em vários estados do país.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar a influência do tempo de espera da CBCA nos tanques de decantação antes da coleta;
- b) Análise físico-química comparativa entre cinzas de diferentes usinas;
- c) Estudo do comportamento da resistência à compressão em concretos mais antigos;
- d) Avaliar hidratação, resistência a compressão de pastas de cimento Portland com cinzas agroindustriais de elevada reatividade.
- e) Efetuar estudos microestruturais detalhados em pastas de cimento Portland contendo cinza do bagaço de cana-de-açúcar, na tentativa de quantificar os efeitos causados pelas reações pozolânicas e pelos efeitos filler.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6118** – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7211** – Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7480** – Aço destinado a armaduras das estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5739** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7222** – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR NM 46** – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASTM International – **ASTM G1-03** - Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/G0001-03R17E01

ASTM International – **ASTM C 876** - Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete West Conshohocken, PA, 2015. DOI: 10.1520/C0876-15

AKRAM, T., ALI M., S., & OBAID, H. (2009). **Production of low cost self-compacting concrete using bagasse ash**. *Construction and Building Materials*, 23 (2), 703-712.

ALBARELLI, J. Q. *et al.* **Product diversification to enhance economic viability of secondgeneration ethanol production in Brazil: the case of the sugar and ethanol joint production.** *Chemical Engineering Research and Design*, v. 92, n. 8, p. 1470–1481, 2014.

ALBINO, J. C., CRESTE, S., FIGUEIRA, A. **Mapeamento genético da cana-de-açúcar.** *Biotecnologia Ciencia e Desenvolvimento*, 36: 82 – 91, 2015.

MORAES, S.C.A.G. **Avaliação da capacidade adsortiva da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para remoção de H₂S oriundo da gaseificação de biomassas.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017.

BACKUS, J.; MCPOLIN, D. Effect of Cyclic Carbonation on Chloride Ingression in GGBS Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2016. ISSN 0899-1561. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001529

BARROS, G.S.C.; GILIO, L.; CASTRO, N.R.; BELON, J.G.O.; RODRIGUES, L. **Especial temático mercado de trabalho do agronegócio: A dinâmica dos empregos formais na agroindústria sucroenergética de 2000 a 2016.** Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), Piracicaba, 2018.

BALESTRA, C. E. T.; LIMA, M. G.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MONTEIRO, A. J. A. E. Parâmetros ambientais e materiais que afetam a penetração de cloretos em estruturas de concreto – Estudo de caso da Ilha dos Arvoredos. **Revista Eletrônica de engenharia Civil**, v. 13, p. 270-282, 2017. ISSN: 2179-0612. DOI: 10.5216/REEC.V13i1.43054 UNICA. **Relatórios UNICA Data**, 2018. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br>>. Acesso em 2 dez. 2019.

BERENGUER, R. A. **Estudo da Durabilidade e Influência da Adição da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar nas propriedades do concreto.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.** São Paulo-SP, 1995. 236 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.

BLEICHER, Lucas; SASAKI, José Marcos. **Introdução à difração de raios-x em cristais.** Ceará: UFC, 2000.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, SINAPI. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_653>> Acesso em 30/12/2020.

CASTALDELLI, V. N.; CASTRO, J. N. T.; FAZZAN, J. V.; AKASAKI, J. L.; MANZOLI JÚNIOR, W; BERNABEU, J. J. P. **Concreto com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** In: Encontro de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Canela. Anais. Canela- RS.

CASTALDELLI, V.N.; MORAES, J.C.B.; AKASAKI, J.L.; MELGES, J.L.P.; Monzó, J.; Borrachero, M.V.; SORIANO, L.; Payá, J.; Tashima, M.M. **Study of the binary system fly**

ash/sugarcane bagasse ash (FA/SCBA) in SiO₂/K₂O alkali-activated binders. Fuel (Guildford), v. 174, p. 307-316, 2016.

CAVALCANTI, L. M.A.; RIBEIRO, D. V. **Análises físicas e mecânicas de argamassas de Cimento Portland com areia contendo cinzas da queima do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo.** Fórum Ambiental da Alta Paulista, 2013. Vol.: 09, Num.: 01.

CAMARGO, P., Pereira, A., Akasaki, J., Fioriti, C., Payá, J., & Pinheiro J. (2014). **Performance of the mortars produced with the incorporation of sugar cane bagasse ash.** Revista Ingeniería de Construcción, 29 (2), 187-199.

COCIÑA, E. V.; RUIZ, J. H.; FRÍAS, M.; SAVASTANO JR, H. **Pozzolanic behaviour of a bagasse ash from the boiler of a Cuban sugar factory.** Advances in Cement Research, 2013, 25(3), 136–142.

CHARLES, Q., & WILLIAM, Y. (2001). **The effect of particle size on peak intensities of FTIR photoacoustic spectra.** Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0022-2860\(86\)80334-9](https://doi.org/10.1016/0022-2860(86)80334-9)

CHRISTOFOLETTI, G. B. **Estudos dos efeitos das etapas de pré-tratamento na hidrólise ácida de bagaço de cana-de-açúcar,** São Carlos 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: Cana-de-açúcar, 1º Levantamento,** Brasília, 2020, 10p.

CORDEIRO. G. C. **Utilização de Cinza Ultrafina do Bagaço de Cana de Açúcar e de Casca de Arroz como Aditivos Minerai s em Concreto.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G., Tavares, L. M., Toledo F., R, D. Moraes, E., & Fairbairn, R. (2009). **Ultrafine Grinding of Sugar Cane Bagasse ash for Application as Pozzolanic Admixture in Concrete.** Cement and Concrete Research, 39 (2), 110-115.

CORDEIRO, G.C.; BARROSO, T. R. **Avaliação da atividade pozolânica e aplicação em concreto de cinza do bagaço de cana-de-açúcar produzida com queima controlada.** Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011.

COOK, D.J. Rice husk ash. In: Swamy, R.N. (ed). **Concrete technology and design** – v.3: Cement replacement materials. Blackie & Son Ltd, London, 1986.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction.** 2a ed. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company, 1978.

DANTAS FILHO, Paulo Lucas. **Análise de Custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana-de-açúcar: um Estudo de Caso em Quatro Usinas de São Paulo.** Dissertação de Mestrado em Energia, São Paulo: USP. 2009.

DEDAVID, B. A, GOMES, C. I, MACHADO, G., **Microscopia eletrônica de varredura - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Polimericos, metálicos e semicondutores.**

Edição do CEMM - Centro de Microscopia e Microanálises do IDEIAPUCRS - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Porto Alegre, RS, 2007.

DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas – uma introdução**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1992.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, Maurício. **Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de edificações**. In: X Congresso Internacional de Tintas, 2007, São Paulo. Anais do X Congresso Internacional de Tintas. São Paulo: ABRAFATI, 2007.

ELIA NETO, A. Captação e Uso de Água no Processamento da Cana-de-Açúcar, in: MACEDO, I. C. *et al.*, **A Energia da Cana-de-Açúcar: Doze estudos sobre a Agroindústria da Cana-de-Açúcar no Brasil e a sua Sustentabilidade**. UNICA, 2005.

ELLINGWOOD, B. R., Frangopol, D. M. (2016), “Introduction to the state of the art collection: risk-based lifecycle performance of structural systems”, **Journal of Structural Engineering**, V.142, pp.1.

FARIA, K. C., Gurgel, R. F., & Holanda, J. N. (2012). **Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks**. Journal of environmental management, 101, 7-12.

FELIX, *et al.*, **Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF**. Revista Alconpat, [s.l.], v. 8, n. 1, p.1-15, 1 fev. 2018. Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>.

FERREIRA, R. T. L.; NUNES, F. M. M. P.; BEZERRA, A. C. S.; FIGUEIREDO R. B.; CETLIN, P. R.; AGUILAR, M. T. P. **Estudo da influência da requieima na pozolanicidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. 1501 – 1508, 2014.

FREITAS, F. A. E., **Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio de análise de imagens**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Campinas, 2001.

GANESAN, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). **Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material**. Cement and Concrete Composites, 29 (6), 515- 524.

GEIKER, M. R., Polder, R. B., “Experimental support for new electro active repair method for reinforced concrete”, **Materials and Corrosion**, V.67, pp. 600-606, 2016.

GONZÁLEZ, J.A., FELIU, S., RODRIGUEZ, P., RAMIREZ, E., ALONSO, C., ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: WHEN, HOW AND HOW MUCH STEEL CORRODES. **Materials and Structures**. V.29, jan-feb, p. 40-46, 1996.

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI. 1986. 46p.

HELENE, P. Especialistas respondem a questões sobre tecnologia de concretos e argamassas. **Revista Técnica**, São Paulo. Ed. 185, p. 60-72 2012.

HELENE, P. R. L. RIBEIRO, D. V. (Org.). **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. 1a Edição, Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

IKEMATSU, PAULA., **Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2007.

IZIDORO, J.C.; FUNGARO, D.A.; SANTOS, F.S.; WANG, S. **Characteristics of Brazilian coal fly ashes and their synthesized zeolites**. Chemical and Environmental Technology Center, Nuclear and Energy Research Institute, São Paulo, Brazil and Department of Chemical Engineering, Curtin University, Australia, 2012.

JOSHAGHANI, A.; MOHAMMAD, A. M.; **Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar**. Revista Elsevier Construction and Building Materials. v. 152, p. 818-831. Amsterdam, Países Baixos, 2017.

KARI, O. P., Puttonen, J., Skantz, E., “Reactive transport modelling of long-term carbonation”, **Cement and Concrete Composites** 52, pp. 42–53, 2014.

KIGOZI, J., (2015). **Investigation of sugar cane bagasse ash as a binding material for construction industry**. **Journal of Global Ecology and Environment**, 2 (4), 205-208.

LANGFORDY, J. I.; DANIEL, L. **Powder diffraction**. UK: Rep. Prog. Phys., 1996.

MACEDO, J.V.S., 2019, **Avaliação da influência da adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em propriedades mecânicas do concreto e na inibição de reações álcalis-agregado**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil. **Balanço Nacional da Cana-de-Açúcar e Agroenergia 2007**. Brasília; 2007.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDEENDORF, B., GEHRKE, M., BUDELMANN, H., 1998, **Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime pozzolana binders: study of the reaction**, **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, pp. 1525-1536.

MANSANEIRA, E.C. **Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana de açúcar em substituição parcial ao cimento Portland**. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

MASSAZZA, F., 1998, **Pozzolana and pozzolanic cements**. In: Hewlett, P. C. (ed), **Lea's chemistry of cement and concrete**, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631.

MEHTA, P. K., Monteiro, P. J. M., **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo, IBRACON, pp.751, 2014.

MODANI, P. O., & Vyawahare, M. R. (2013). Utilization of Bagasse Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete. *Procedia Engineering* 51, 25-29.

NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R. D.; SECCHI, M.; ABE, M. A. P. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção.** Revista Tecnológica, v. 17, p. 39-48, Maringá, Paraná, 2009.

PAULA, M.O. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2006.

PAYÁ, J., MONZÓ, J., BORRACHERO, M. V., DÍAZ-PINZÓN, L., ORDÓÑEZ, L. M., 2002, **Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production**, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 77, n. 1, pp. 321-325.

RERKPIBOON, A.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKUL, C. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. **Construction and Building Materials**, Guildford, Inglaterra. v. 101, part. 1, p. 983-989, 2015.

RODRIGUEZ, F. J. G. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de la corrosión: resistencia a la polarización. Dep. ing. metalúrgica, facultad de Química, UNAM, 2000.

RUKZON, S., & Chindaprasirt, P. (2011). **Utilization of bagasse ash in high-strength concrete.** *Materials and Design*, 34, 45-50.

SALES, A., & Araújo, S. (2010). Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste Management*, 30 (6), 1114-1122.

SANTIAGO, L. A.; MATTOS, L. B. Análise de operações de Cross Hedge para o mercado de açúcar cristal no Brasil. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. **Perspectiva Econômica**, Vitória, Espírito Santos. v. 10, n. 2, p. 122-132, 2014.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Consumo, Produção e Valores de Materiais de Construção. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>. Acesso em: 10 de outubro de 2020.

SINGH, N. B., SINGH, V. D., RAI, S., 2000, **Hydration of bagasse ash-blended Portland cement**, *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 9, pp. 1485-1488.

SRIVASTAVA, V. C., Swamy, M. C., Mall, I. D., Prasad, B., & Mishra (2006). **Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics.** *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 272 (1-2), 89-104.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de Química Analítica.** 8ª ed. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2006.

SOUZA, G. N; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. **Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do**

Bagaço de Cana-de-açúcar. 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais. Bento Gonçalves, Brasil: IBRACON.

STERN, M; GEARY, A.L. **Electrochemical polarization. A theoretical analysis of the shape of polarization curves.** Journal of the Electrochemical Society, v.104, n.1, p.56-63, 1957.
SUA-IAM, G; MAKUL, N. **Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of selfcompacting concrete.** Revista Construction and Building Materials. v. 130, p. 32-40. Amsterdam, Países Baixos, 2017.

SUNDARA K., K., & Venkata R., G. (2016). **Studies on production of greener concrete using agroindustrial Waste.** International Journal For Technological Research In Engineering, 4 (2), 219-224.

UNICA – União da indústria de cana-de-açúcar. Histórico de produção e moagem de cana-de-açúcar – safra 2000/2001 a 2019/2020. São Paulo, 2020. Disponível em: <<<https://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>>>. Acesso: 12 de julho de 2017.

USINA SÃO JOSÉ. **Sustentabilidade.** Igarassu, 2020. Disponível em: <https://www.saojoseagroindustrial.com.br/sustentabilidade>. Acesso: 16 de julho de 2020.

VANDERLEI, R. D.; PEINADO, H. S.; NAGANO, M. F.; MORISSUGUI, M. T. SARMENTO, M. F. Avaliação da resistência ao ataque por cloretos em concreto com cinza do bagaço da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal-RN. **Anais...** São Paulo. 2014. p. 1–9.

VIEIRA, A. A. P. Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos. 2005. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

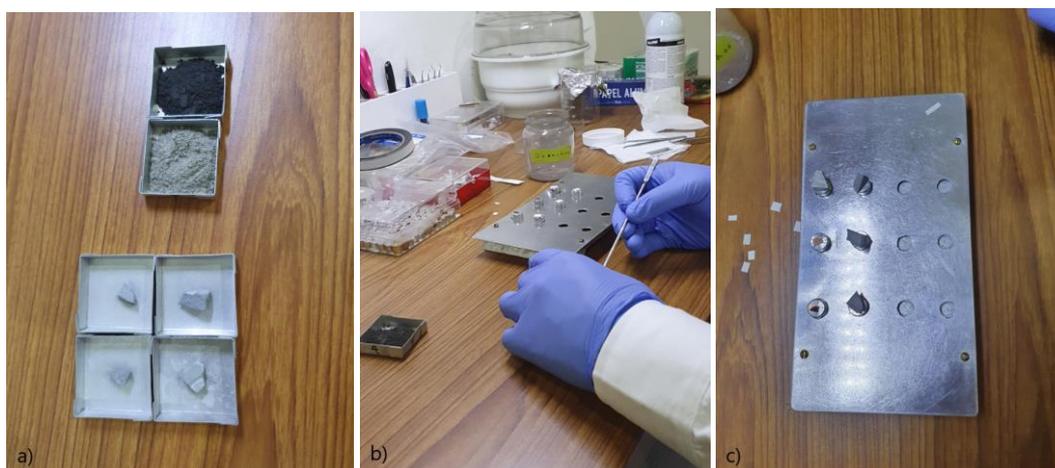
ZAKARIA, M.; CABRERA, J.G. Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates. Waste Management, Vol. 16, N. 1-3, p. 151-158, 1996.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a verificação através da microscopia eletrônica de varredura foi colocada uma alíquota de cada amostra individual na qual se fez, no primeiro momento, a preparação e montagem das amostras utilizando fita de carbono e Stub, de acordo com as Fotografias 31 (a), (b) e (c). Posteriormente foi feita a metalização das amostras, adicionadas ao porta amostra e colocadas no dessecador até o momento do ensaio, de acordo com as Fotografias 32 (a), (b) e (c). A análise foi elaborada nas amostras anidras e nos compósitos (concreto).

Fotografia 31 – Preparação das Amostras



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 32 – Metalização das amostras – Equipamento Quanta Quorum Q150R ES



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Para a análise da morfologia das amostras foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM7600F. Fotografias 33 (a) e (b) o feixe de elétrons foi gerado a partir de filamento de tungstênio (W) que aplicou uma tensão de 15kV na amostra para obtenção das imagens. Para análise dos compósitos utilizou do detector de energia dispersiva EDS.

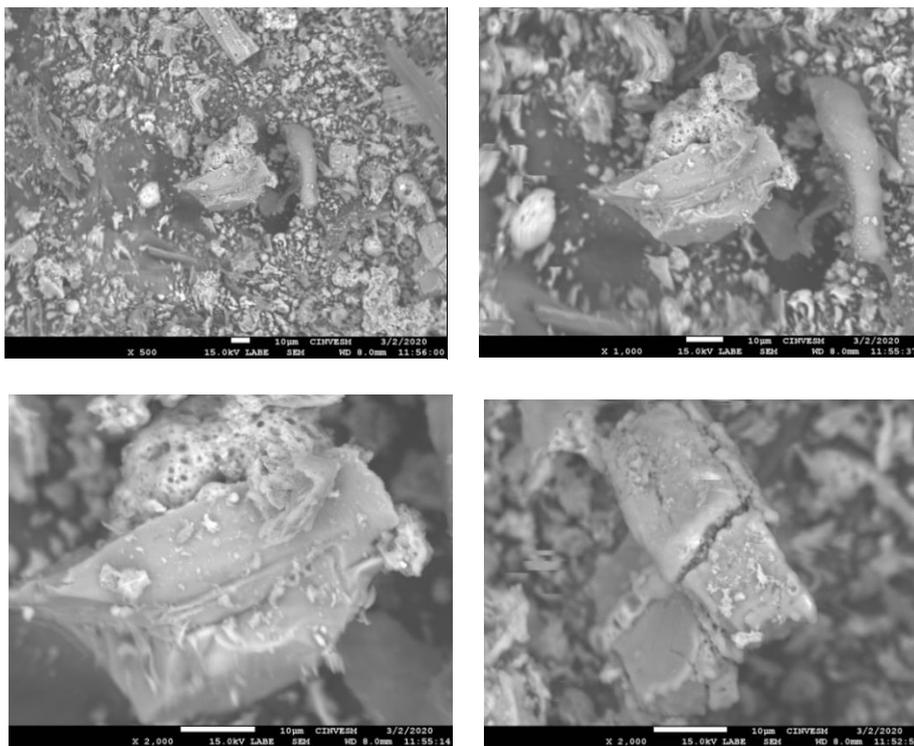
Fotografia 33 – Microscópio eletrônico de varredura modelo JSM7600F, marca JEOL



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

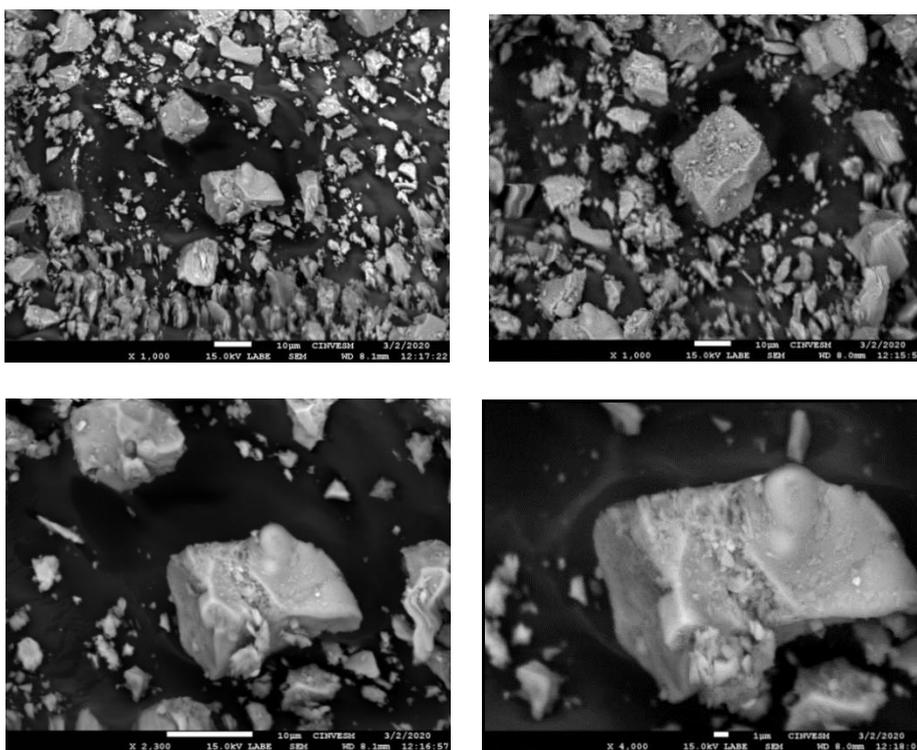
Para verificação da morfologia das partículas das amostras anidras, através da microscopia eletrônica de varredura, utilizou-se um detector SE. Foram observadas as características morfológicas das partículas para cada material usado na pesquisa, conforme Fotografias de 34 e 35.

Fotografia 34 – Microscópio eletrônico de varredura (CBCA)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 35 – Microscópio eletrônico de varredura (CPV – ARI)

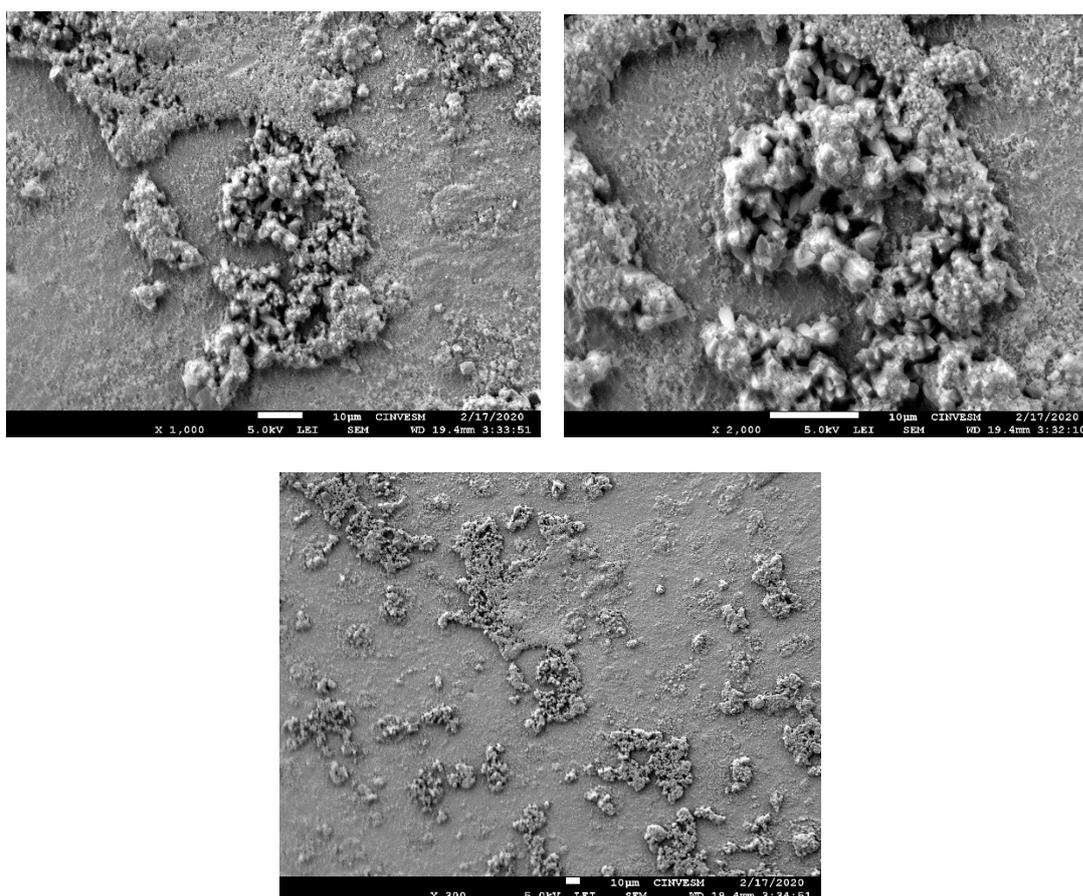


Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Para a análise da morfologia das amostras de argamassas feitas com a substituição parcial do cimento Portland pela CBCA em teores de 0%, 10%, 15% e 20%, através da microscopia eletrônica de varredura, foi utilizado detector de elétrons secundários (SE). Foram observadas as características morfológicas desses compósitos para cada material utilizado na pesquisa a Fotografias 36, 37, 38 e 39 ilustra a sua microestrutura.

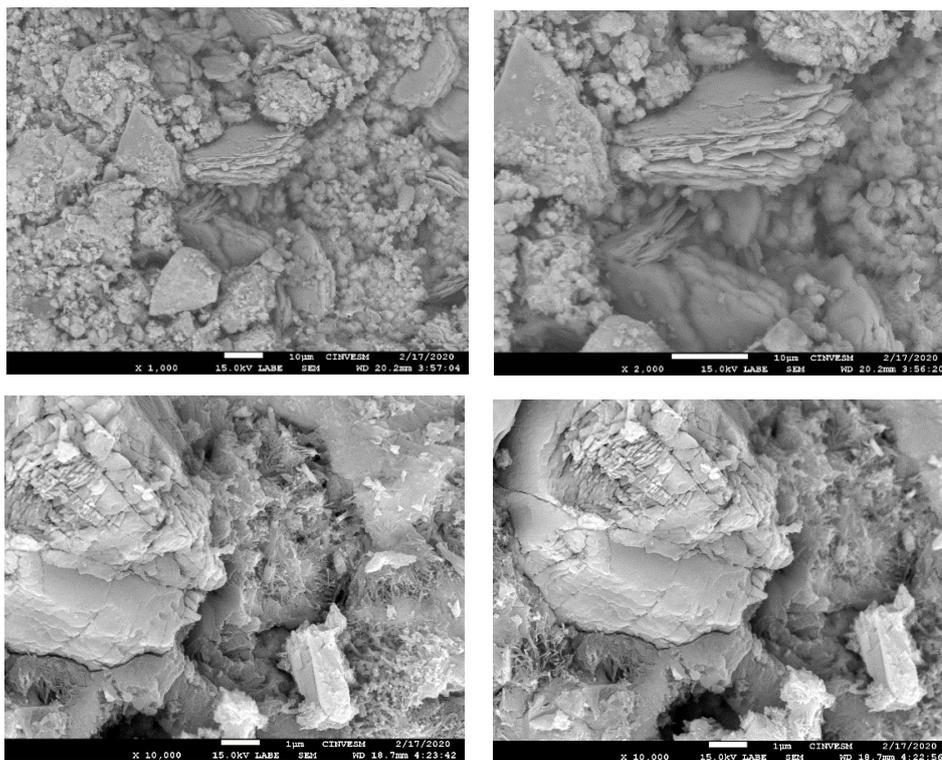
Para verificação dos componentes químicos das partículas característica das amostras, foi utilizado um detector de energia dispersiva (EDS), conforme ilustrado na Fotografia 40 a 43.

Fotografia 36 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE - Referência



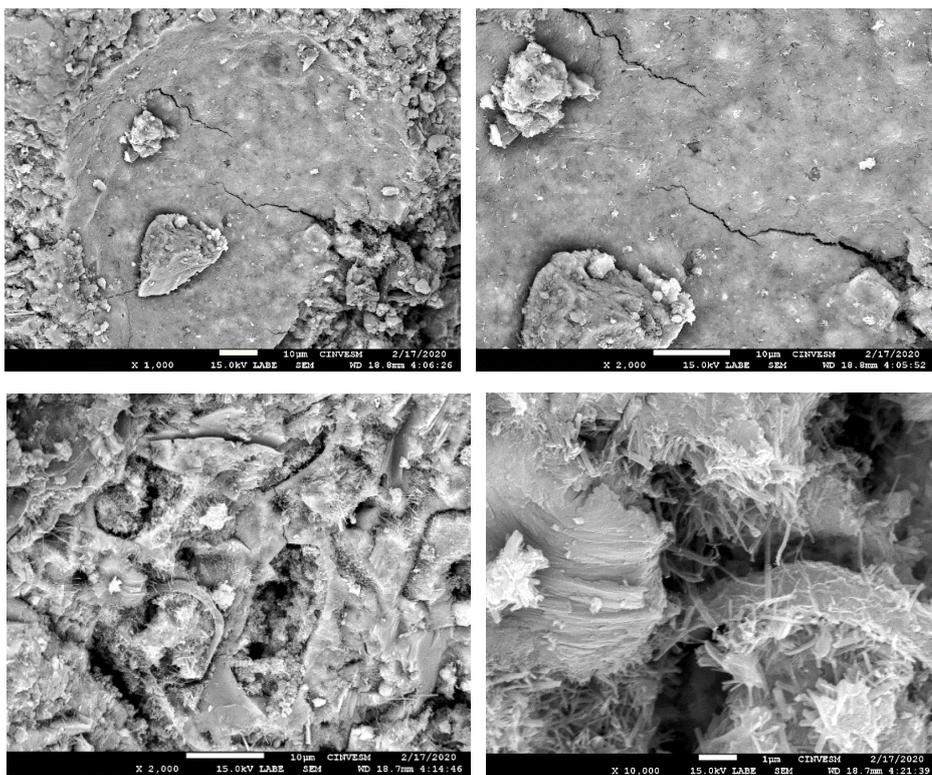
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 37 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 10%



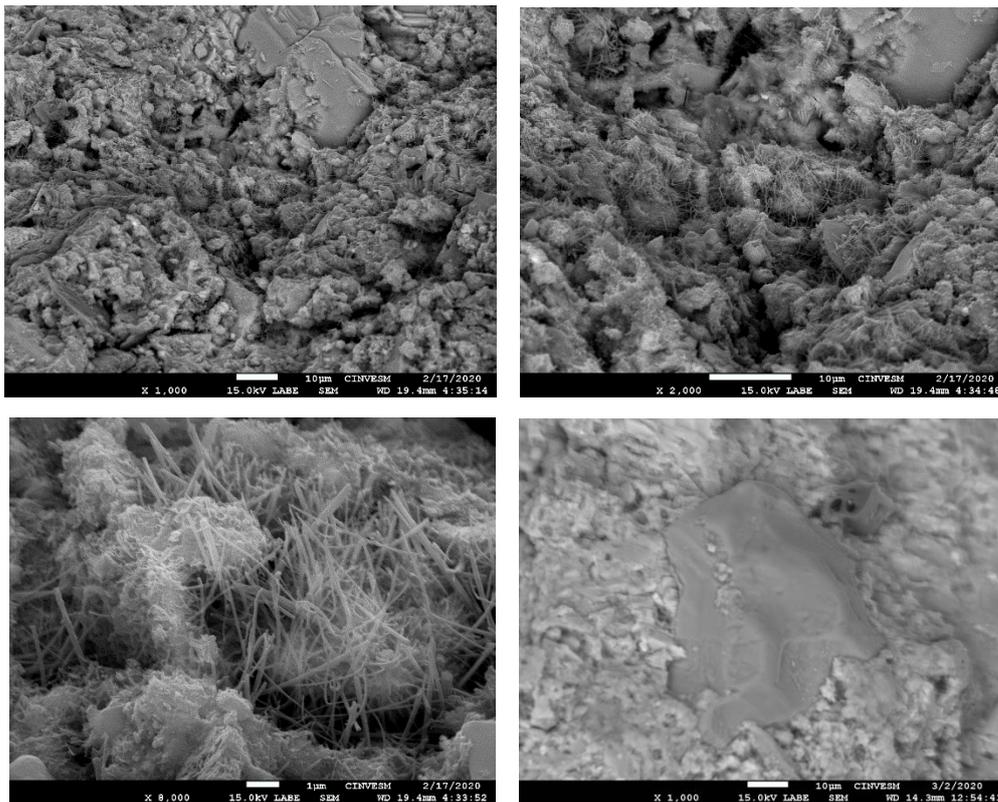
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 38 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 15%



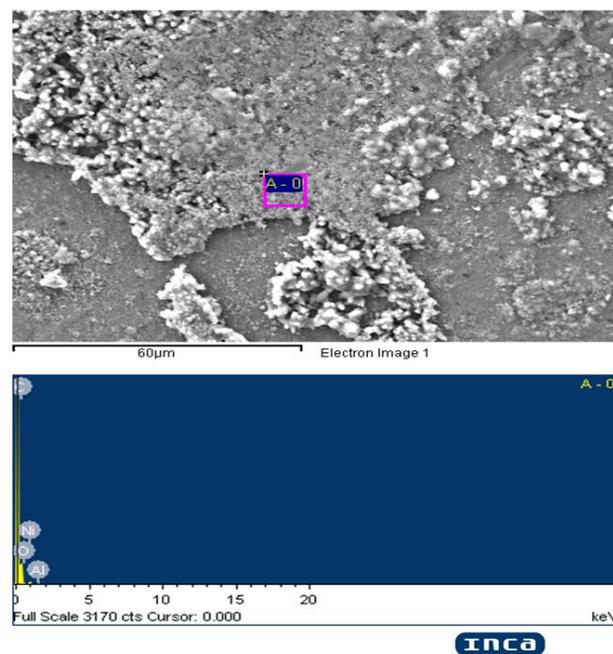
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 39 – Microscopia eletrônica de varredura detector SE – 20%



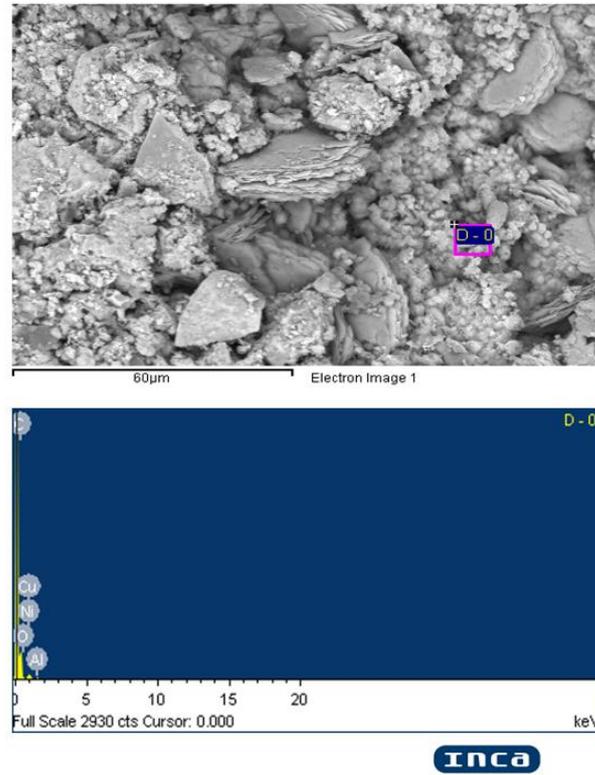
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 40 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS - Referência



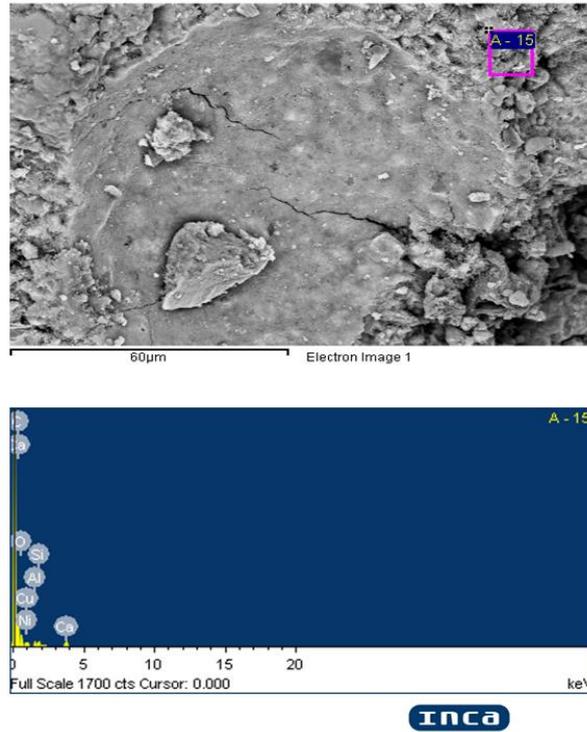
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 41 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 10%



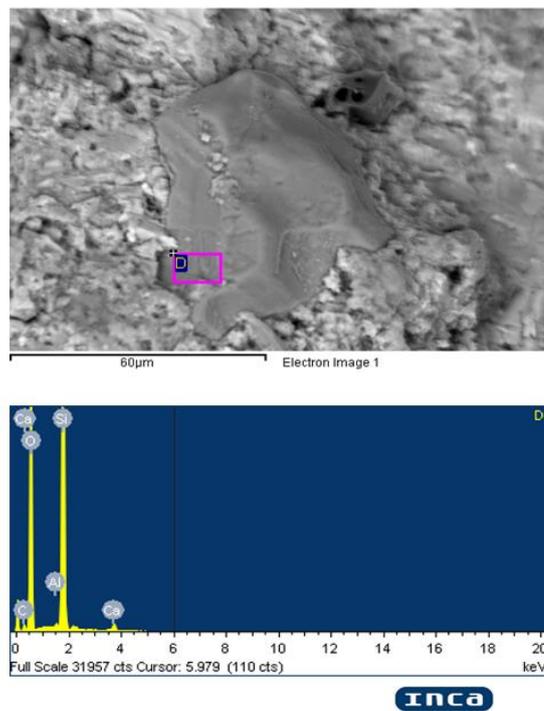
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 42 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 15%



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 43 – Microscopia eletrônica de varredura detector EDS – 20%



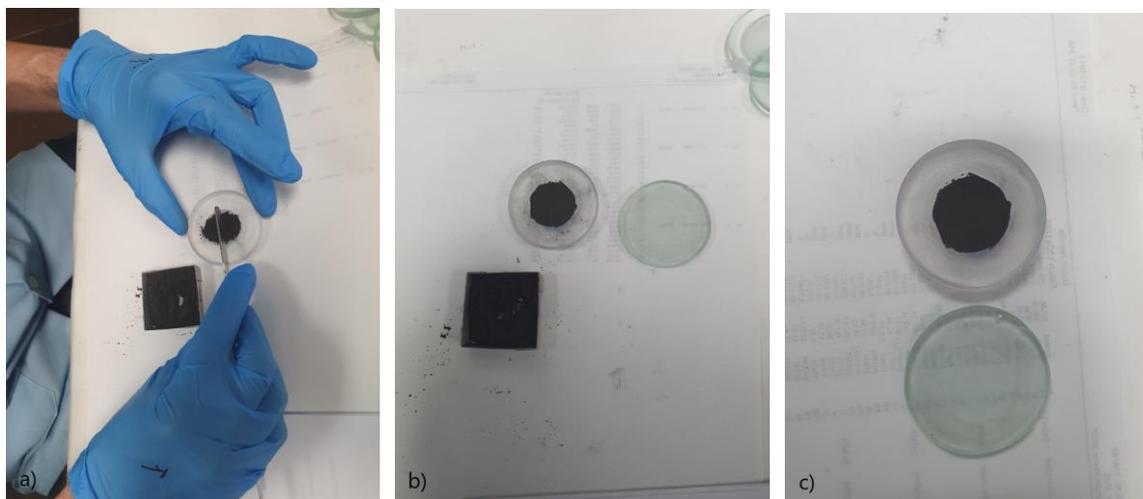
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Foram reconhecidos, com a utilização da microscopia eletrônica de varredura com o detector EDS, os elementos químicos principais na fase da hidratação do concreto C-S-H.

- Técnica de difração de Raio- X (DRX)

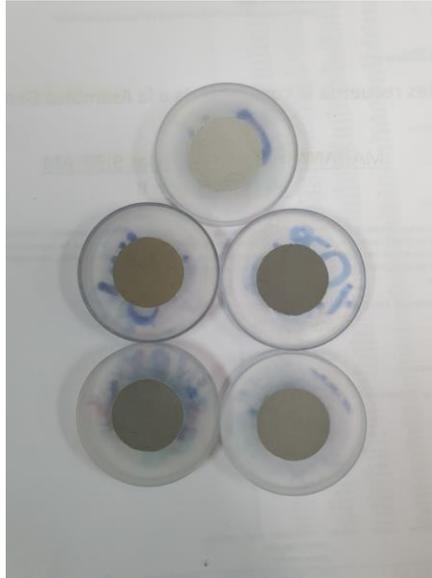
Os principais compostos mineralógicos do cimento Portland CPV- ARI, da CBCA oriunda da usina e das pastas de cimento com diferentes teores de CBCA foi realizada pela técnica de difração de Raio – X, obtido pelo método do pó aos 28 dias. Foi utilizado o difratômetro D8 Advance, Bruker, que possui um tubo de alvo de cobre, com comprimento de onda (λ) de 1,54060 Å, corrente de 10mA e tensão de 30Kv. Na elaboração das amostras para o ensaio foi utilizado uma alíquota da amostra já seca e material passante na peneira #200 0,075mm, o qual se adiciona na porta amostra de forma que preencha e fique rente ao plano superior da porta amostra, conforme ilustrado na Fotografia 44 e 45 e com uma plaqueta em vidro é feita uma pressão com os dedos, sem movimento para não ocasionar planos cristalográficos preferenciais. Em seguida as fases vigentes nas amostras foram reconhecidas com o auxílio do programa computacional X'Pert HighScore, com base de dados centrada no sistema PDF (Powder Diffraction) que é mantido e atualizado periodicamente pelo Centro Internacional de Dados Difração (ICDD). Os resultados estão apresentados nas Figuras de 40 a 45.

Fotografia 44 – Difratômetro de raios X (DRX) – Preparação de amostra



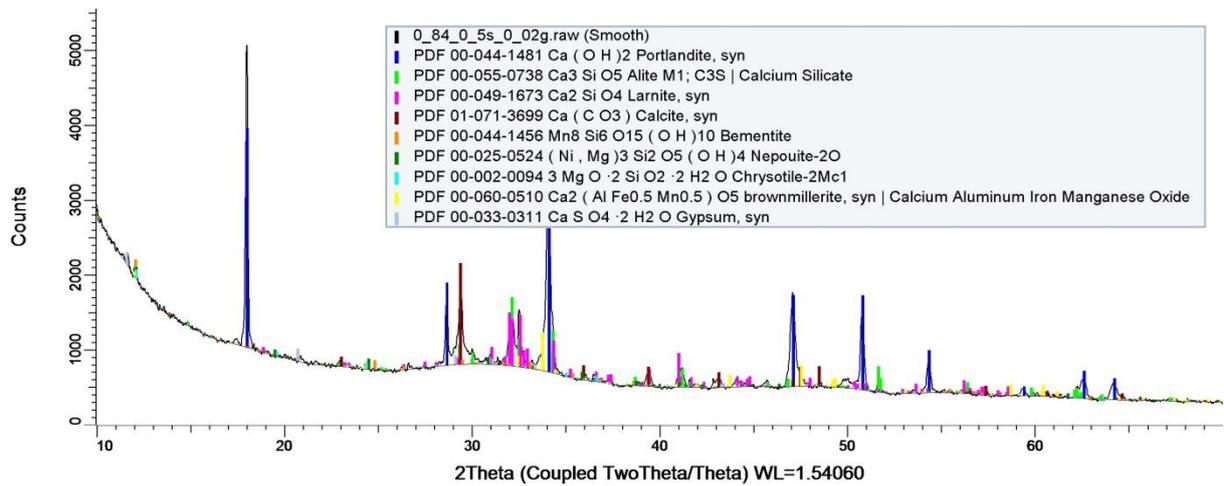
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 45 – Difratorômetro de raios X (DRX) – amostras



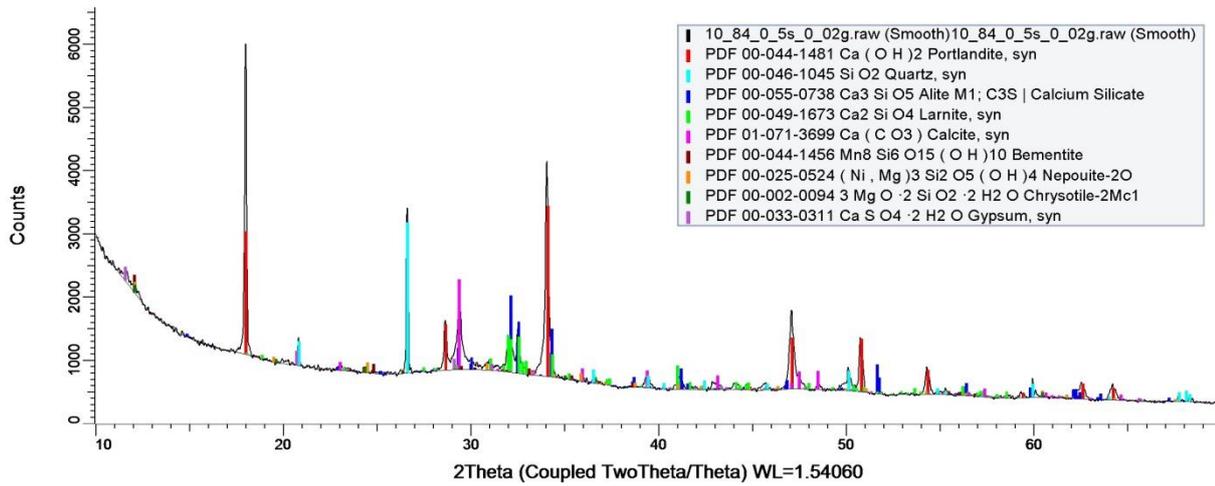
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 40 - Difratorograma da amostra de argamassa com 0% de CBCA



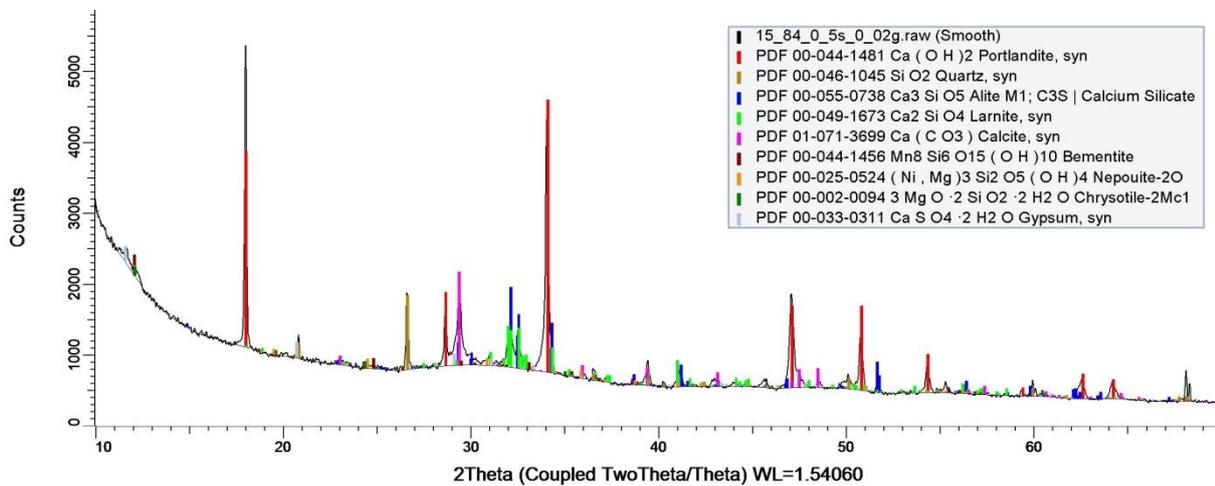
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 41 - Difratoograma da amostra de argamassa com 10% de CBCA



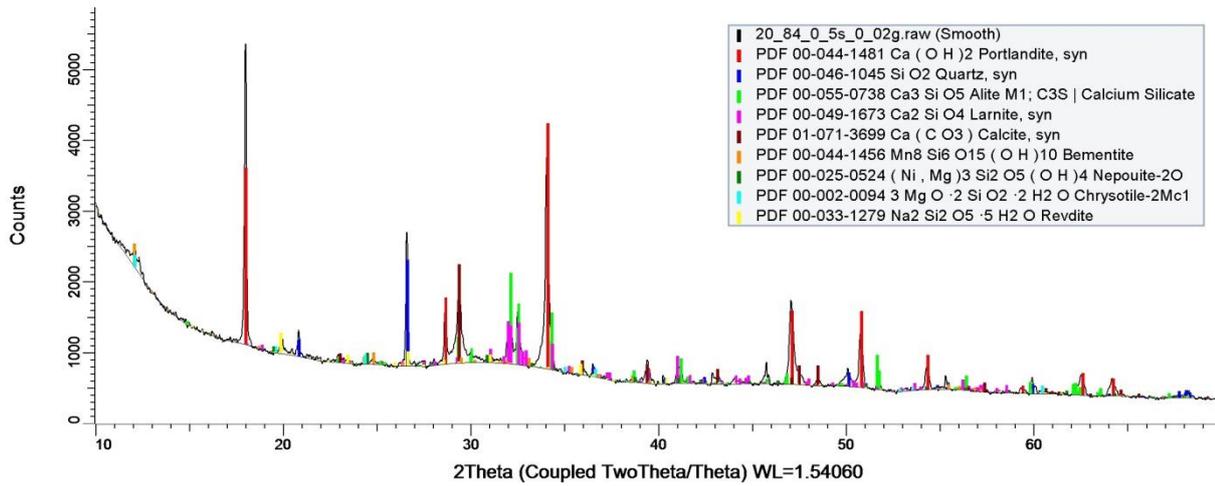
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 42 - Difratoograma da amostra de argamassa com 15% de CBCA



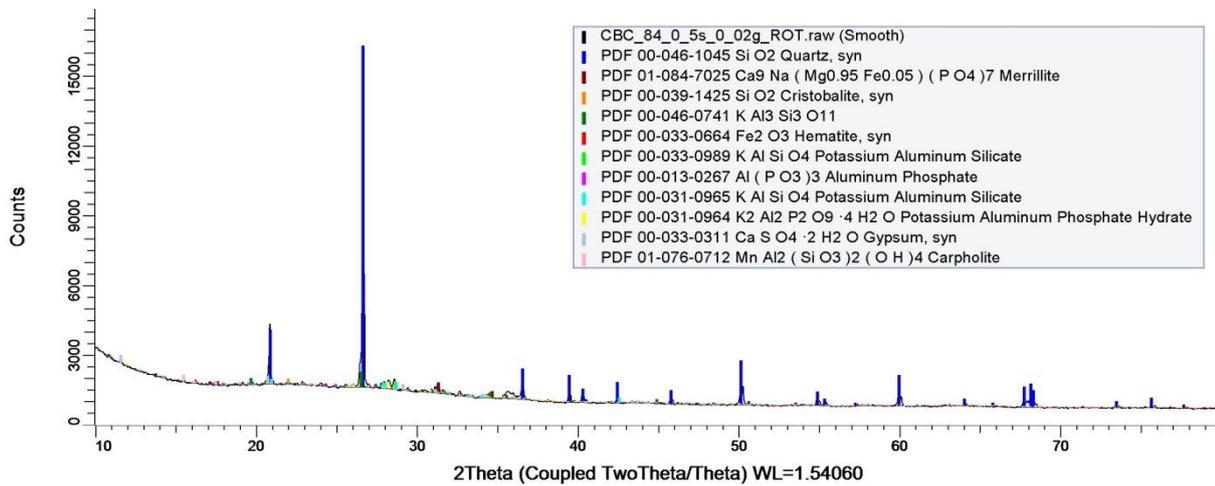
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 43 - Difratoograma da amostra de argamassa com 20% de CBCA



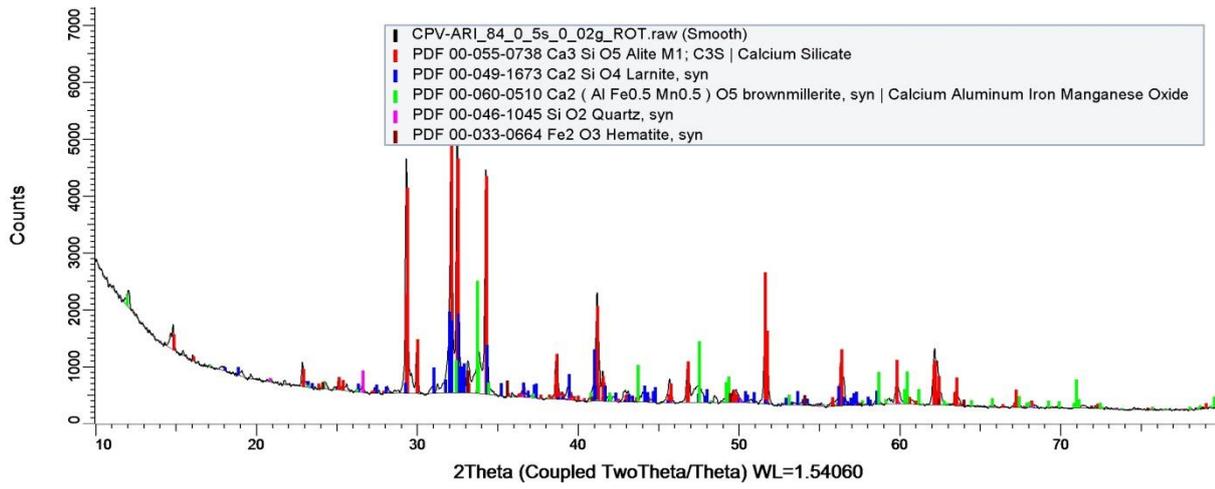
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 44 - Difratoograma da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 45 - Difratoograma do cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI)



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

APÊNDICE B – MÉTODO DE ANÁLISE PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

Analisando a condição de passividade das barras através da medição de potencial de corrosão, foi feito o procedimento de indução da penetração de íons cloreto. A condição de imersão total em NaCl com semiciclos de secagem e imersão total teve a vantagem de possibilitar o monitoramento eletroquímico durante todo o andamento do ensaio, com respostas em relação ao comportamento eletroquímico da armadura ao longo desse período.

Buscando-se um resultado mais perto da realidade a preparação da solução consistiu em diluir 140g de NaCl para cada 4 litros de água destilada, dissolvido com agitador magnético, conforme ilustra a Fotografia 46 (a), (b), (c) e 47. Quanto ao ciclo, período de imersão/ secagem empregado foram 4 dias de imersão e 5 dias para secagem, a secagem foi feita em estufa com temperatura a 60°C, de acordo com a Fotografia 48.

Fotografia 46– Pesagem do NaCl



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 47 – Agitador magnético e preparação da solução



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Fotografia 48 – Corpos de prova são secos em estufa a 60°C

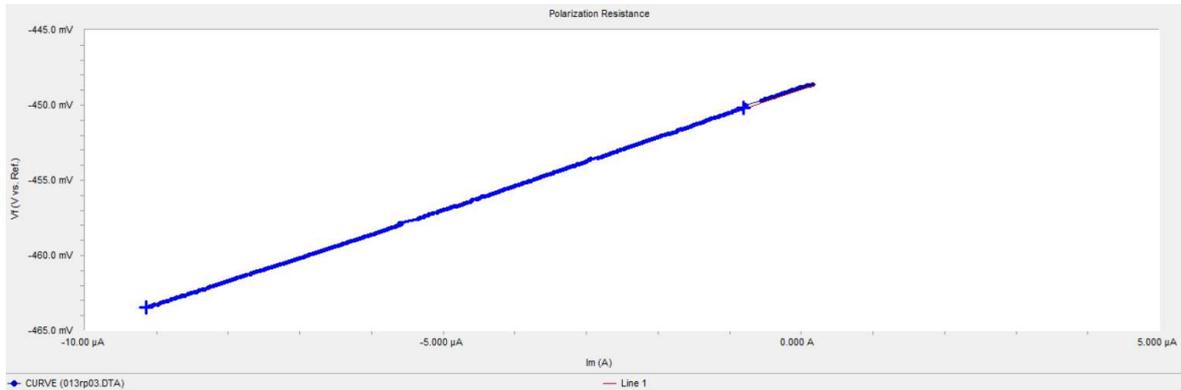


Fonte: Elaboração da autora, (2020)

No decorrer dos ciclos, ocorre um acréscimo considerável na concentração de íons cloreto nos poros de concreto. As Figuras de 46 a 104 apresentam os resultados das curvas de potencial obtidas nesta pesquisa para os corpos de prova com a incorporação de 0, 10%, 15% e 20% da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland.

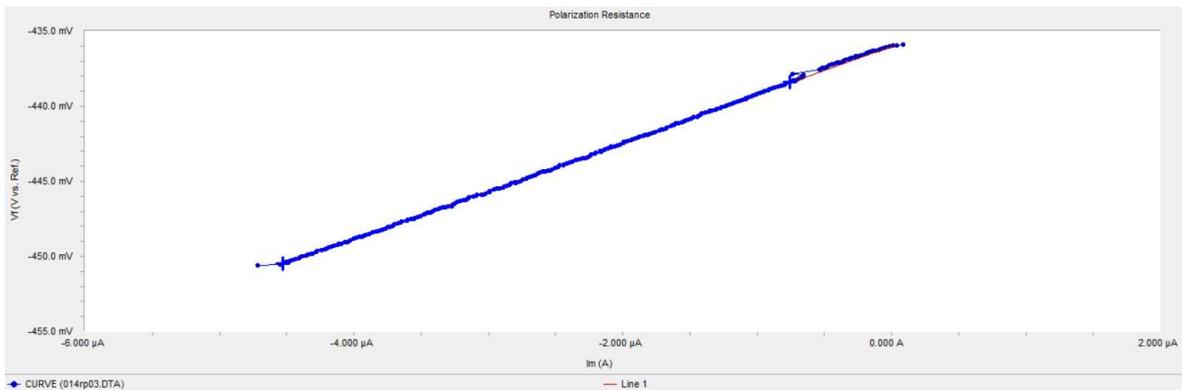
Corpos de prova imersos na solução no dia 01-03-20 e lidos no dia 02-03-20 às 9h (12h imersos).

Figura 46 - Resistência de polarização (013) – corpo de prova úmido - 02/03/20



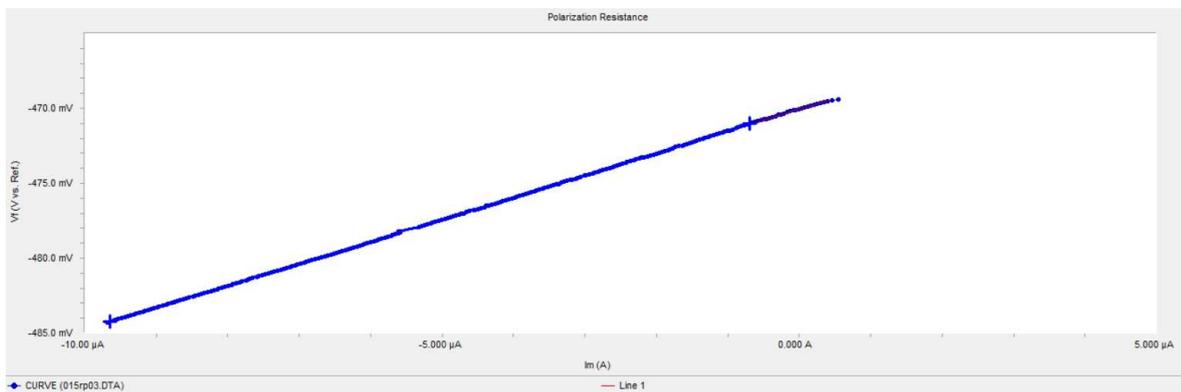
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 47 - Resistência de polarização (014) - corpo de prova úmido - 02/03/20



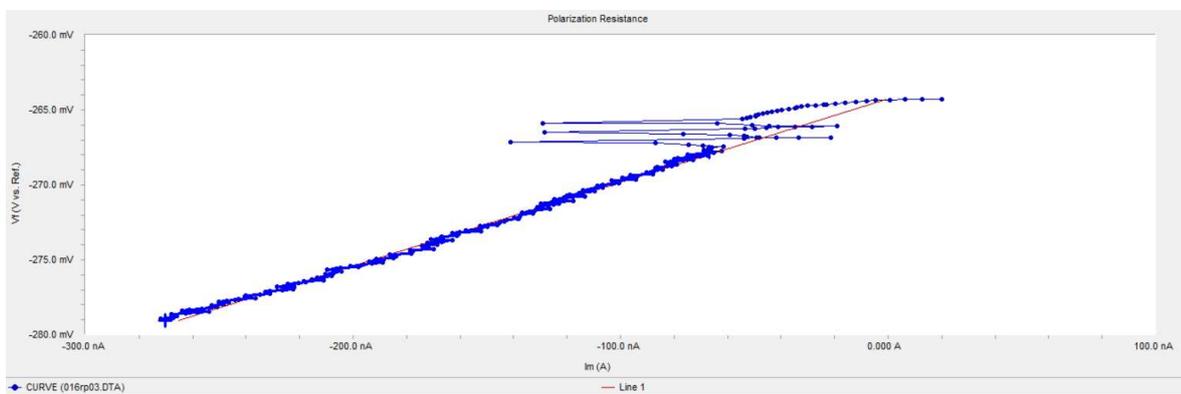
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 48 - Resistência de polarização (015) - corpo de prova úmido - 02/03/20



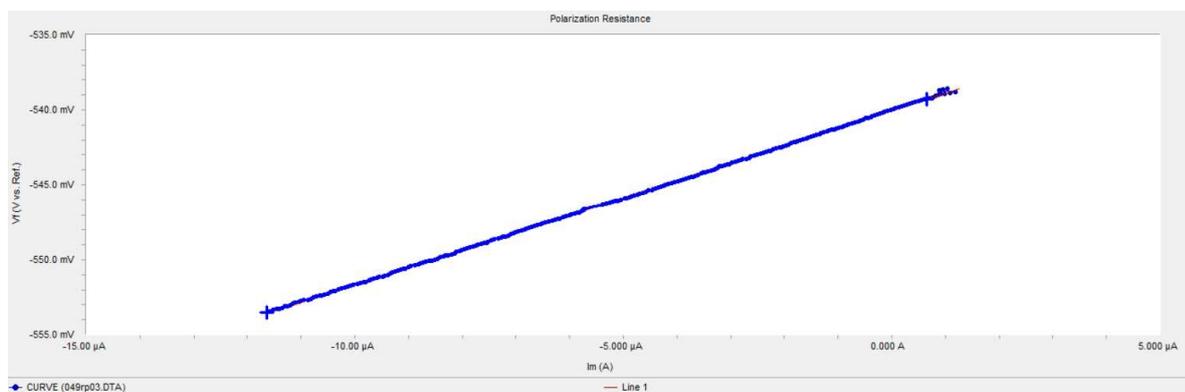
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 49 - Resistência de polarização (016) - corpo de prova úmido - 02/03/20



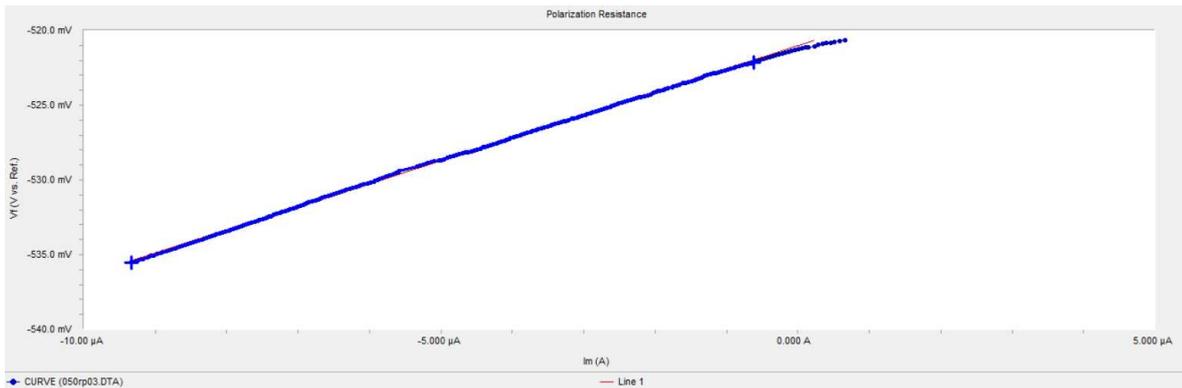
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 50 - Resistência de polarização (049) - corpo de prova úmido - 02/03/20



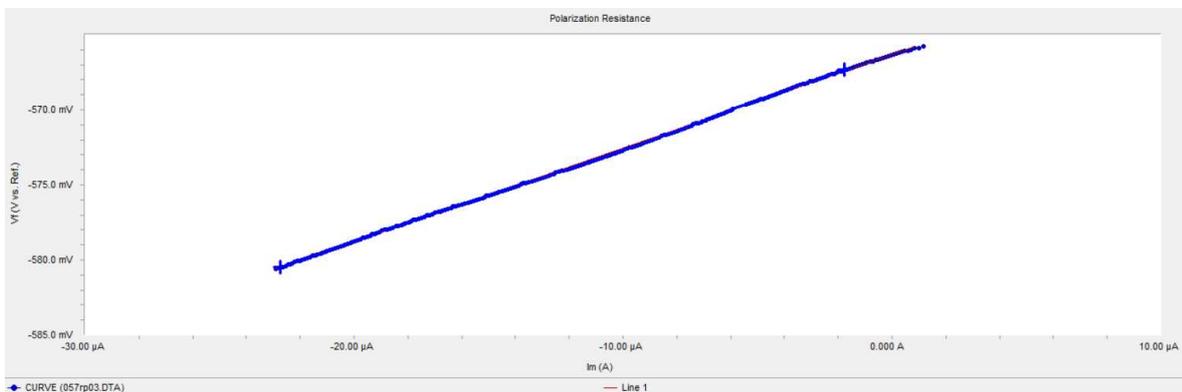
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 51 - Resistência de polarização (050) - corpo de prova úmido - 02/03/20



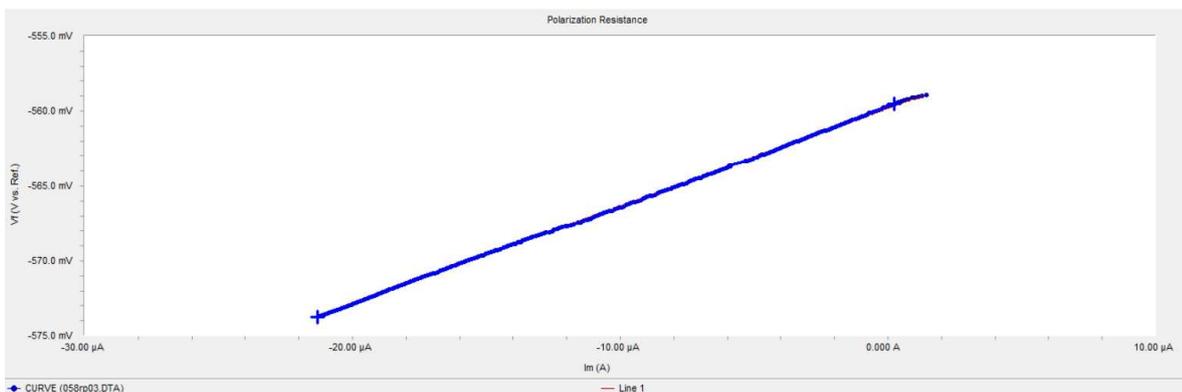
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 52 - Resistência de polarização (057) - corpo de prova úmido - 02/03/20



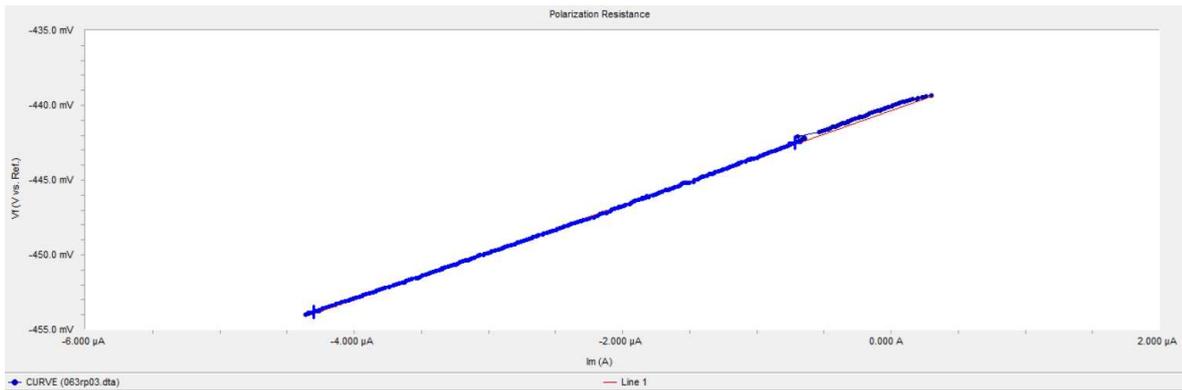
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 53 - Resistência de polarização (058) - corpo de prova úmido - 02/03/20



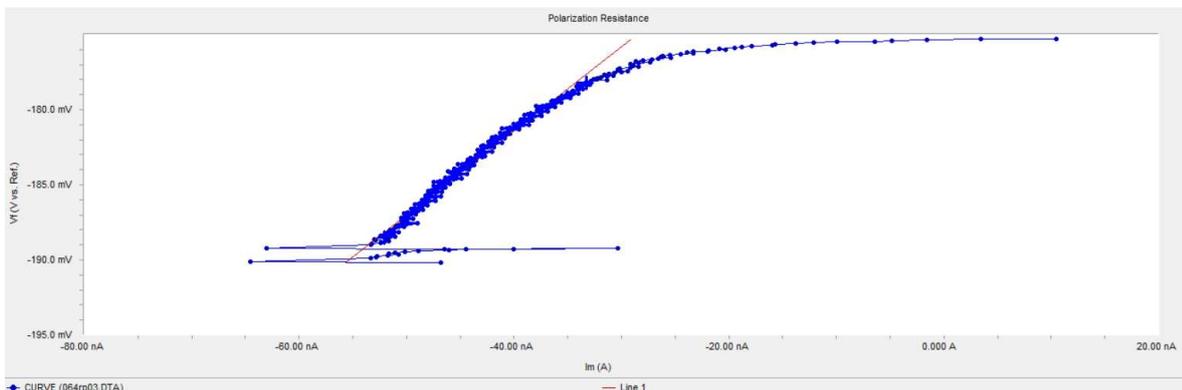
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 54 - Resistência de polarização (063) - corpo de prova úmido - 02/03/20



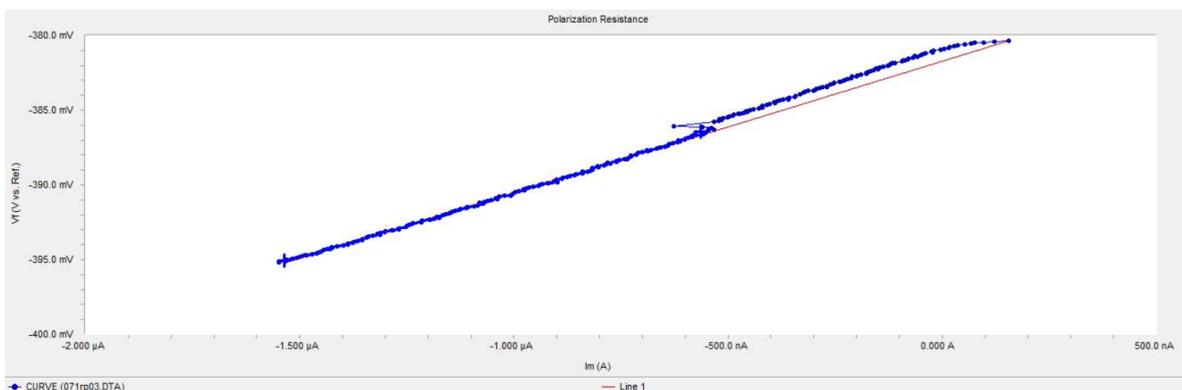
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 55 - Resistência de polarização (064) - corpo de prova úmido - 02/03/20



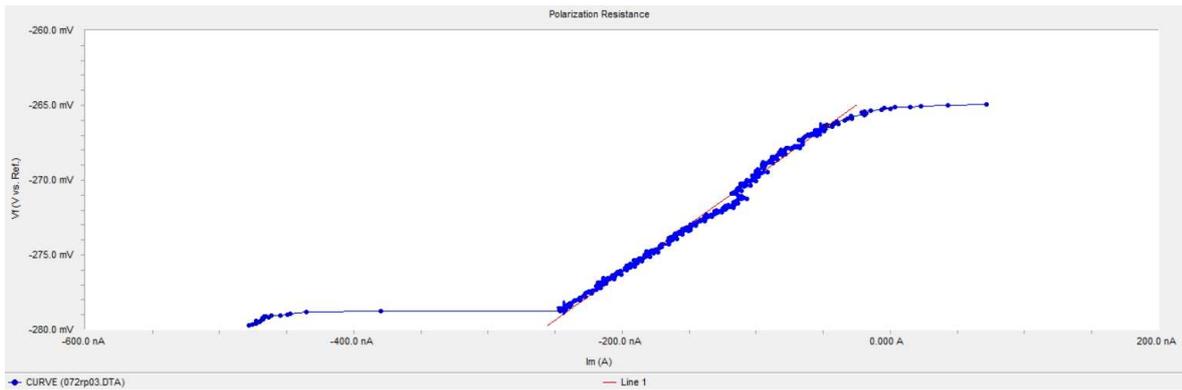
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 56 - Resistência de polarização (071) - corpo de prova úmido - 02/03/20



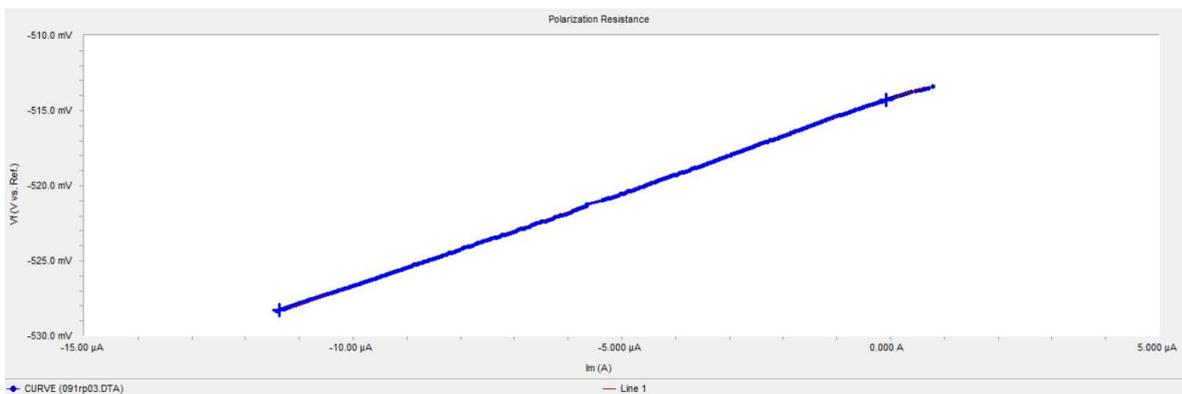
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 57 - Resistência de polarização (072) - corpo de prova úmido - 02/03/20



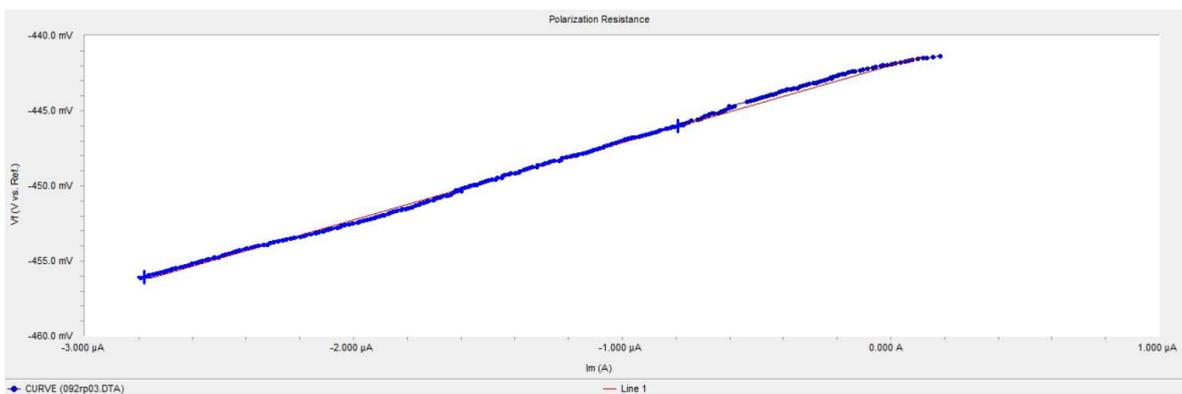
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 58 - Resistência de polarização (091) - corpo de prova úmido - 02/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

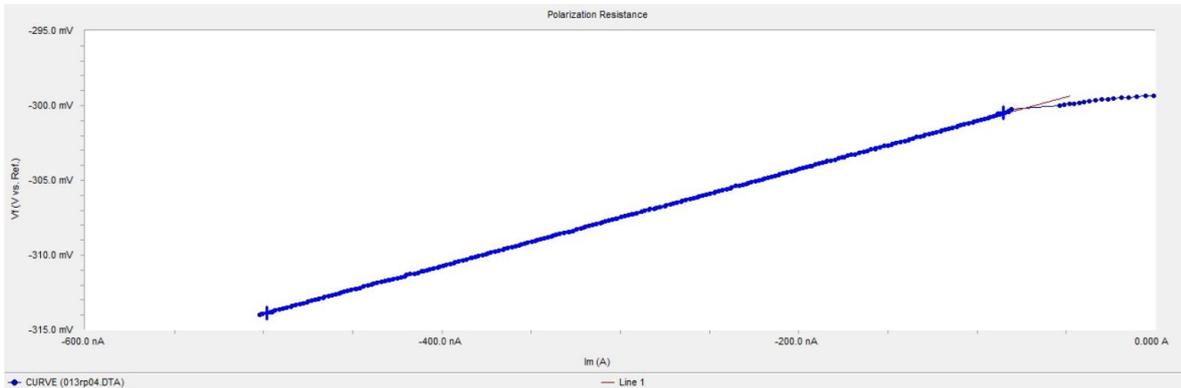
Figura 59 - Resistência de polarização (092) - corpo de prova úmido - 02/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

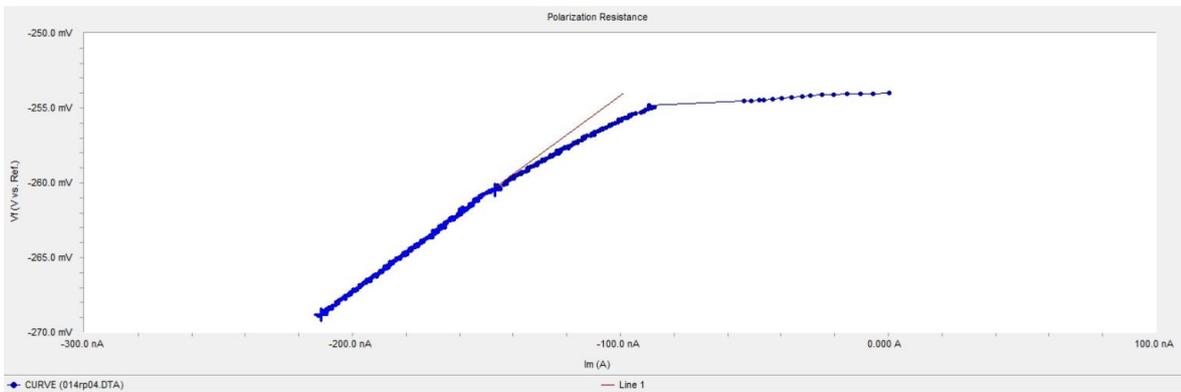
Corpos de prova 03/03/20 – secos

Figura 60 - Resistência de polarização (013) - corpo de prova seco - 03/03/20



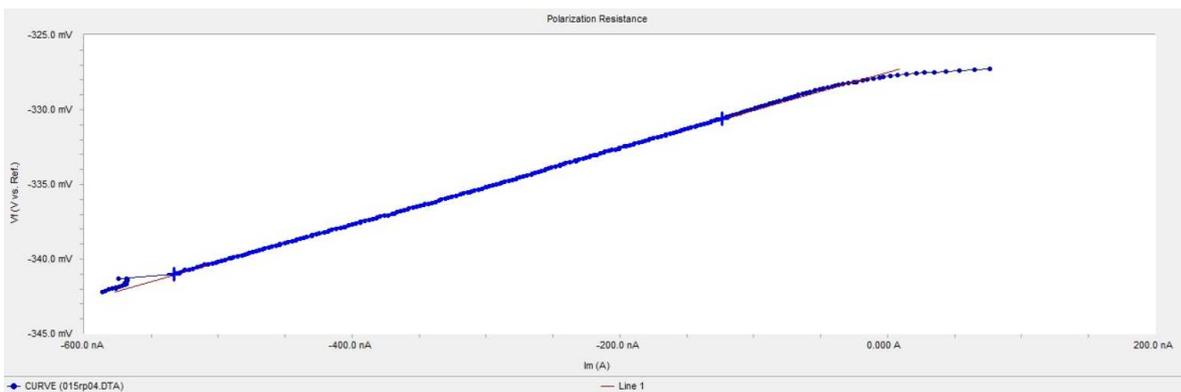
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 61- Resistência de polarização (014) - corpo de prova seco - 03/03/20



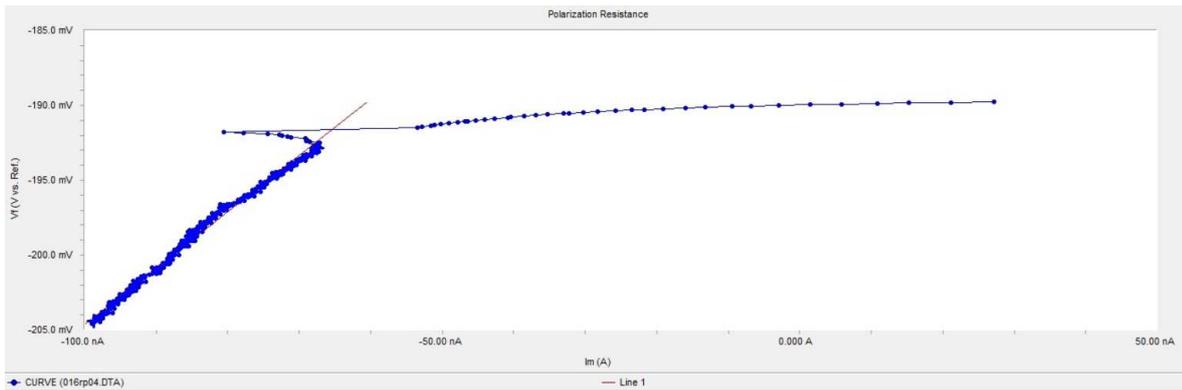
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 62- Resistência de polarização (015) - corpo de prova seco - 03/03/20



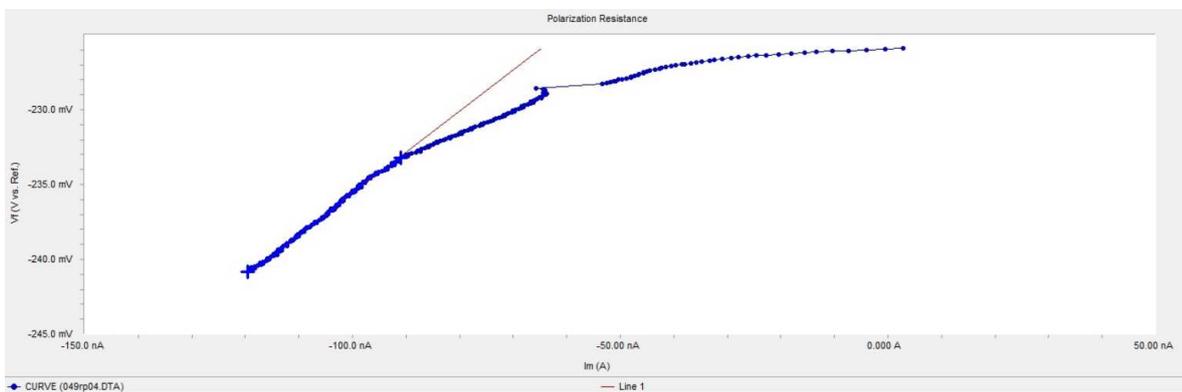
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 63- Resistência de polarização (016) - corpo de prova seco - 03/03/20



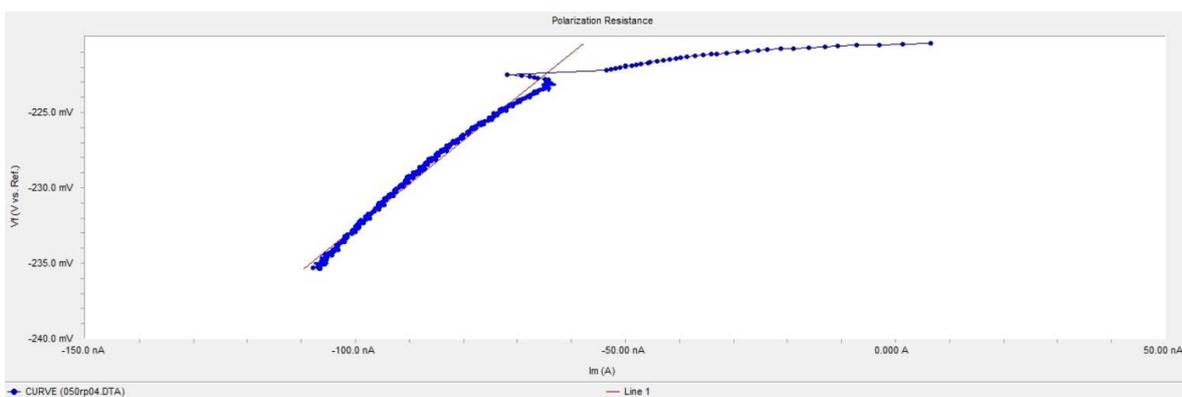
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 64- Resistência de polarização (049) - corpo de prova seco - 03/03/20



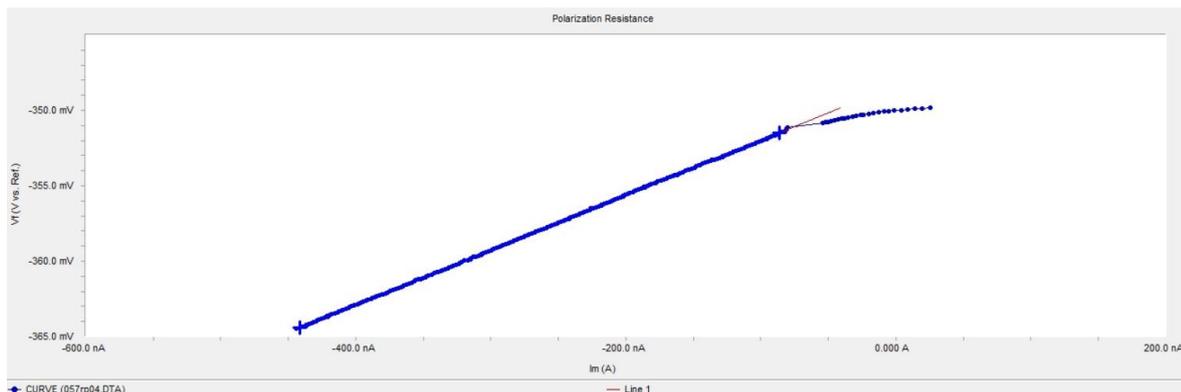
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 65- Resistência de polarização (050) - corpo de prova seco - 03/03/20



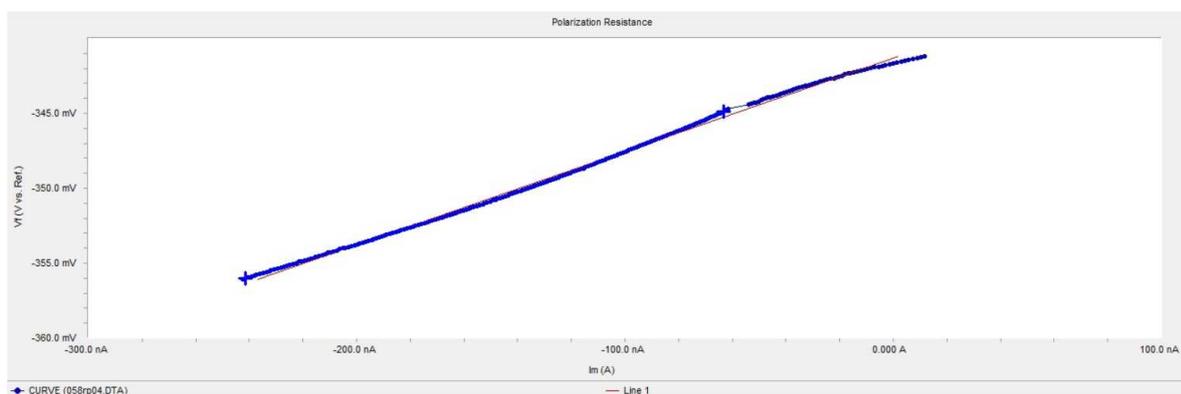
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 66- Resistência de polarização (057) - corpo de prova seco - 03/03/20



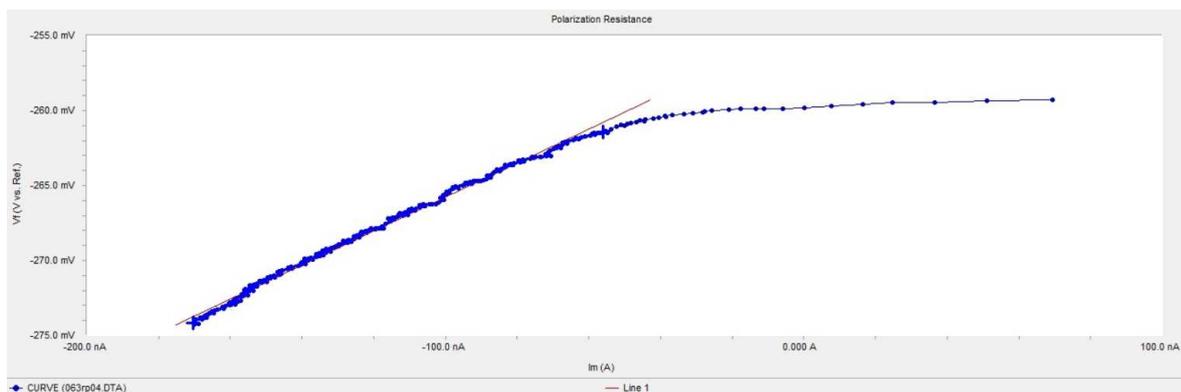
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 67- Resistência de polarização (058) - corpo de prova seco - 03/03/20



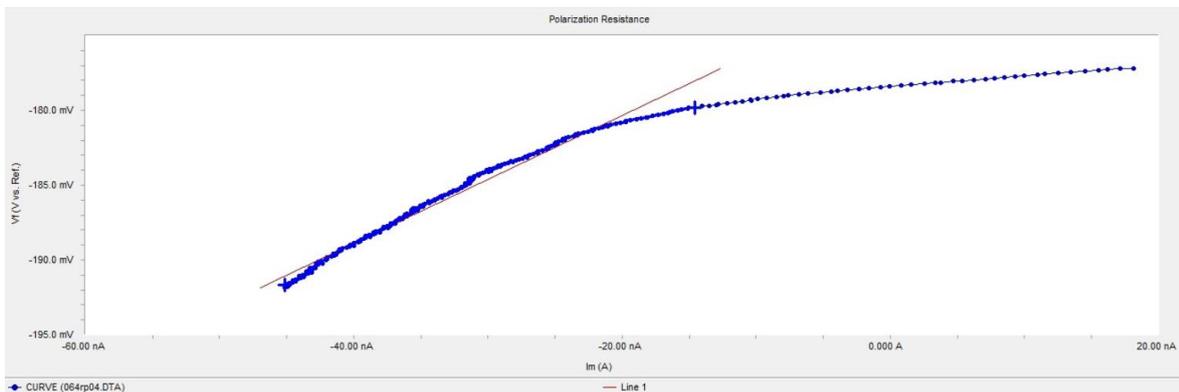
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 68- Resistência de polarização (063) - corpo de prova seco - 03/03/20



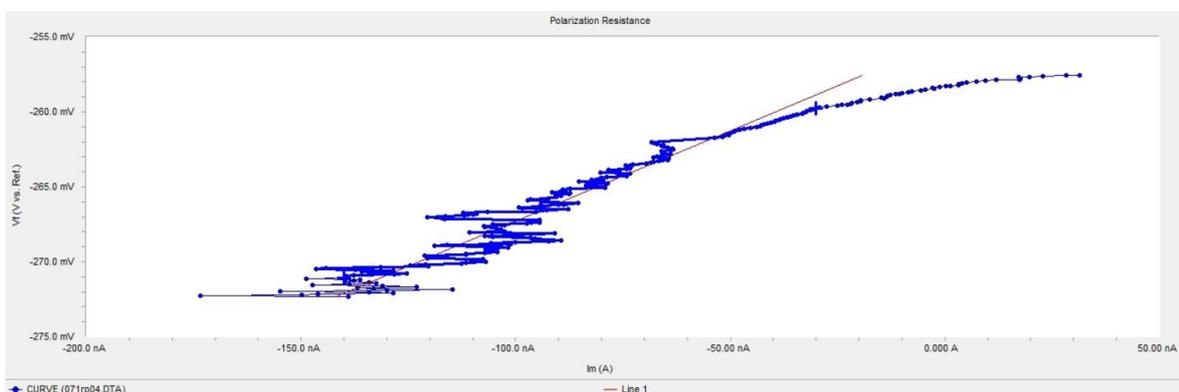
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 69- Resistência de polarização (064) - corpo de prova seco - 03/03/20



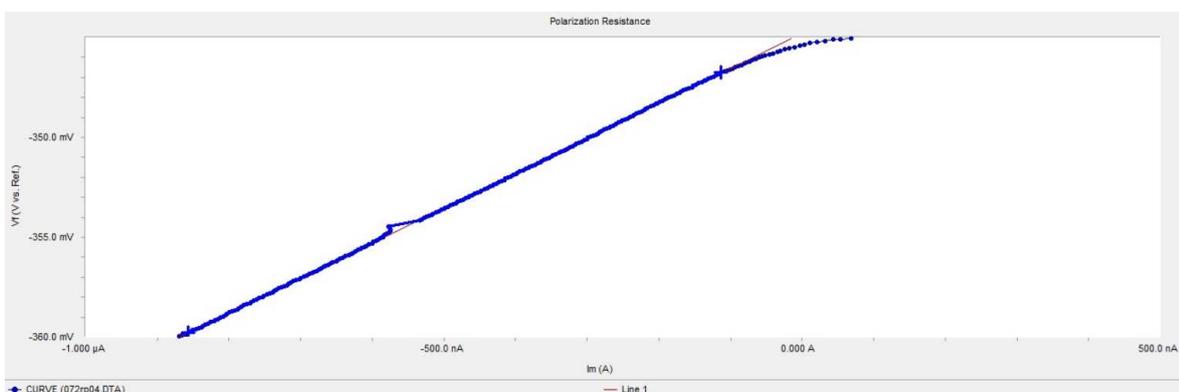
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 70- Resistência de polarização (071) - corpo de prova seco - 03/03/20



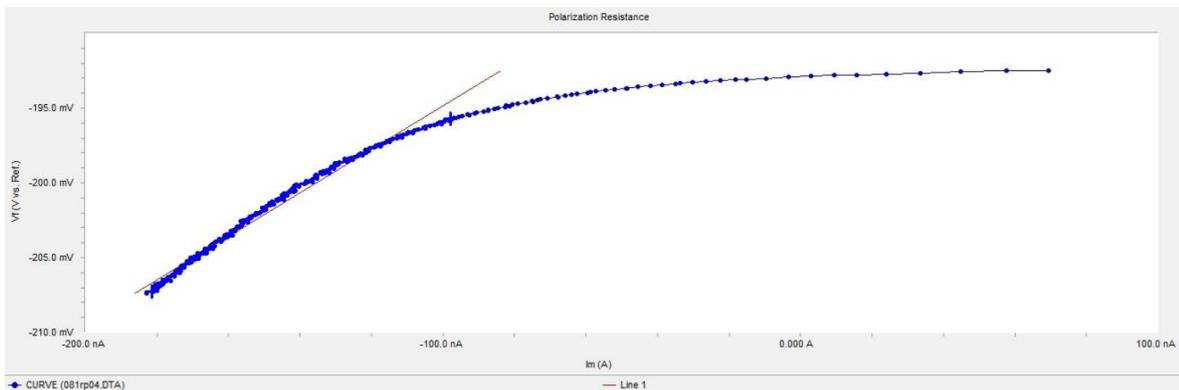
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 71- Resistência de polarização (072) - corpo de prova seco - 03/03/20



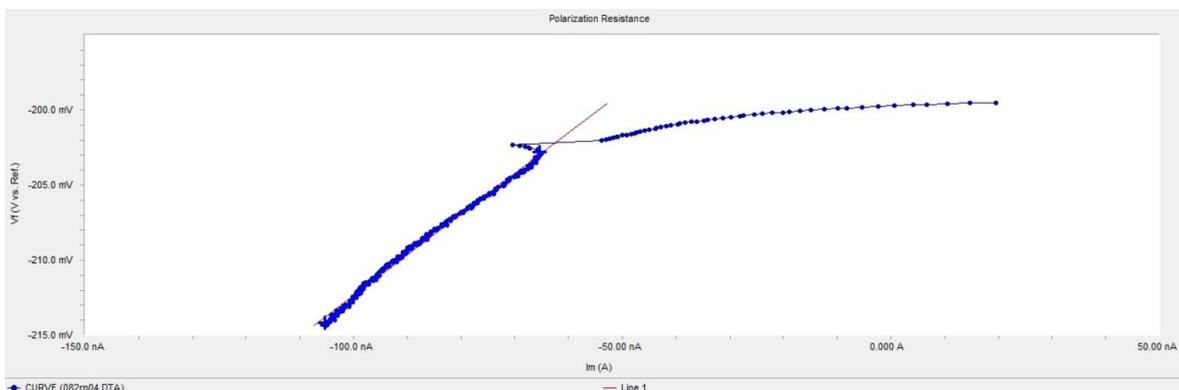
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 72- Resistência de polarização (081) - corpo de prova seco - 03/03/20



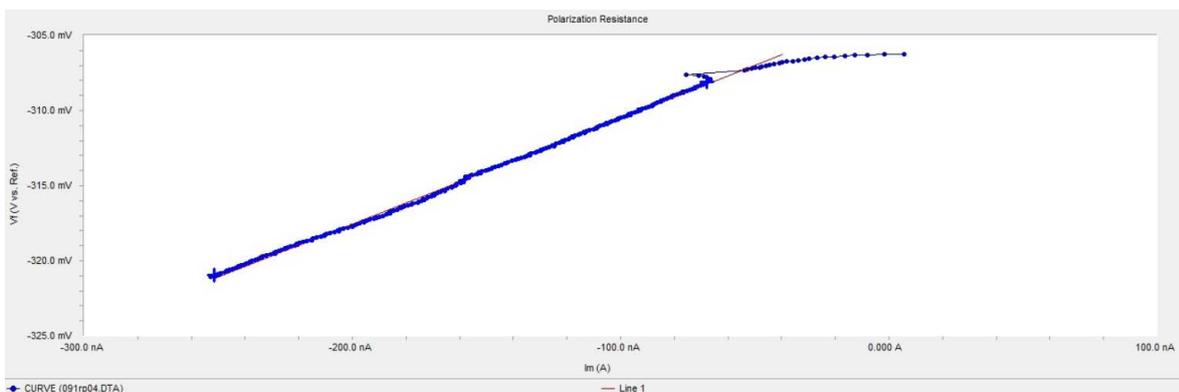
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 73- Resistência de polarização (082) - corpo de prova seco - 03/03/20



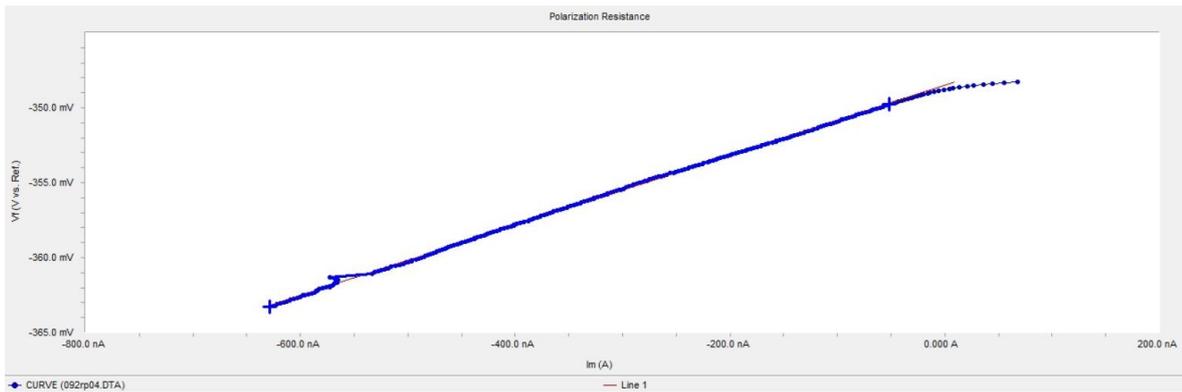
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 74- Resistência de polarização (091) - corpo de prova seco - 03/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

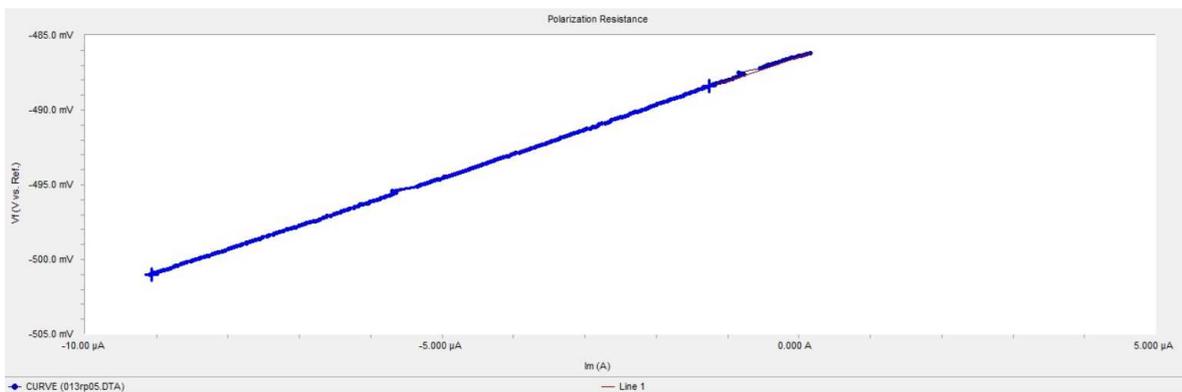
Figura 75- Resistência de polarização (092) - corpo de prova seco - 03/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

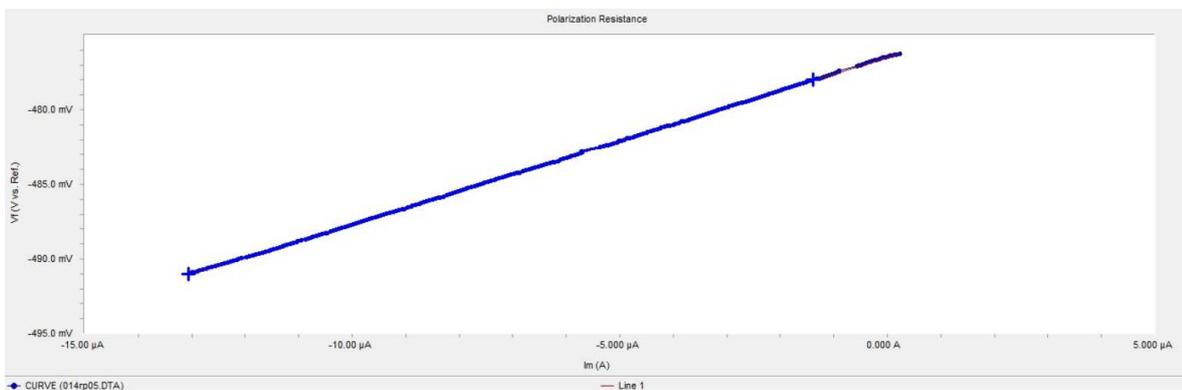
Corpos de prova 04/03/20 – úmidos

Figura 76- Resistência de polarização (013) - corpo de prova úmido 04/03/20



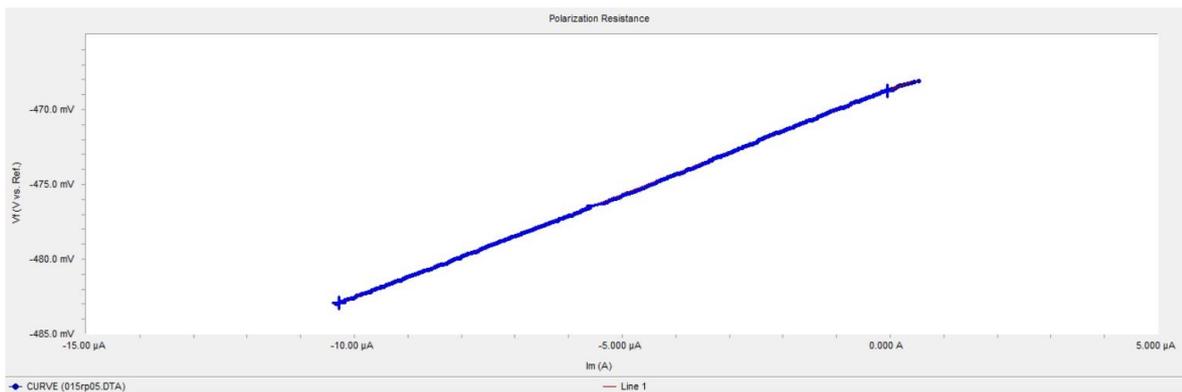
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 77- Resistência de polarização (014) - corpo de prova úmido 04/03/20



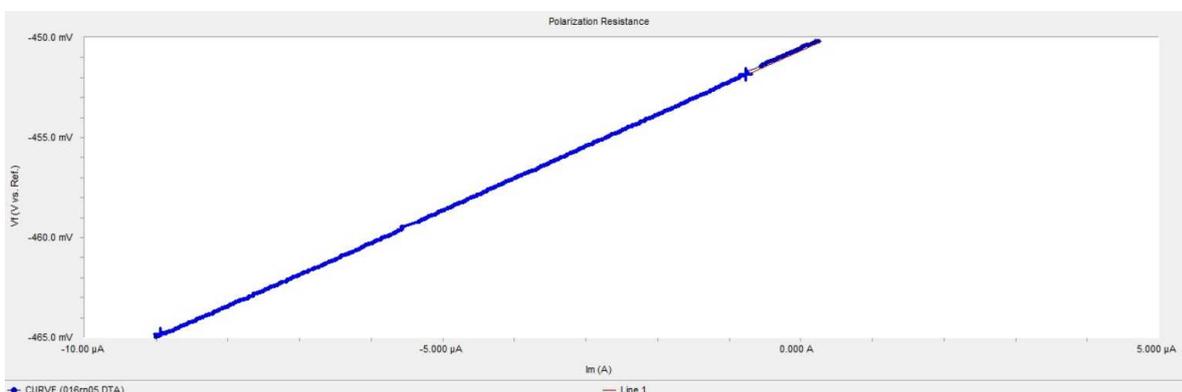
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 78- Resistência de polarização (015) - corpo de prova úmido 04/03/20



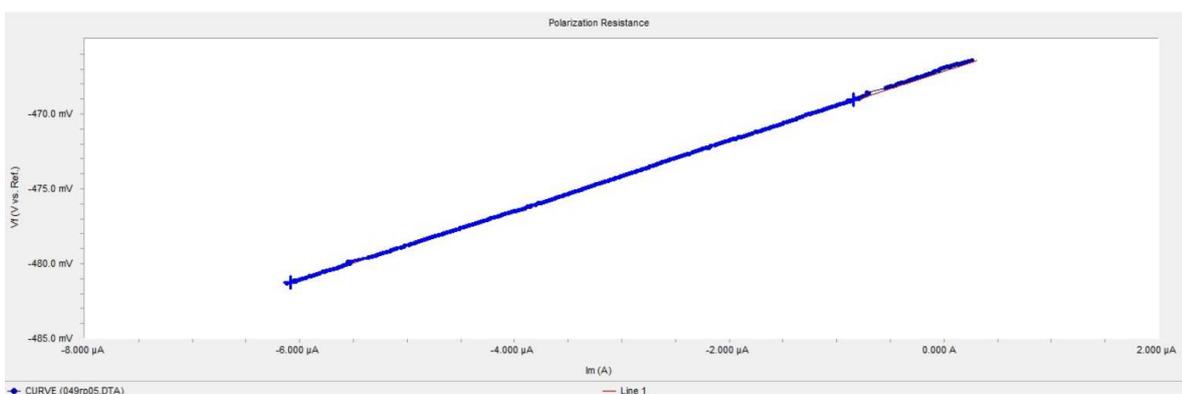
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 79- Resistência de polarização (016) - corpo de prova úmido 04/03/20



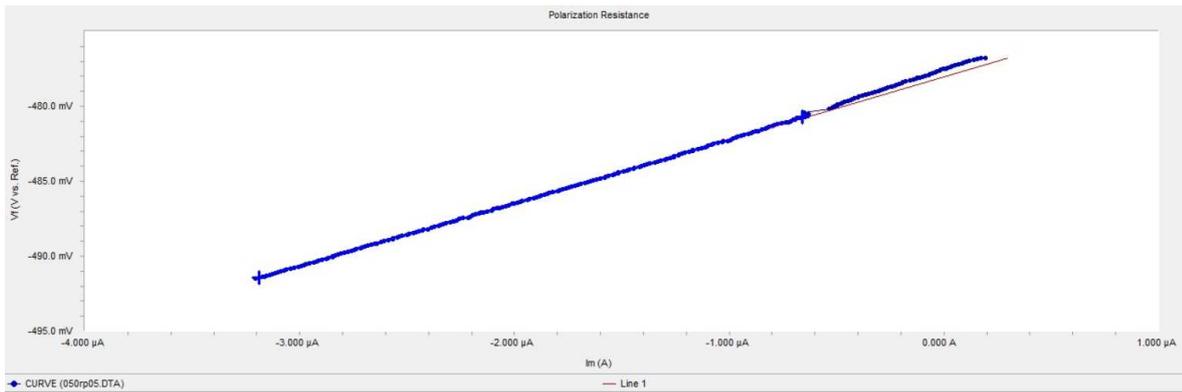
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 80- Resistência de polarização (049) - corpo de prova úmido 04/03/20



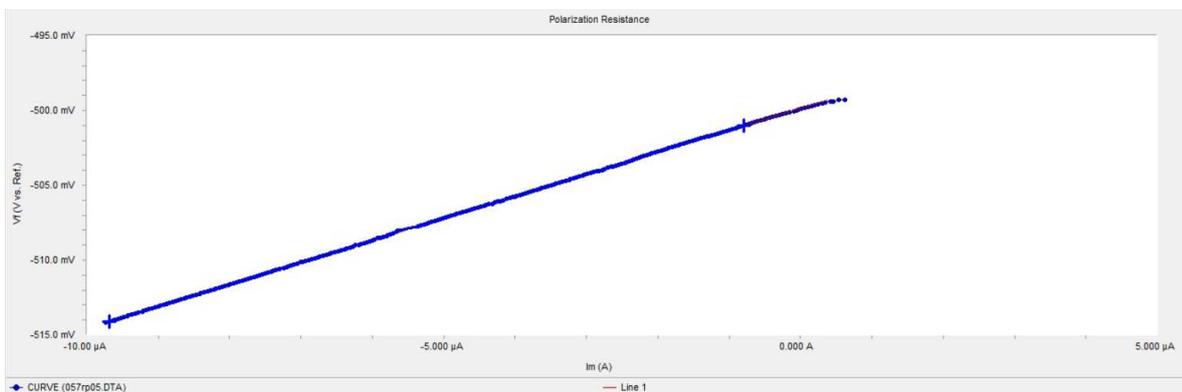
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 81- Resistência de polarização (050) - corpo de prova úmido 04/03/20



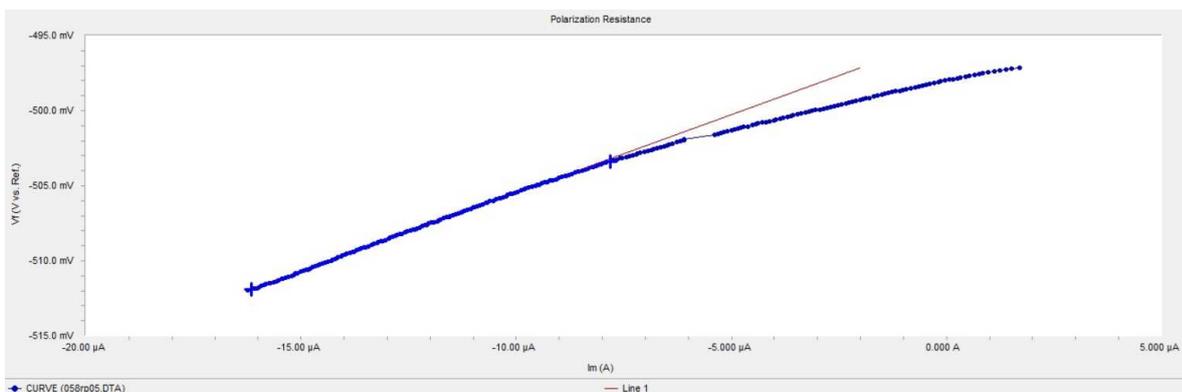
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 82- Resistência de polarização (057) - corpo de prova úmido 04/03/20



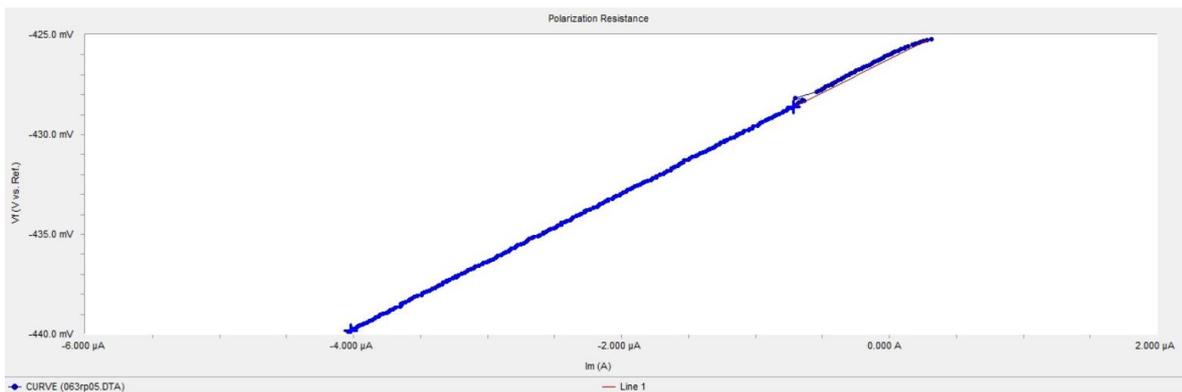
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 83- Resistência de polarização (058) - corpo de prova úmido 04/03/20



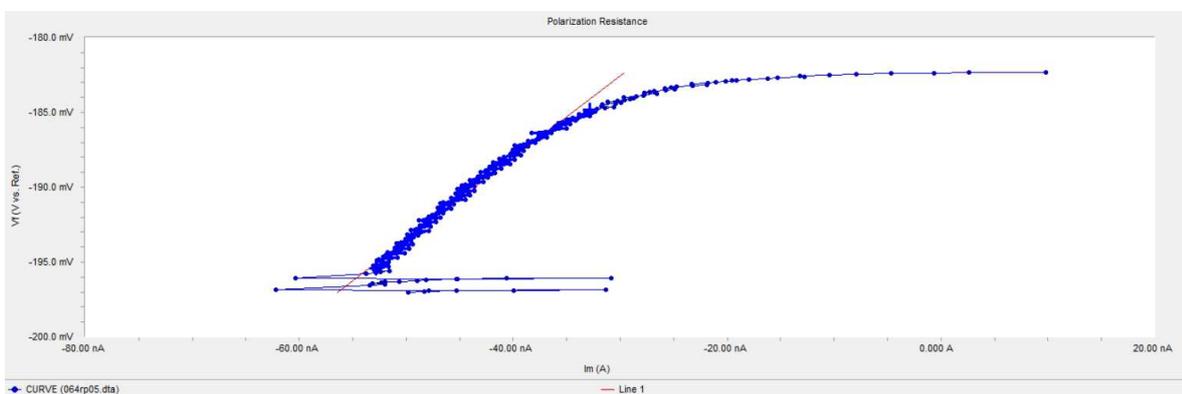
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 84- Resistência de polarização (063) - corpo de prova úmido 04/03/20



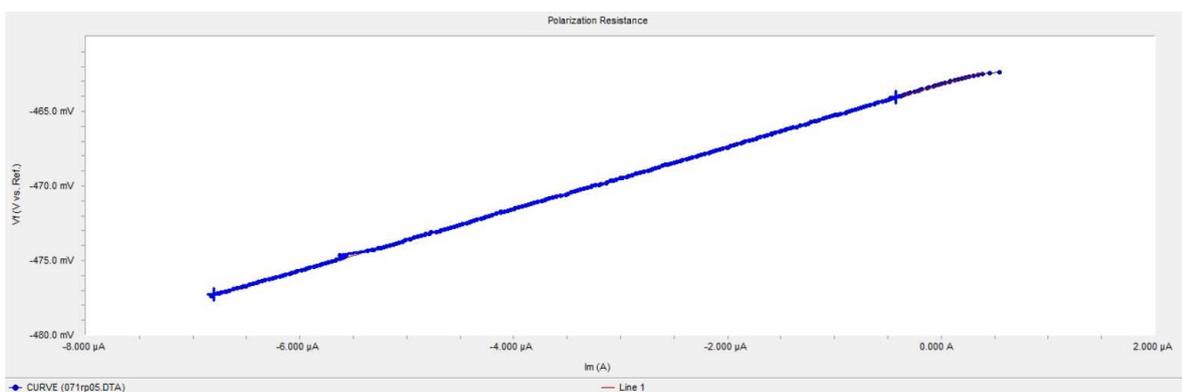
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 85- Resistência de polarização (064) - corpo de prova úmido 04/03/20



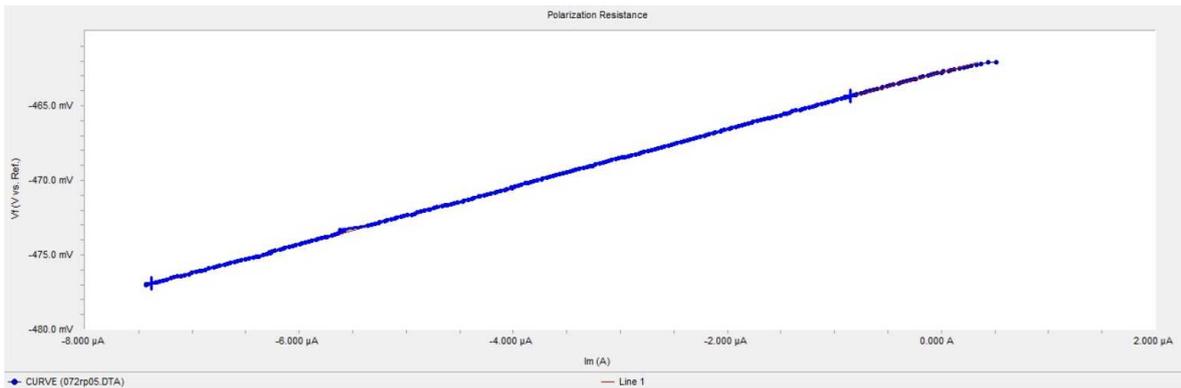
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 86- Resistência de polarização (071) - corpo de prova úmido 04/03/20



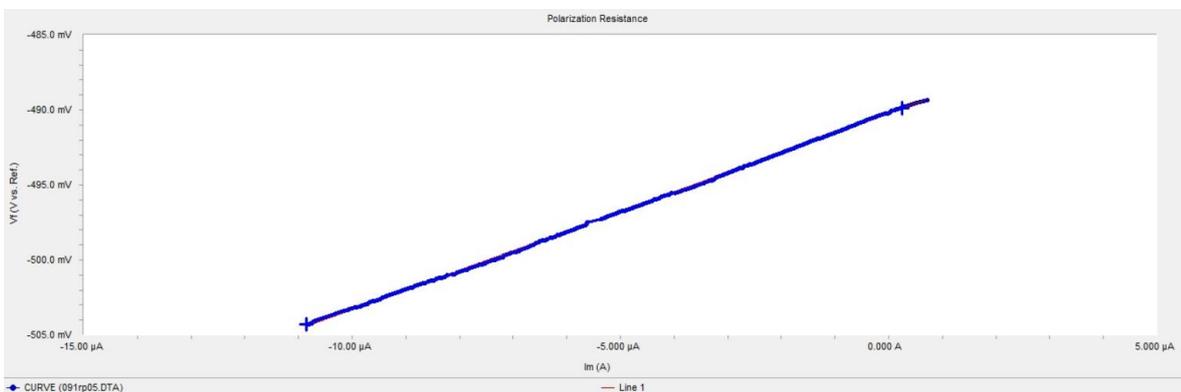
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 87- Resistência de polarização (072) - corpo de prova úmido 04/03/20



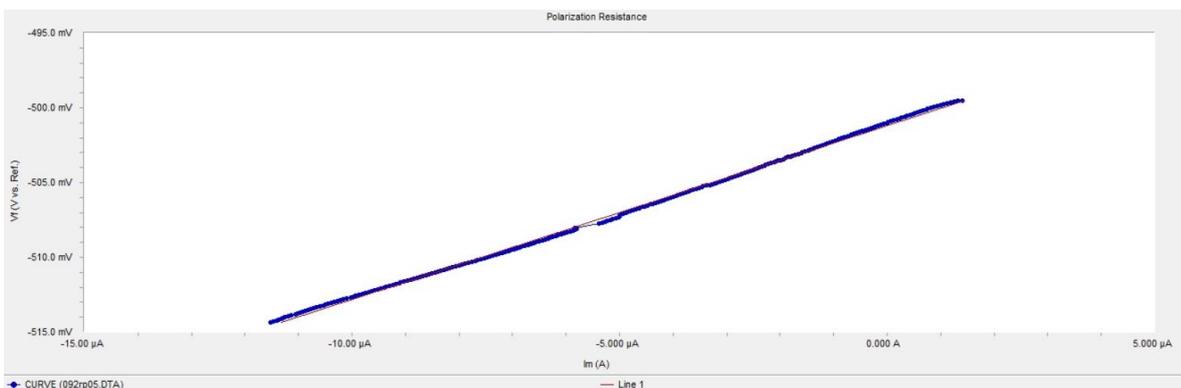
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 88- Resistência de polarização (091) - corpo de prova úmido 04/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

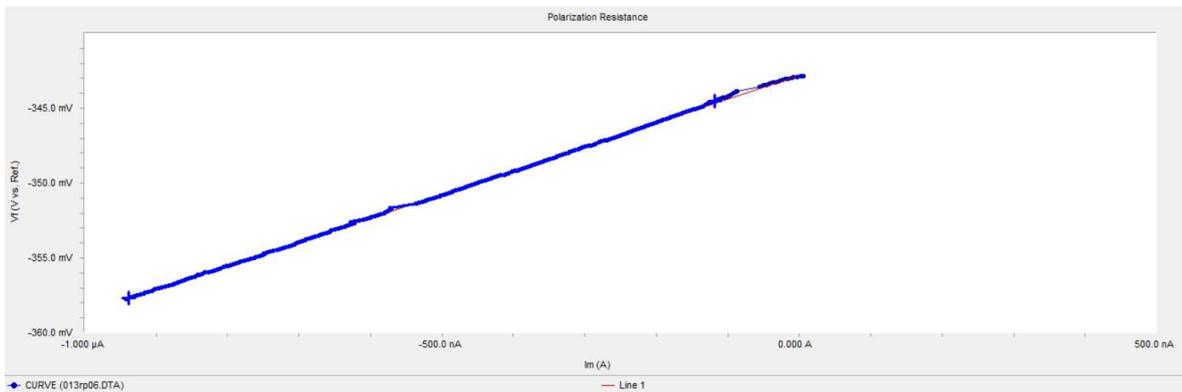
Figura 89- Resistência de polarização (092) - corpo de prova úmido 04/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

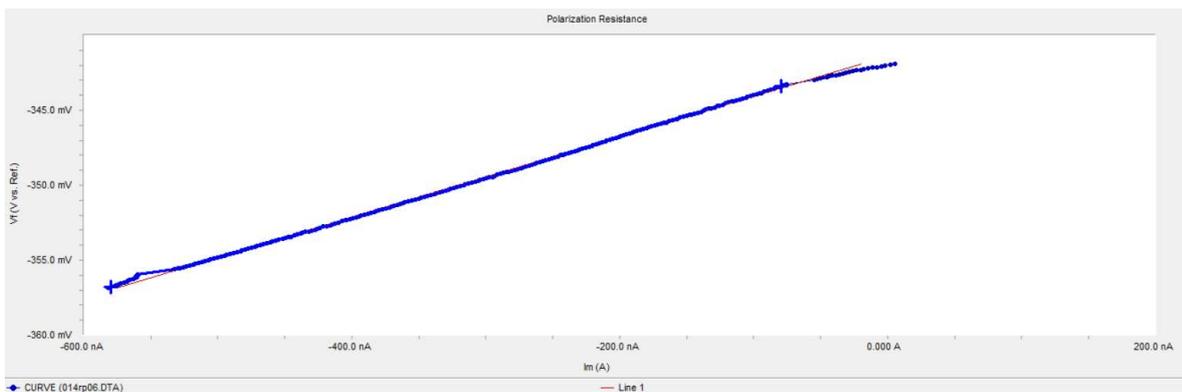
Corpos de prova 05/03/20 – secos

Figura 90- Resistência de polarização (013) - corpo de prova seco 05/03/20



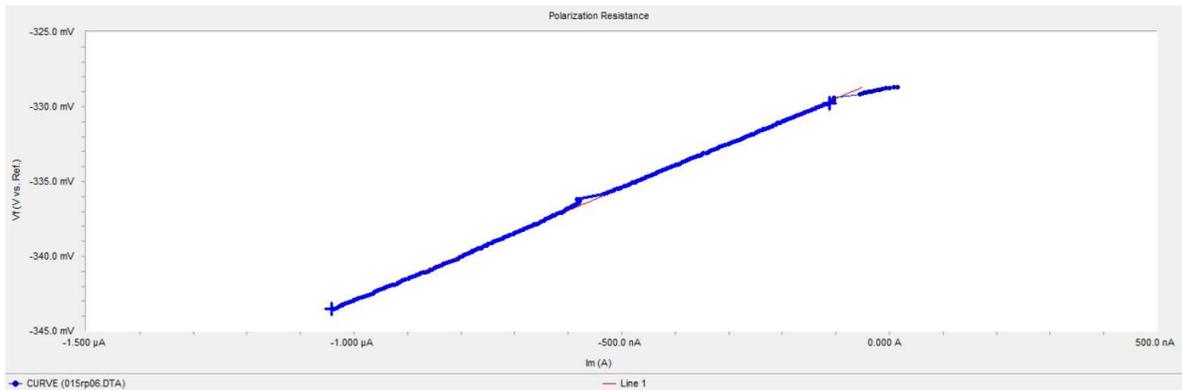
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 91- Resistência de polarização (014) - corpo de prova seco 05/03/20



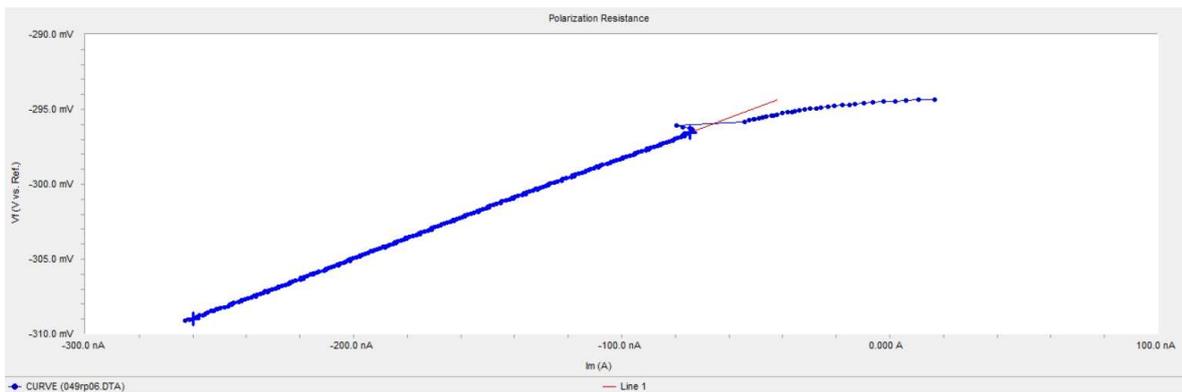
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 92- Resistência de polarização (015) - corpo de prova seco 05/03/20



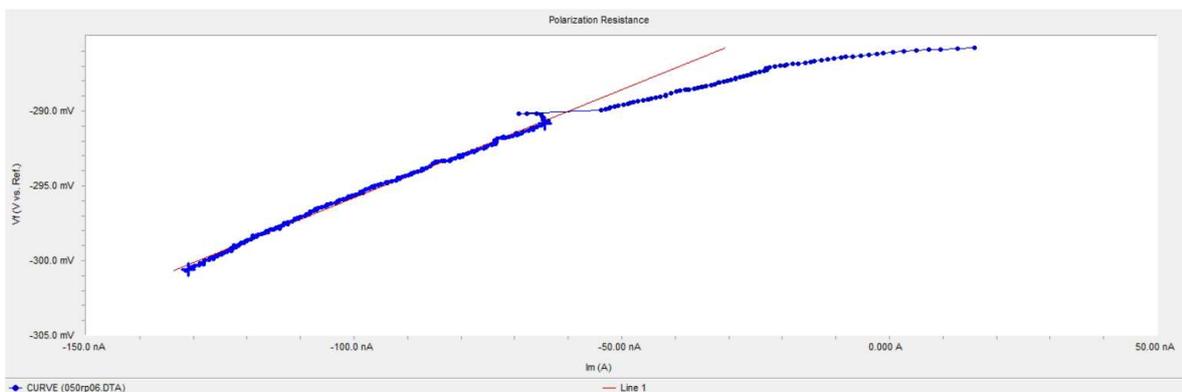
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 93- Resistência de polarização (049) - corpo de prova seco 05/03/20



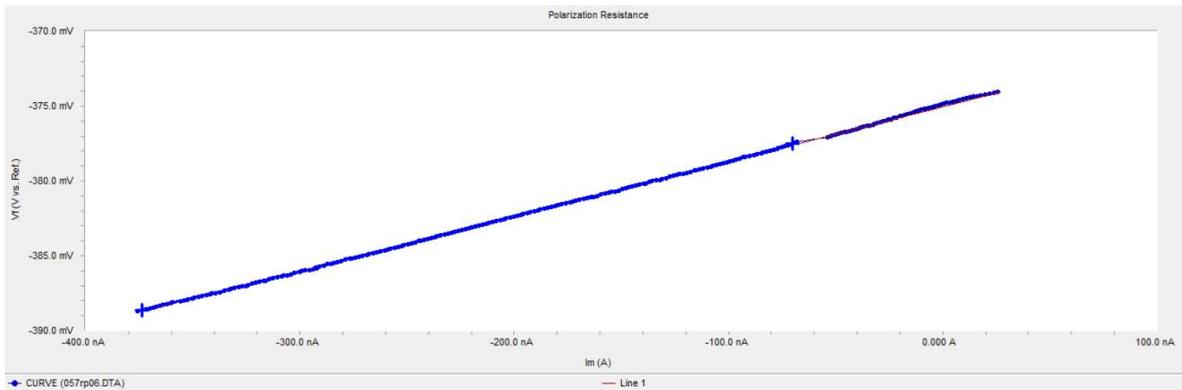
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 94- Resistência de polarização (050) - corpo de prova seco 05/03/20



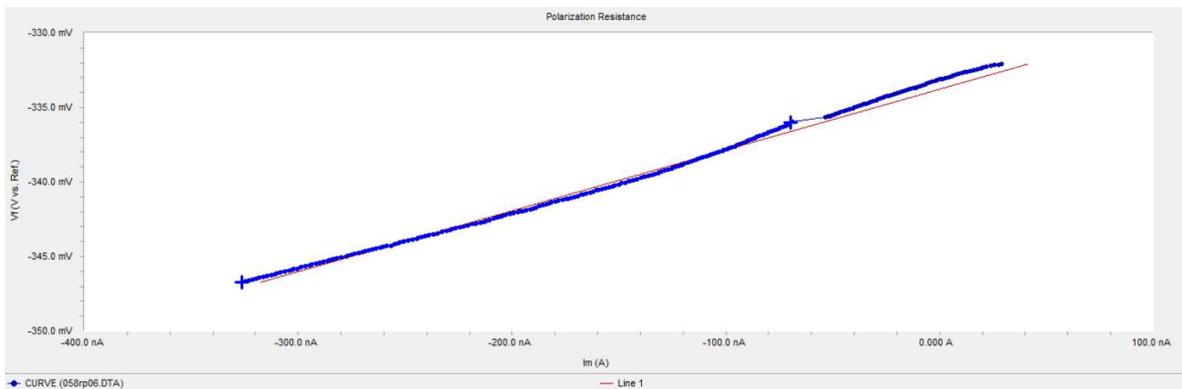
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 95- Resistência de polarização (057) - corpo de prova seco 05/03/20



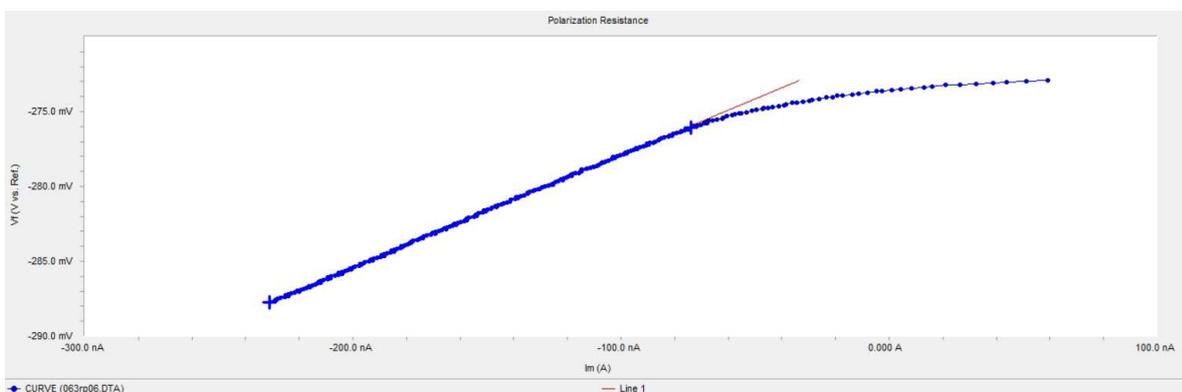
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 96- Resistência de polarização (058) - corpo de prova seco 05/03/20



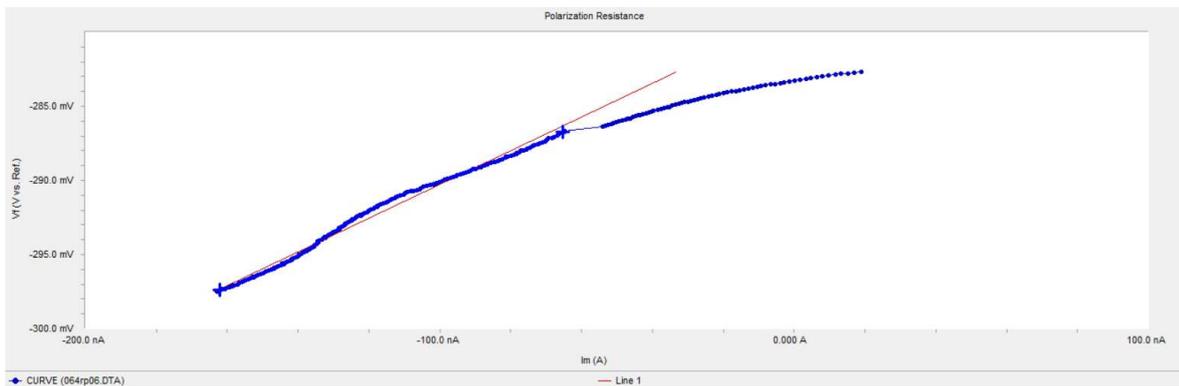
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 97- Resistência de polarização (063) - corpo de prova seco 05/03/20



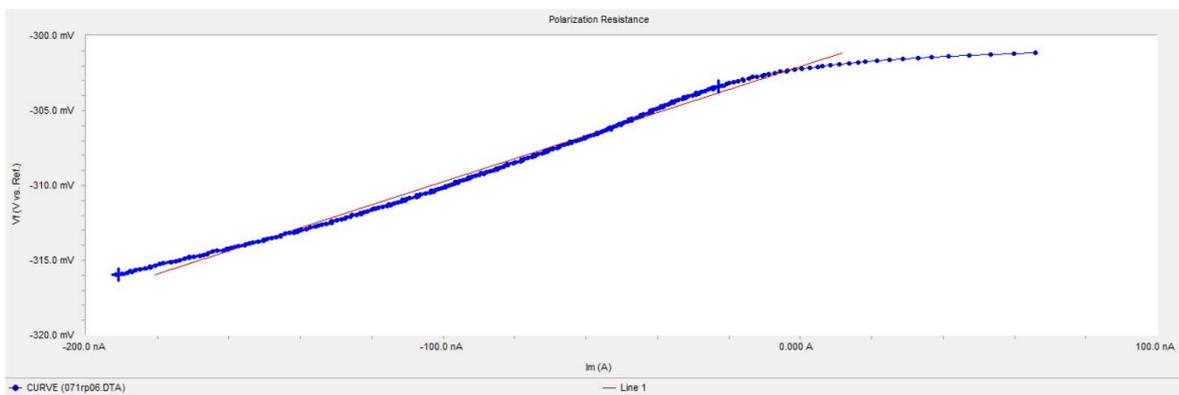
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 98- Resistência de polarização (064) - corpo de prova seco 05/03/20



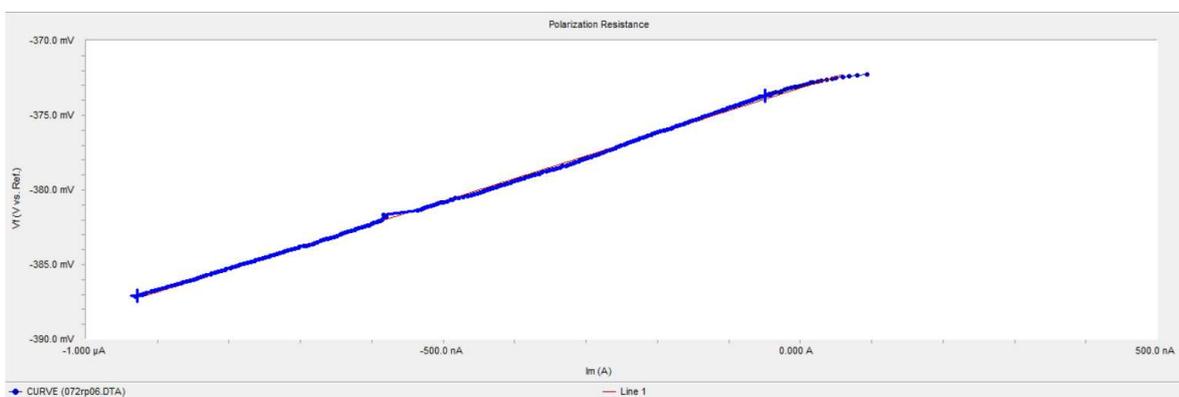
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 99- Resistência de polarização (071) - corpo de prova seco 05/03/20



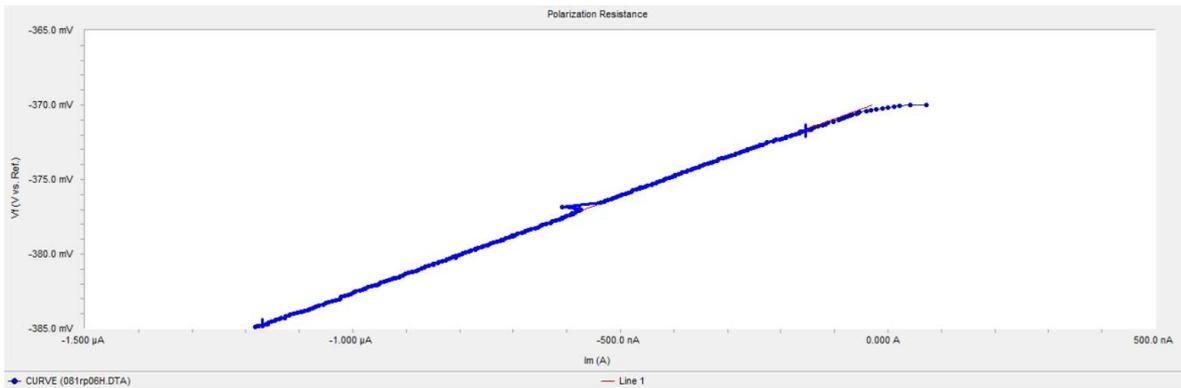
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 100- Resistência de polarização (072) - corpo de prova seco 05/03/20



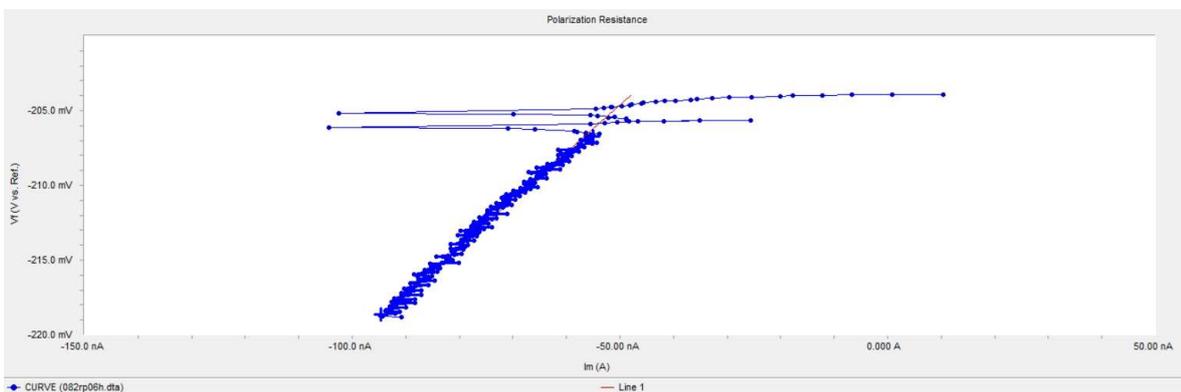
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 101- Resistência de polarização (081) - corpo de prova seco 05/03/20



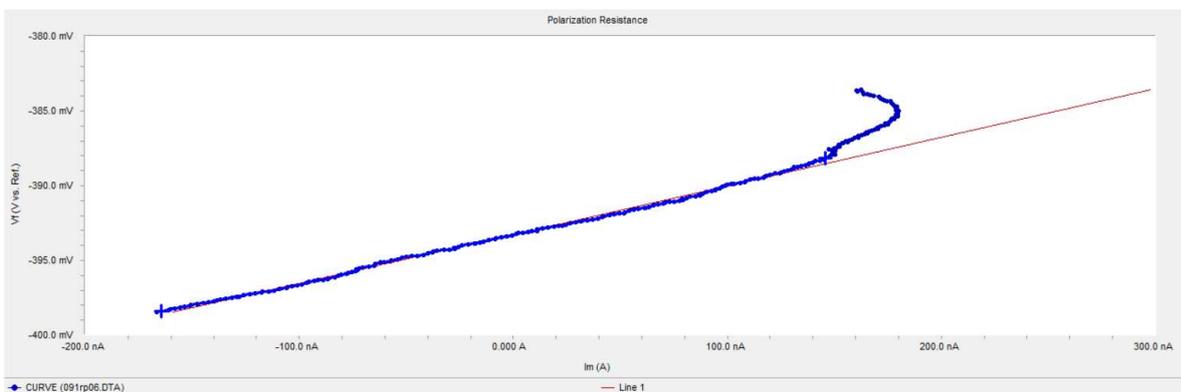
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 102- Resistência de polarização (082) - corpo de prova seco 05/03/20



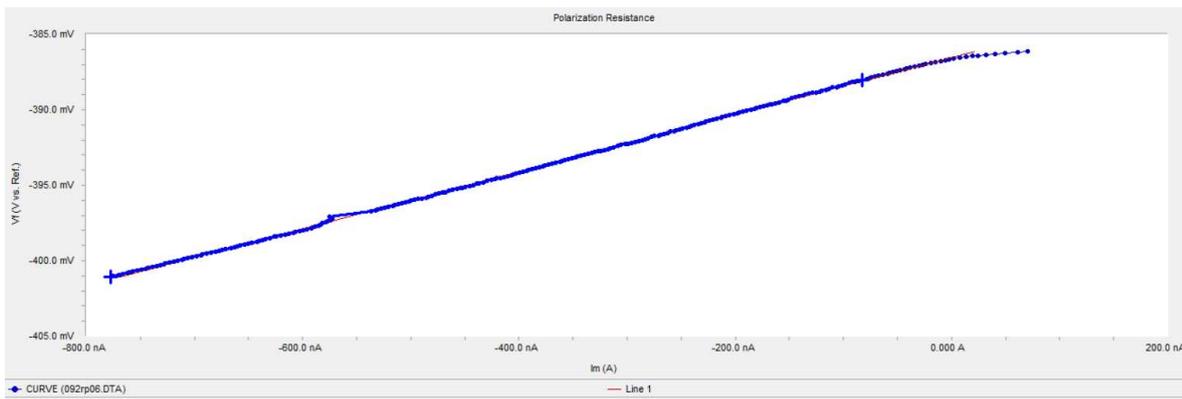
Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 103- Resistência de polarização (091) - corpo de prova seco 05/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

Figura 104- Resistência de polarização (092) - corpo de prova seco 05/03/20



Fonte: Elaboração da autora, (2020)

APÊNDICE C – CUSTO OPERACIONAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

Tabela 14 - Custo médio operacional da lavoura de cana-de-açúcar em reais (R\$)

ASSOCANA
Departamento Agrícola
I- CONSERVAÇÃO DE SOLO

OPERAÇÃO/PRODUTO	DESCRIÇÃO	CUSTO/UNIDADE	INDICADOR	OPERACIONAL	TOTAL (R\$/HA)
1 CONSTRUÇÃO CURVAS	MOTONIVELADORA	170,00	0,50	HORA/HA	85,00
2 TERRACEAMENTO	TRATOR 180 CV	170,00	0,80	HORA/HA	136,00
3 CONSTRUÇÃO CARREADOR	MOTONIVELADORA	170,00	0,40	HORA/HA	68,00
4 SERVIÇOS TOPOGRÁFICOS	MANUAL	118,64	0,20	DH/HA	23,73
5 SUB-TOTAL					312,73
6 ADMINISTR.(10,00%)					31,27
TOTAL					344,00

II- PREPARO DE SOLO

OPER./PROD.	DESCRIÇÃO	CUSTO/UNID.	INDICADOR OPERACIONAL	TOTAL (R\$/HA)
1 GRADE PESADA	TR 180CV + IMPL.	102,47	0,94 h / ha.	96,33
2 SUBSOLAGEM	TR 180CV + IMPL.	102,47	1,20 h / ha.	122,97
3 GRADE INTERMEDIÁRIA	TR 180CV + IMPL.	101,07	0,66 h / ha.	66,71
4 GRADE NIVELADORA	TR 180CV + IMPL.	98,04	0,52 h / ha.	50,98
5 APLIC. CORRETIVOS (3X)	TR 100CV+ M.O.+IMPL.	100,59	0,50 h / ha.	50,30
6 CALCÁRIO	DOLOMÍTICO	105,00	2,00 t / ha	210,00
7 GESSO	GESSO AGRÍCOLA	110,00	1,00 t / ha	110,00
8 SUB-TOTAL				707,28
9 ADMINISTR.(10,00%)				38,73
TOTAL				746,01

III- PLANTIO

OPER./PROD.	DESCRIÇÃO	CUSTO/UNID.	INDICADOR OPERACIONAL	TOTAL (R\$/HA)
1 SULCAÇÃO	TR 180CV + IMPL.	190,00	0,98 h / ha.	186,20
2 ADUBO	05.25.25	1.289,00	0,50 t / ha	644,50
3 CORTE DE MUDA (Limpa)	MÃO-DE-OBRA	23,00	16,00 t / ha	368,00
4 MUDA	CANA - (1,5 : 1)	116,61	16,00 t / ha	1.865,69
5 CARREG/DESCARR. MUDA	CARREG. 85CV	8,00	16,00 t / ha	128,00
6 TRANSP. MUDA	MB 23-18 (5,0KM)	12,00	16,00 t / ha	192,00
7 ESPAR./REPICAGEM	MÃO-DE-OBRA	77,77	6,00 M.O. / ha.	466,61
8 ACABAM. E RECOBR.	MÃO-DE-OBRA	65,65	3,00 M.O. / ha.	196,94
9 COBRIÇÃO/INSETICIDA	TR 100CV+ M.O.+IMPL.	110,00	0,57 h / ha.	62,70
10 INSETICIDA SOLO	REGENT 800WG	350,00	0,25 kg / ha	87,50
11 APLIC. HERBICIDA	TR 100CV+ M.O.+IMPL.	110,00	0,60 h / ha.	66,00
12 HERBICIDA 1	THEBUTIURON (2,4 L/HA)	41,00	2,40 L / ha.	98,40
13 HERBICIDA 2	AMETRINA (3,0L/HA)	15,00	3,00 L / ha.	45,00
14 CONTROLE DE BIOLÓGICO	COTÉSIA	4,10	5,00 copos / ha	20,50

15 LIBERAÇÃO COTESIA	MÃO-DE-OBRA	6,75	5,00 copos / ha	33,75
16 CARPA	MÃO-DE-OBRA	80,00	2,00 M.O. / ha.	160,00
17 QUEBRA-LOMBO	TR 100CV+ M.O.+IMPL.	110,00	0,68 h / ha.	74,80
18 SUB-TOTAL				4.696,58
19 ADMINISTR.(10,00%)				193,50
TOTAL				4.890,08

COLHEITA MECANIZADA CRUA

OPER./PROD.	DESCRIÇÃO	CUSTO/UNID.	INDICADOR OPERACIONAL	TOTAL (R\$/HA)
1 CORTE	COLHEDORA UMA LINHA	16,00	84,00	t / ha 1.344,00
2 TRANSBORDO	TRATOR + TRANSB.	3,50	84,00	t / ha 294,00
3 TRANSPORTE	CANA PICADA (22 KM)	5,10	84,00	t / ha 428,40
4 SUB-TOTAL				2.066,40
5 ADMINISTR.(10,00%)				206,64
TOTAL				2.273,04

MANUTENÇÃO DE SOQUEIRA

OPER./PROD.	DESCRIÇÃO	CUSTO/UNID.	INDICADOR	OPERACIONAL	TOTAL (R\$/HA)
1 DESENLEIRAMENTO	TR 100CV+ IMPL.	110,00	0,26	h / ha.	28,60
2 CULTIVO	TR 180CV + IMPL.	170,00	0,75	h / ha.	127,50
3 ADUBO	25-00-25	1.115,00	0,40	t / ha	446,00
4 CALCÁRIO	DOLOMÍTICO	105,00	2,00	t / ha	210,00
5 APLIC. CALCÁRIO	TR 100CV+ M.O.+ IMPL.	125,00	0,50	h / ha.	62,50
6 APLIC.HERBICIDA	TR 100CV+ IMPL. PULVERIZADOR	110,00	0,60	h / ha.	66,00
7 HERBICIDA 1	PLATEAU	500,00	0,14	kg/ ha	70,00
8 HERBICIDA 2	PROVENCE	600,00	0,14	kg/ ha	84,00
9 CONTROLE DE BROCAS	COTÉSIA FLAVIPS	4,10	5,00	copos / ha	20,50
10 LIBERAÇÃO DE COTESIA	DISTRIBUIÇÃO	0,06	61,27	R\$ / diária	3,68
11 INSETICIDA CIGARRINHA	INSETICIDA	89,00	2,00	kg / ha	178,00
12 APLIC.INSETICIDA	TR 100CV+ IMPL. PULVERIZADOR	110,00	0,60	h / ha.	66,00
13 INSETICIDA SPHENOPHORUS	INSETICIDA	110,00	1,70	L / ha	187,00
14 CORTE DE SOQUEIRA	TR 100CV+ IMPL. CORTE SOQ.	110,00	0,45	h / ha.	49,50
15 CARPA	MÃO-DE-OBRA	80,00	2,00	M.O. / ha.	160,00
16 SUB-TOTAL					1.759,28
17 ADMINISTR.(10,00%)					56,38
TOTAL					1.815,65

CUSTO MÉDIO / HA (05 CORTES)

1 CONSERV, PREP. E PLANTIO	1X	5.980,09	R\$	5.980,09
2 COLHEITA (crua)	5X	2.273,04	R\$	11.365,20
3 MANUT. SOQUEIRA	4X	1.815,65	R\$	7.262,62
TOTAL (R\$)				24.607,90
			: 5	4.921,58

Vlr. ton. de cana c/ 133,02 Kg ATR

a R\$ 0,5844 Kg c/ Pis Cofins =R\$

Vlr./ton. já c/ os desc. legais

777,369

745,489

N. TON./HA

(Méd. 05 Cortes)

66,02