

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GLEICY LOANY DE ALENCAR CARDOSO

**PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E MICROESTRUTURA DE UM
SOLO LATERÍTICO ARENOSO CONTAMINADO COM ÓLEO
DIESEL E TRATADO COM CINZA LEVE DO BAGAÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR (CBCA)**

MARINGÁ
2024

GLEICY LOANY DE ALENCAR CARDOSO

**PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E MICROESTRUTURA DE UM
SOLO LATERÍTICO ARENOSO CONTAMINADO COM ÓLEO
DIESEL E TRATADO COM CINZA LEVE DO BAGAÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR (CBCA)**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof^a. Juliana Azoia Lukiantchuki

MARINGÁ
2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

C268p

Cardoso, Gleicy Loany de Alencar

Propriedades geotécnicas e microestrutura de um solo laterítico arenoso contaminado com óleo diesel e tratado com cinza leve do bagaço da cana-de açúcar (CBCA) / Gleicy Loany de Alencar Cardoso. -- Maringá, PR, 2024.

178 f. : il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

1. Solo - Contaminação - Óleo diesel. 2. Solo - Tratamento - Cinza do bagaço da cana-de açúcar. 3. Atividade pozolânica. 4. Riscos ambientais. I. Lukiantchuki, Juliana Azoia , orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Exatas. Departamento de Ciências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

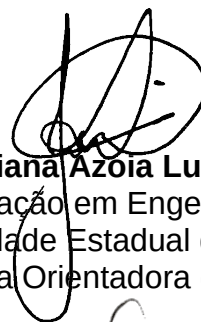
CDD 23.ed. 628

GLEICY LOANY DE ALENCAR CARDOSO

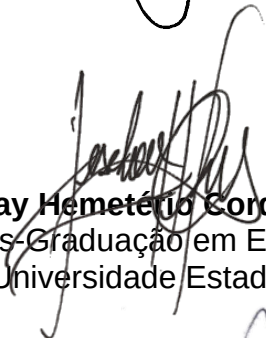
**PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E MICROESTRUTURA DE UM SOLO
LATERÍTICO ARENOSO CONTAMINADO COM ÓLEO DIESEL E TRATADO
COM CINZA LEVE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR (CBCA)**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 18/09/2024, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

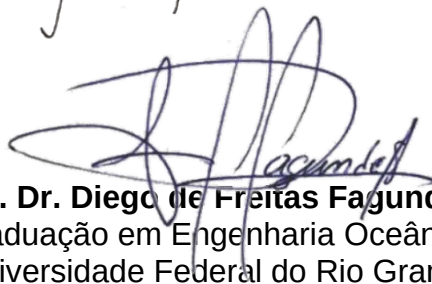
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professora Orientadora de Estudos



Prof. Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Diego de Freitas Fagundes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Universidade Federal do Rio Grande

AGRADECIMENTOS

À Deus, por guiar meus passos e iluminar meu caminho em todos os momentos dessa jornada.

À Universidade Estadual de Maringá, por proporcionar um ambiente acadêmico estimulante e pelas oportunidades oferecidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha orientadora, Professora Juliana Azoia Lukiantchuki, pela orientação incansável, paciência e valiosas contribuições ao longo de todo o processo. Sua dedicação e apoio foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Ao GEMA - Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente, aos professores Paulo Pereira e Alexandre Urbano, do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, pelo suporte técnico, científico, pela disponibilidade do equipamento e infraestrutura necessários para a realização dos ensaios experimentais.

Aos funcionários de todos os laboratórios envolvidos, cuja disposição, competência e empenho foram essenciais para a concretização deste estudo, e a Renuka Vale do Ivaí, pela doação da cinza leve do bagaço de cana-de-açúcar.

Aos meus familiares, por todo o amor, compreensão e incentivo em cada etapa desse percurso. Aos amigos, colegas de curso e a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, meu profundo agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O vazamento de tanques de armazenamento subterrâneo de combustível representa riscos ambientais para o solo, a água e o ar, uma vez que se caracterizam como fonte potencial de contaminação. Além disso, a contaminação por hidrocarbonetos de petróleo provoca mudanças adversas nas propriedades físicas, químicas e geotécnicas dos solos. O uso de estabilizantes químicos podem melhorar o comportamento mecânico do solo através do aumento da capacidade de troca catiônica, floculação das partículas e reações pozolânicas. Neste contexto, levando em consideração a alta produção de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), que pode chegar a milhões de toneladas por safra, e considerando também que se trata de um resíduo classificado como inerte e com propriedades pozolânicas, este estudo visa avaliar a viabilidade do emprego da CBCA para fins de tratamento de solo contaminado com óleo diesel. Os ensaios experimentais abrangeram a caracterização geotécnica de solos contaminados com 2%, 4%, 6% e 8% de óleo diesel, e posteriormente tratados com 10%, 20% e 30% de CBCA, além de uma amostra de controle contendo solo natural e 20% de CBCA. Os resultados indicaram que a adição de CBCA reduziu significativamente a resistência à compressão simples (RCS) das amostras. Para solos contaminados com 8% de óleo diesel e tratados com 20% de CBCA, houve uma redução na RCS de até 61% para 56 dias de cura, o que foi atribuído ao aumento da porosidade e do índice de vazios das misturas, conforme evidenciado pelas análises de microscopia eletrônica de varredura e caracterização física dos corpos de prova. Além disso, observou-se que o pH das amostras tratadas com CBCA estava abaixo do pH recomendado para o desenvolvimento de reações pozolânicas. Nos ensaios de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a CBCA não demonstrou ser eficaz na imobilização dos compostos orgânicos presentes no óleo diesel, pois não houve redução significativa nos picos representativos dos hidrocarbonetos nas amostras tratadas. Assim, embora a CBCA possua propriedades pozolânicas, sua aplicação nas condições estudadas não foi eficiente para o tratamento de solos contaminados com óleo diesel, especialmente em termos de resistência a compressão simples e imobilização de contaminantes. Recomenda-se a moagem da CBCA para reduzir o tamanho das partículas, bem como sua combinação com outros estabilizantes, como cimento ou cal, para melhorar a eficácia do tratamento.

Palavras-chaves: Solo contaminado. Óleo diesel. Tratamento. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Atividade Pozolânica.

ABSTRACT

Leakage from underground fuel storage tanks poses environmental risks to soil, water and air, as they are characterized as a potential source of contamination. In addition, contamination by petroleum hydrocarbons causes adverse changes in the physical, chemical and geotechnical properties of soils. The use of chemical stabilizers can improve the mechanical behavior of soil by increasing cation exchange capacity, particle flocculation and pozzolanic reactions. In this context, taking into account the high production of sugarcane bagasse ash (SCBA), which can reach millions of tons per harvest, and also considering that it is a residue classified as inert and with pozzolanic properties, this study aims to evaluate the feasibility of using SCBA for the treatment of soil contaminated with diesel oil. The experimental tests included the geotechnical characterization of soils contaminated with 2%, 4%, 6% and 8% diesel oil, and subsequently treated with 10%, 20% and 30% SCBA, in addition to a control sample containing natural soil and 20% SCBA. The results indicated that the addition of SCBA significantly reduced the simple compressive strength (SCR) of the samples. For soils contaminated with 8% diesel oil and treated with 20% SCBA, there was a reduction in SCR of up to 61% for 56 days of curing, which was attributed to the increase in porosity and void index of the mixtures, as evidenced by scanning electron microscopy analyses and physical characterization of the specimens. In addition, it was observed that the pH of the samples treated with SCBA was below the recommended pH for the development of pozzolanic reactions. In Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) tests, SCBA was not effective in immobilizing organic compounds present in diesel oil, since there was no significant reduction in the peaks representing hydrocarbons in the treated samples. Thus, although SCBA has pozzolanic properties, its application under the conditions studied was not efficient for the treatment of soils contaminated with diesel oil, especially in terms of simple compression resistance and immobilization of contaminants. It is recommended to grind SCBA to reduce particle size, as well as to combine it with other stabilizers, such as cement or lime, to improve the effectiveness of the treatment.

Keywords: Contaminated soil. Diesel oil. Treatment. Ash from sugarcane bagasse. Pozzolanic Activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relatório de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo	18
Figura 2: Grupos de contaminantes no estado de São Paulo	19
Figura 3: Esquema global do processo de produção de açúcar e álcool.....	25
Figura 4: Fluxograma simplificado de obtenção de cinzas	26
Figura 5: Bagaço da cana-de-açúcar e diferentes cinzas pós queima.....	27
Figura 6: Curvas granulométricas das cinzas	28
Figura 7: Tensões de ruptura à compressão simples	32
Figura 8: Microscopia eletrônica de varredura - Solo Natural	34
Figura 9: Microscopia eletrônica de varredura - Solo Contaminado.....	35
Figura 10: Microscopia eletrônica de varredura - Solo contaminado e encapsulado.....	35
Figura 11: MEV - Solo Natural	36
Figura 12: MEV - Solo Contaminado.....	36
Figura 13: MEV das CBCA sob aumento de 500 vezes onde a=500°C, b=600°C, c=700°C e d=800°C	37
Figura 14: DRX CBCA de Ibaté (SP)	37
Figura 15: DRX CBCA de Araras (SP).....	38
Figura 16: DRX CBCA de Dourados (MS).....	38
Figura 17: FTIR Óleo Diesel	39
Figura 18: Amostra inicial de 5% do local contaminado 2, b inicial 10% de amostra contaminada do local 2, c final 5% da amostra contaminada do local 2, d final 10% da amostra contaminada do local 2	40
Figura 19: FTIR Diesel tratado com <i>Bacillus subtilis</i>	41
Figura 20: Espectro de FTIR da CBCA.....	41
Figura 21: Fluxograma da 1ª Etapa do programa experimental	42
Figura 22: Fluxograma da 2ª Etapa do programa experimental	43
Figura 23: Local da coleta do solo natural	44
Figura 24: Processo de preparo da amostra de solo (Secagem)	44
Figura 25: Usina Renuka Vale do Ivaí S/A	47
Figura 26: Processo de geração da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	48
Figura 27: Amostra da CBCA leve após coleta e preparo para a pesquisa	49
Figura 28: Ensaio de compactação 8% de óleo diesel	50
Figura 29: Preparo das amostras de solo e óleo diesel para ensaio de compactação	50
Figura 30: Aspecto visual da amostra de solo com diferentes teores de óleo diesel	51
Figura 31: Aspecto visual das misturas de SN-OD-CBCA.....	52
Figura 32: Ensaio de caracterização geotécnica em andamento	53
Figura 33: Equipamento de difração a laser	54
Figura 34: Análise granulométrica da CBCA e do solo	56
Figura 35: Massa específica da CBCA.....	57
Figura 36: Curva de compactação solo natural	58
Figura 37: Moldagem dos CPs	59
Figura 38: Ensaio de RCS em andamento	60
Figura 39: DRX Solo Natural.....	65
Figura 40: DRX CBCA	65
Figura 41: Amostra de solo em processo de agitação.	67
Figura 42: Exemplo de teste da mancha de azul de metileno.....	67
Figura 43: Classificação Mini-MCV	69
Figura 44: Pastilha de Kbr + SN 8% OD.....	70

Figura 45: Evaporação OD - Tempo	74
Figura 46: Evaporação de Fluidos (24 horas de secagem)	75
Figura 47: Evaporação SN + 2% OD (24 horas de secagem)	76
Figura 48: Evaporação SN + 8% OD (24 horas de secagem)	76
Figura 49: MEV CBCA	77
Figura 50: MEV CBCA 2000x.....	78
Figura 51: MEV SN + 20% CBCA	79
Figura 52: MEV SN e SN + 20% CBCA – 200X	79
Figura 53: Ensaio de limite de liquidez para amostra de solo com óleo diesel	80
Figura 54: Influência do teor de óleo nos limites de consistência.....	80
Figura 55: Limite de liquidez	82
Figura 56: Limite de plasticidade	82
Figura 57: Índice de plasticidade.....	82
Figura 58: Aspecto visual da compactação no ramo seco da mistura SN+2% OD.....	85
Figura 59: Aspecto visual da compactação para amostras com maiores teores de óleo diesel.....	85
Figura 60: Curvas de compactação para as misturas solo-óleo diesel.....	86
Figura 61: Compactação amostras com 2%OD.....	87
Figura 62: Compactação amostras com 8%OD.....	87
Figura 63: Compactação amostras com 20% CBCA.....	88
Figura 64: Compactação 8% OD tratado com CBCA.....	89
Figura 65: RCS amostras contaminadas com OD	91
Figura 66: Corpos de prova rompidos com 7 dias.....	91
Figura 67: Corpos de prova rompidos com 28 dias.....	92
Figura 68: Corpos de prova rompidos com 56 dias.....	92
Figura 69: Curva Tensão <i>versus</i> Deformação para as amostras contaminadas com OD	93
Figura 70: RCS amostras com 2%OD e tratadas com CBCA	95
Figura 71: CPs 2%OD - 7 dias	96
Figura 72: CPs 2%OD - 28 dias	96
Figura 73: CPs 2%OD - 56 dias	96
Figura 74: Tensão <i>versus</i> Deformação para amostras contaminadas com 2% OD	97
Figura 75: Condições dos corpos de prova (2%OD).....	98
Figura 76: RCS amostras com 8%OD e tratadas com CBCA	99
Figura 77: CPs 8%OD - 7 dias	100
Figura 78: CPs 8%OD - 28 dias	100
Figura 79: CPs 8%OD – 56 dias.....	101
Figura 80: Tensão <i>versus</i> Deformação amostras contaminadas com 8% OD.....	101
Figura 81: Condições dos corpos de prova (8%OD).....	103
Figura 82: RCS amostras sem óleo diesel	104
Figura 83: CPs SN + 20% CBCA.....	105
Figura 84: Tensão <i>versus</i> Deformação Amostras SN + 20%CBCA	105
Figura 85: Condições dos corpos de prova (SN + 20% CBCA)	106
Figura 86: RCS – 56 dias.....	107
Figura 87: FTIR SN + OD.....	110
Figura 88: FTIR CBCA	111
Figura 89: FTIR Solo com 2% OD.....	111
Figura 90: FTIR Solo com 8% OD.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de massa específica da CBCA obtida em diversos trabalhos.....	28
Tabela 2: Composição química das amostras de CBCA (%)	29
Tabela 3: Análise do combustível - UEM	45
Tabela 4: Análise do combustível - LACAUT	46
Tabela 5: Matrizes estudadas.....	51
Tabela 6: Ensaios de caracterização	53
Tabela 7: Resultados de caracterização do solo	55
Tabela 8: Limites de Atterberg para o solo de Mandaguaçu-PR.....	58
Tabela 9: Comparativo dos parâmetros de compactação	59
Tabela 10: Análise química do solo	61
Tabela 11: Atributos Químicos.....	62
Tabela 12: Análise Química	62
Tabela 13: Composição química do Solo Natural	63
Tabela 14: Composição química da CBCA.....	64
Tabela 15: Resultados ensaio de adsorção de azul de metileno	68
Tabela 16: Resultado de TPH em solos contaminados por combustíveis em alguns postos....	72
Tabela 17: Valores de investigação (VI) para o solo e água subterrânea.....	73
Tabela 18: Limites de Atterberg solo contaminado.....	80
Tabela 19: Limites de Atterberg SN contraminado e tratado com CBCA	81
Tabela 20: pH amostras com OD	83
Tabela 21: pH com SN + 2%OD	84
Tabela 22: pH com SN + 8%OD	84
Tabela 23: pH com SN + 20% CBCA.....	84
Tabela 24: Parâmetros de compactação adotados	89
Tabela 25: Resistência a compressão simples de solo contaminado com diesel (kPa)	90
Tabela 26: Condições dos corpos de prova	94
Tabela 27: Resistência a compressão simples de solo contaminado com 2% OD (kPa)	94
Tabela 28: Condições dos corpos de prova (2%OD)	98
Tabela 29: Resistência a compressão simples de solo contaminado com 8% OD (kPa)	99
Tabela 30: Condições dos corpos de prova (8%OD)	102
Tabela 31: Resistência a compressão simples de solo + CBCA (kPa).....	103
Tabela 32: Condições dos corpos de prova sem OD	106

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil
AP	Atividade Pozolânica
API	<i>American Petroleum Institute</i>
CBCA	Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar
CNT	Confederação Nacional Do Transporte
CP	Corpos de Prova
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COMCAP	Complexo de Centrais De Apoio À Pesquisa
DRX	Difratometria de Raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
FRX	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X
IAC	Instituto Agrônômico
IAP	Índice Atividade Pozolânica
IAT	Instituto Água e Terra
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LACAUT	Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OD	Óleo Diesel
PH	Potencial Hidrogeniônico
RCS	Resistência a Compressão Simples
SEDEST	Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Turismo
S/S	Solidificação/Estabilização
SVE	Extração de Vapor do Solo
TPH	Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UEM	Universidade Estadual de Maringá
USACE	<i>U.S Army Corps Of Engineers</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	JUSTIFICATIVA	15
1.2.	OBJETIVOS	16
1.2.1.	Objetivo geral.....	16
1.2.2.	Objetivos específicos	16
2.	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	18
2.1.	QUESTÕES AMBIENTAIS RELACIONADAS AO ÓLEO DIESEL	18
2.1.1.	Efeitos da contaminação do solo por óleo diesel.....	20
2.2.	TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO	22
2.3.	CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR (cbca).....	25
2.3.1.	Características físicas, químicas e atividade pozolânica da CBCA.....	27
2.3.2.	Efeitos da adição da CBCA no solo	30
2.4.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	32
2.5.	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	33
2.6.	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX).....	37
2.7.	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	39
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1.	MATERIAIS.....	43
3.1.1.	Solo.....	43
3.1.2.	Óleo diesel.....	45
3.1.3.	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA)	46
3.1.4.	Misturas de solo e óleo diesel.....	49
3.1.5.	Misturas de solo, óleo diesel e CBCA.....	51
3.2.	ENSAIOS GEOTÉCNICOS.....	52
3.2.1.	Análise Granulométrica.....	55
3.2.2.	Massa Específica	57
3.2.3.	Limites de Atterberg.....	57
3.2.4.	Ensaio de compactação do solo e das misturas	58
3.2.5.	Moldagem dos corpos de prova.....	59
3.2.6.	Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)	60
3.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	61
3.3.1.	Caracterização química.....	61
3.3.2.	Fluorescência de Raios-X (FRX)	63
3.3.3.	Difratometria de Raios-X (DRX).....	64

3.3.4.	Atividade pozolânica	66
3.3.5.	Comportamento Laterítico.....	66
3.3.5.1.	Adsorção de azul de metileno.....	66
3.3.5.2.	Ensaio Mini-MCV	68
3.4.	PH	69
3.5.	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	70
3.6.	MICROESTRUTURA.....	71
3.7.	CROMATOGRAFIA GASOSA.....	71
4.	RESULTADOS	74
4.1.	EVAPORAÇÃO DO ÓLEO DIESEL	74
4.2.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	77
4.3.	LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	79
4.4.	PH	83
4.5.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	84
4.6.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES	89
4.6.1.	Resistência a compressão simples - 2% OD.....	94
4.6.2.	Resistência a compressão simples - 8% OD.....	99
4.6.3.	Resistência a compressão simples - SN + 20% CBCA	103
4.6.4.	Conclusão Resistência a compressão simples	107
4.7.	CROMATOGRAFIA GASOSA.....	109
4.8.	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	109
5.	CONCLUSÃO.....	113
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de exploração de petróleo e seus derivados têm ocasionado o aumento do número de acidentes envolvendo a contaminação do meio ambiente através dos hidrocarbonetos de petróleo. Isto porque o contato direto dos efluentes líquidos com o solo caracteriza-se como o principal mecanismo de contaminação das águas subterrâneas (Júnior, 2012), muitas vezes associados a vazamentos em postos de abastecimento, tubulações ou tanques de estocagem (Chiaranda, 2011).

Neste contexto, é importante constatar que de acordo com o relatório de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo, apresentado pela CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2022), mais de seis mil locais se encontram contaminados no estado de São Paulo, sendo que os principais contaminantes refletem a influência da atividade de revenda de combustíveis, destacando-se: solventes aromáticos, representados pelo benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, e combustíveis automotivos, sendo que estes representam mais de quatro mil áreas contaminadas. Assim, cerca de 73% das áreas contaminadas no estado de São Paulo ocorrem devido a combustíveis.

Em paralelo, segundo dados da ANP (2021), a produção nacional de petróleo registrou um crescimento de 5,7% em 2020, atingindo a marca de 2,9 milhões de barris por dia. Dentro desse contexto, a produção de óleo diesel, combustível derivado de petróleo mais consumido no Brasil, já que é amplamente utilizado no transporte rodoviário de passageiros e cargas, apresentou um aumento de 1,51% no período compreendido entre os anos de 2020 e 2021 (ANP 2022; CNT, 2012).

Desta forma, levando em conta o aumento do consumo de óleo diesel, e o crescimento dos acidentes ambientais, vem surgindo cada vez mais questionamentos sobre o potencial de danos causados na estrutura do solo após sua contaminação. Diversas pesquisas indicam que a contaminação causa danos ambientais, como também afeta diretamente as propriedades geotécnicas destes solos.

Tal contaminação pode acarretar no aumento da compressibilidade do solo e a drástica redução do índice de vazios (Daciolo, Correia e Portelinha, 2017), diminuição da resistência a compressão simples, aumento do volume de líquido lixiviado em ensaios de lixiviação (Knop, 2003), aumento da condutividade hidráulica (Devatha, Vishnu Vishal e Purna Chandra Rao, 2019), redução da permeabilidade, do limite de liquidez e limite de plasticidade, bem como a diminuição do peso específico seco máximo do solo (Karabash *et al.*, 2023).

Diante da necessidade de remediar solos contaminados, Tavares (2013) argumenta que a aplicação de técnicas de remediação de solos contaminados se refere à redução dos níveis de contaminantes até que se tornem seguros, buscando impedir ou dificultar a disseminação de substâncias nocivas ao ambiente.

Diversas são as técnicas de remediação de solo, como a extração de vapor do solo (SVE), aeração *in situ*, solidificação/estabilização e biorremediação. A retenção ou imobilização de materiais contaminados pode ainda ser realizada através da técnica de encapsulamento de contaminantes, que tem como objetivo transformar materiais sólidos ou líquidos potencialmente poluentes em materiais sólidos menos poluentes ou não poluentes. Esta técnica é uma forma segura de tratamento para uma variedade de contaminantes incluindo os resíduos derivados do petróleo (Oliveira, 2003).

Um outro problema ambiental atual preocupante está associado a alta produção de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, uma vez que, de acordo com Altoé (2012), para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida são gerados cerca de 6 kg de cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar, e levando em consideração a produção de cana-de-açúcar para a safra 2022/2023 de 572.874.900,00 toneladas, estima-se que para essa mesma safra serão gerados 3.437.249,40 toneladas de cinza de bagaço da cana-de-açúcar, ou seja, 3,4 milhões de toneladas (CONAB, 2022).

Por se tratar de um resíduo sólido, não perigoso e inerte, (Faria; Gurgel; Holanda, 2012) que possui propriedades pozolânicas (Bessa, 2011), diversos estudos vêm sendo realizados para explorar a viabilidade de reutilização desse material, tal como o estudo realizado por Baracho e Correia (2021), onde demonstram que a resistência à compressão simples de um solo laterítico argiloso com 10% de cinza do bagaço da cana apresentou aumento de cerca de 32% na resistência a compressão simples quando comparada com uma amostra de solo natural, evidenciando o potencial de uso deste material, bem como confirmando a ação pozolânica da CBCA ao verificar incrementos na RCS com o passar do tempo.

Além disso, a cinza de bagaço de cana demonstrou potencial na redução da lixiviação de substâncias tóxicas em solos contaminados (Tajudin *et al*, 2015; Azhar *et al.*, 2016), diminuição do índice de plasticidade, aumento do peso específico seco máximo, e aumento no teor de umidade ótimo (Jayakrishnan; Gracious; Shaju, 2021).

Sendo assim, este estudo visa avaliar a influência da adição de cinza de bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) nas propriedades geotécnicas e na microestrutura de uma areia argilosa contaminada com óleo diesel, bem como investigar a viabilidade do seu tratamento utilizando

a CBCA como alternativa sustentável na recuperação de solos contaminados, buscando o reaproveitamento deste material em vez de ser depositado em aterros.

1.1. JUSTIFICATIVA

Segundo dados da ANP (2021), a produção nacional de petróleo registrou um aumento de 5,7% em 2020 em comparação ao ano anterior. O Brasil ocupou a 9ª posição entre os maiores produtores de petróleo, atingindo uma produção diária de 3 milhões de barris, já em relação ao consumo, o país ficou em 8º lugar, consumindo aproximadamente 2,3 milhões de barris por dia.

Tendo em vista o crescimento dos centros urbanos e do desenvolvimento industrial, associado ainda ao aumento da demanda de óleo diesel, e consequentemente, ao crescimento dos acidentes ambientais, tais como derramamento de óleos e combustíveis, têm surgido cada vez mais questionamentos sobre o potencial de danos causados na estrutura do solo após sua contaminação.

A contaminação por óleo pode ter efeitos adversos nos microrganismos do solo e das plantas, podendo contaminar os recursos hídricos subterrâneos utilizados para consumo ou agricultura, além do próprio solo. A presença de hidrocarbonetos contaminantes não apenas compromete a qualidade do solo, mas também altera suas propriedades físicas e de engenharia, o que pode levar a assentamentos excessivos de tanques e rupturas de gasodutos, perda de resistência, recalque diferencial e surgimento de fissuras em fundações ou em estruturas já existentes (Jayakrishnan; Gracious; Shaju, 2021).

A primeira zona do solo a ser contaminada por hidrocarbonetos devido a vazamentos/derramamentos de óleo é a zona não saturada (aerada) do solo, ou seja, a região em que as fundações de infraestrutura frequentemente são instaladas. A partir desta é possível que os hidrocarbonetos permeiem o solo até atingir o lençol freático, atingindo assim a zona saturada do solo. Sendo assim, contaminações podem afetar tanto as fundações como também o lençol freático, podendo ser transportados pela água para as áreas circundantes, contaminando o solo e podendo afetar as fundações localizadas nessas áreas (Hernández-Mendoza; Ramírez; Alegría, 2021).

Neste contexto, existe a presença de leis de proteção ambiental que fortalecem a necessidade de descontaminação e a restauração de áreas afetadas, especialmente quando essas áreas estão localizadas nas proximidades de centros urbanos.

Visando minimizar impactos ambientais, bem como realizar a recuperação dessas áreas contaminadas, foram desenvolvidas técnicas de remediação que, segundo Tavares (2013),

se referem a redução dos níveis de contaminantes até que se tornem seguros, buscando impedir ou dificultar a disseminação de substâncias nocivas ao meio ambiente. Oliveira (2003) acrescenta ainda que a técnica de solidificação/estabilização proporciona melhoramento das características físicas e toxicológicas do resíduo.

Embora o cimento e a cal sejam comumente utilizados em técnicas de recuperação de solos contaminados, sua produção acarreta diversos problemas ambientais e custos elevados, tornando-se cada vez mais desejável o desenvolvimento de materiais alternativos. Neste contexto destaca-se a importância da utilização de subprodutos industriais, como as cinzas volantes que se destaca como uma opção promissora para estabilizar áreas contaminadas devido à sua natureza pozolânica e à capacidade de minimizar o impacto ambiental (Jayakrishnan; Gracious; Shaju, 2021).

Uma alternativa viável é a cinza leve gerada a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Com base na produção anual de cinzas secas, que pode chegar a aproximadamente 294 mil toneladas, esse material poderia ser usado como cimento, resultando em cerca de 5,9 milhões de sacos. Essa utilização alternativa poderia gerar uma economia de aproximadamente R\$ 177 milhões (Castro, 2015).

Portanto, levando em consideração que a CBCA é um resíduo gerado em grandes proporções, e que apresenta potencial para ser utilizada como material de remediação de solos contaminados, torna-se interessante o desenvolvimento de um estudo experimental para avaliar a eficiência desse resíduo para tratamento de solos contaminados com óleo diesel, uma vez que além do tratamento do solo, de forma que seja possível a sua reutilização, também é possível dar uma destinação adequada a este resíduo, bem como diminuir a poluição e gastos gerados com a produção de cimento.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar as propriedades geotécnicas e a microestrutura de um solo laterítico arenoso contaminado com óleo diesel e tratado com cinza leve do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA).

1.2.2. Objetivos específicos

Para o cumprimento desse, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o efeito dos diferentes teores de óleo e da CBCA nos parâmetros de compactação do solo e das misturas;

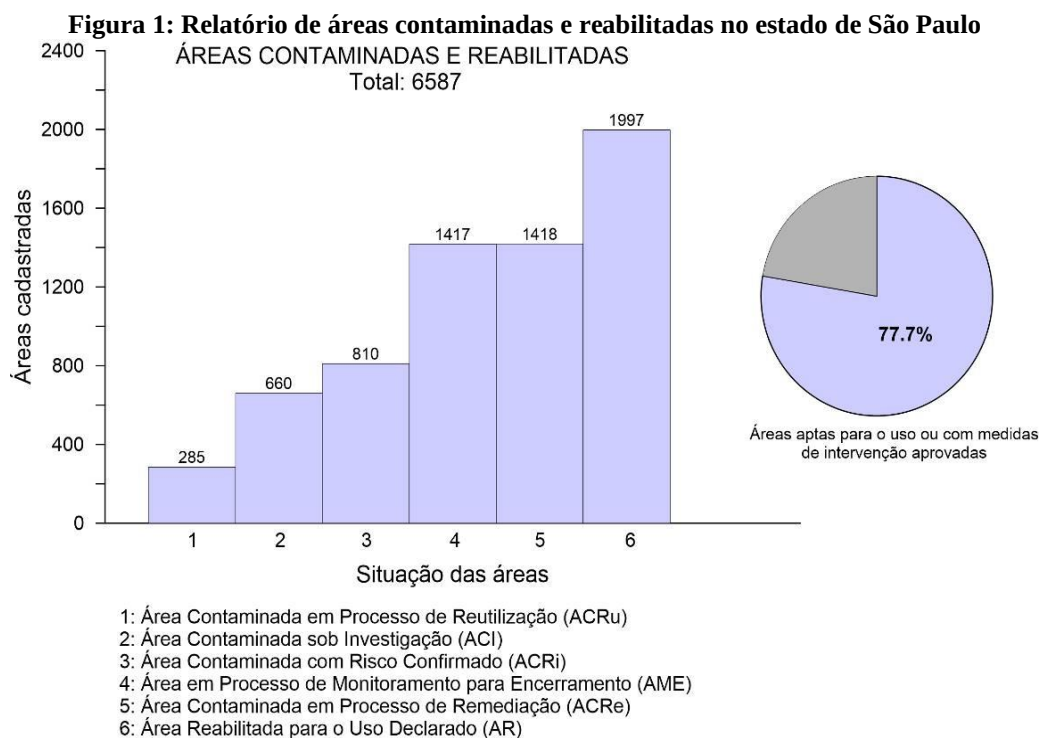
- Analisar a influência do teor de óleo diesel e CBCA no comportamento de resistência à compressão simples (RCS) para diferentes tempos de cura;
- Investigar a eficácia da técnica de tratamento através de ensaios cromatografia gasosa e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier; e
- Realizar análises qualitativas através da microscopia eletrônica de varredura buscando explicar os resultados experimentais obtidos.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1. QUESTÕES AMBIENTAIS RELACIONADAS AO ÓLEO DIESEL

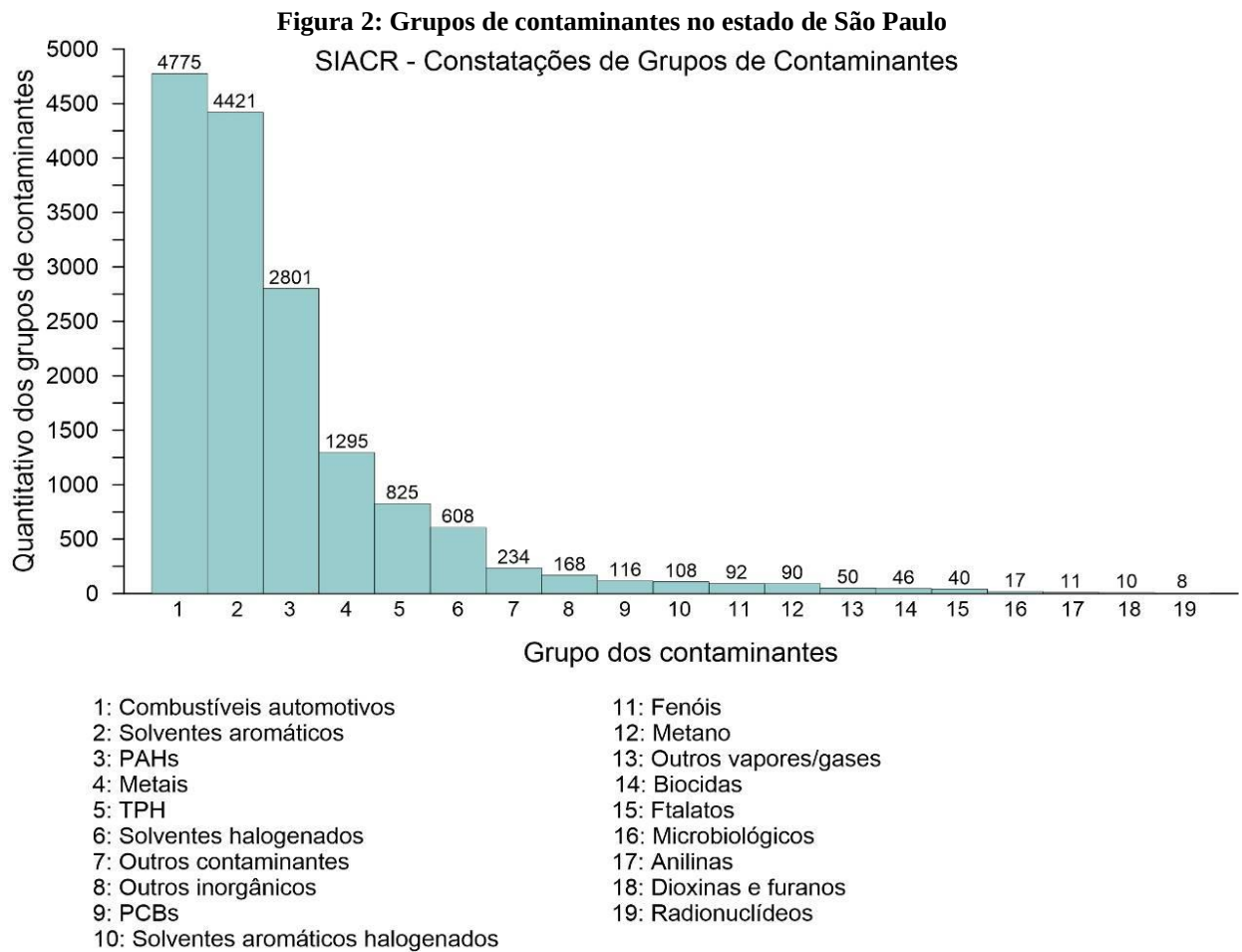
O óleo diesel é um combustível líquido composto principalmente por hidrocarbonetos com cadeias de carbono, podendo conter enxofre, nitrogênio e oxigênio em baixas concentrações. Entre as principais propriedades dos produtos do petróleo, podemos citar a densidade, viscosidade, tensão interfacial e o ponto de fluidez. A densidade determina a tendência de uma substância submergir ou flutuar em meio à água, a tensão interfacial é a tensão existente entre a interface de dois fluídos e o ponto de fluidez consiste na menor temperatura na qual o óleo flui, já a viscosidade está relacionada a extensão da infiltração do óleo no solo, sendo que, quanto mais viscoso for o óleo, menos ele infiltra no solo. (API, 1999; Chen *et al.*, 2017; Sanches, 2009).

Diante do evidente aumento da produção e comercialização do petróleo e do seu derivado óleo diesel, as preocupações relacionadas ao potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas, principalmente por vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneos em postos de combustíveis, tem aumentado significativamente. A Figura 1 apresenta o relatório de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo, apresentado pela CETESB (2022), o qual atesta haver mais de seis mil locais contaminados e reabilitados no estado de São Paulo.



Fonte: Adaptado de CETESB (2022)

Em relação aos dados da CETESB (2022), é possível identificar que os grupos de contaminantes predominantes estão associados a atividade de revenda de combustíveis. Destacam-se os solventes aromáticos, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, além dos combustíveis automotivos, os quais foram evidenciados em mais de quatro mil áreas contaminadas. Desse modo, cerca de 73% das áreas contaminadas no estado de São Paulo têm suas origens atribuídas aos combustíveis (Figura 2).



Fonte: Adaptado de CETESB (2022)

Em relação ao estado do Paraná, de acordo com IAT (2015), existem aproximadamente três mil postos de combustível, sendo que 585 destes postos estavam localizados em áreas contaminadas em 2014, ou seja aproximadamente 20% dos postos de combustível encontram-se em locais contaminados, sendo que no município de Londrina apresenta 14% dos postos contaminados (Shiraishi, 2020).

É importante citar, contudo, que a utilização de dados antigos, de outros municípios ou até mesmo estados se deve à dificuldade de encontrar valores orientadores na região de estudo.

A contaminação do solo por petróleo, caso não seja devidamente tratada, representa uma ameaça tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente. Essa forma de contaminação apresenta desafios não apenas para os especialistas em meio ambiente, mas também para os engenheiros geotécnicos. Diante dos desafios crescentes enfrentados por esses profissionais, é apropriado realizar estudos com o objetivo de desenvolver metodologias de teste, identificação, classificação, estabilização, utilização e técnicas de remediação do solo contaminado, com o objetivo de eliminar ou reduzir significativamente o risco representado pela contaminação petrolífera (Sadeeq; Ochepo; Salahudeen, 2015).

2.1.1. Efeitos da contaminação do solo por óleo diesel

Uma vez evidenciados o aumento de consumo e consequentemente o aumento das áreas contaminadas, surgem diversos estudos a fim de constatar os efeitos que tais contaminantes trazem para o solo. Daciolo, Correia e Portelinha (2017) constataram que pequenas quantidades de óleo diesel são suficientes para alterar as propriedades geotécnicas do solo, evidenciando o aumento da compressibilidade do solo e a drástica redução do índice de vazios de um solo laterítico da região de São Carlos (SP).

Também se constatou que diversos processos de degradação se manifestaram em amostras com diferentes níveis de contaminação. Sendo que nas amostras com baixa concentração de diesel observou-se um período prolongado de deterioração das propriedades do solo. Já nas amostras com elevadas concentrações de diesel, o processo de degradação concluiu-se em um tempo de cura mais breve, e não se evidenciou uma alteração significativa na resistência das amostras durante as fases subsequentes (Chen *et al.*, 2017).

Resultados indicaram que, para um solo de arenito proveniente da cidade de Botucatu (SP) e contaminado com óleo diesel, quanto maior a quantidade de óleo diesel menor é a resistência do solo. Amostras preparadas com 100% de óleo diesel em relação ao peso total de líquidos romperam apenas pelo esforço das mãos. Em relação a lixiviação, verificou-se que quanto maior o teor de óleo maior será o volume de líquido lixiviado (Knop, 2003).

A presença de diesel no solo provocou uma alteração significativa em seu pH, passando de moderadamente alcalino para neutro. Hernández-Mendoza, Ramírez e Alegría (2021) explicam que a redução do pH pós-contaminação é atribuída ao efeito acidificante do enxofre presente no diesel, uma vez que a adição desse elemento ao solo influencia a taxa de oxidação, resultando na produção de íons de hidrogênio. A elevação na concentração desses íons na solução do solo culminou em uma diminuição do pH, uma vez que o pH reflete a concentração de íons de hidrogênio presente no solo. Devatha, Vishnu Vishal e Purna Chandra

Rao (2019) também observaram uma diminuição do pH ao contaminar o solo com óleo cru, sendo que tal diminuição pode ser mais ou menos significativa dependendo do tipo de solo.

Pesquisas apontam que a resistividade elétrica do solo de caulinita diminui com o aumento do teor de óleo, revelando uma relação não linear significativa entre ambas. Isso ocorre devido à maior condutividade elétrica do óleo diesel em comparação com o ar nos poros do solo. Com o aumento da presença de contaminantes de óleo, a condutividade elétrica na amostra de solo aumenta, uma vez que tanto o óleo diesel quanto a água nos poros atuam como fluídos condutores na argila. Assim, a resistividade elétrica diminui à medida que o grau de saturação aumenta (Liu *et al.*, 2015). Devatha, Vishnu Vishal e Purna Chandra Rao (2019) por sua vez, observaram que a condutividade hidráulica aumentou devido à contaminação por óleo em solo composto majoritariamente por areia e silte.

Também foi constatado o aumento do teor de matéria orgânica do solo em aproximadamente 200% após a contaminação (Hernández-Mendoza; Ramírez; Alegría, 2021).

Estudos apontam que a plasticidade do solo diminuiu aproximadamente dois terços após a contaminação, que houve a expansão do solo de 1,9 a 2,5 vezes no ramo seco da curva de compactação e de 3,8 a 4,3 vezes no ramo úmido da curva de compactação. Além disso, a permeabilidade diminuiu de 25% a 50% no ramo seco, enquanto aumentou duas vezes no ramo úmido. A redução na permeabilidade é atribuída aos óleos viscosos que preenchem os espaços porosos do solo, diminuindo o tamanho dos poros e, conseqüentemente, restringindo o fluxo de água. Uma redução mais alta no coeficiente de permeabilidade é relatada para o petróleo bruto devido à sua alta viscosidade, enquanto uma redução mais baixa é relatada para o querosene, cuja viscosidade é muito baixa (Karabash *et al.*, 2023).

Resultados mostram ainda que o limite de liquidez de solo contaminado com diesel diminui em torno de 50%, já o limite de plasticidade diminui aproximadamente 60% em relação ao solo natural. De maneira geral, a presença de óleo minimiza a atividade da argila ao reduzir sua capacidade de troca de cátions. Isso, por sua vez, leva à diminuição da capacidade de atração das moléculas de água, provocando uma redução na plasticidade (Karabash *et al.*, 2023).

A contaminação do solo com óleo diesel pode ainda reduzir a densidade relativa do solo natural, sendo tal comportamento explicado pela substituição parcial da água (no solo contaminado), uma vez que o diesel tem densidade e densidade relativa inferiores à da água (Hernández-Mendoza; Ramírez; Alegría, 2021).

Karabash *et al.* (2023) também constataram a diminuição do peso específico seco máximo do solo quando contaminado, em uma média de 6% para contaminações com óleo cru, diesel, querosene e gasolina.

A respeito dos níveis de contaminação, estudos realizados no solo contaminado de uma estação do campo petrolífero no Iraque demonstram que os níveis de contaminação chegaram em até 14% de teor de óleo (Abdulhamid; Hasan; Aziz, 2021). Além disso Hernández-Mendoza; Ramírez e Alegría, (2021), analisaram a retenção máxima de diesel em um solo argiloso não saturado, concluindo que o solo podia reter 12,6% do diesel adicionado e o excesso foi expulso.

Diversos são os estudos que avaliam o comportamento geotécnico de amostras de solo contaminadas com óleo diesel, comprovando a importância da realização dessas análises visando avaliar o comportamento do solo natural quando contaminado e propor técnicas de remediação e, quando possível, seu reuso para diversas situações, respeitando os critérios e valores orientadores de qualidade do solo, tais como a Resolução SEDEST Nº 3 DE 17/01/2020, que apresenta valores de investigação para o solo e água subterrânea; lista holandesa 6530, que apresenta valores de qualidade do solo e da água subterrânea; e legislação vigente em cada município, como os “níveis baseados no risco para hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH)” produzido por Oklahoma.

2.2. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO

A Resolução Conama nº 420 (Brasil, 2009) define remediação como uma das ações de intervenção para reabilitação de área contaminada através de aplicação de técnicas visando a remoção, contenção ou redução das concentrações de contaminantes.

Geralmente, os métodos de remediação são divididos em duas categorias: *in situ* e *ex situ*. Os métodos *in situ* tratam a contaminação do solo e/ou água subterrânea diretamente no local, sem a necessidade de escavar os solos contaminados e/ou extrair a água subterrânea. Esses métodos oferecem vantagens como economia e menor risco de exposição acidental à contaminação para os trabalhadores e ao público próximo ao local de remediação. Já os métodos *ex situ* são usados para tratar solos escavados ou água subterrânea extraída do local. Esse tipo de tratamento permite controle e monitoramento mais fáceis durante a implementação das atividades corretivas (Reddy; Adams; Richardson, 1999).

Entre as técnicas de remediação, cita-se o tratamento térmico, que consiste na elevação da temperatura do solo e da água subterrânea com o objetivo de degradação do contaminante ou a sua transferência para a fase vapor, facilitando sua extração. Os métodos mais utilizados são a condução de calor, aquecimento por resistência elétrica e a injeção de vapor (Leite; Shinzato; Freitas, 2020).

Outra abordagem utilizada é a extração de vapor do solo, uma técnica de remediação comumente empregada no tratamento de solos contaminados. No entanto, é importante destacar que essa técnica é aplicada exclusivamente à "zona não-saturada", que fica imediatamente abaixo da superfície topográfica e acima do nível freático. Em termos gerais, a extração de vapor do solo envolve a aplicação de vácuo em pontos estratégicos do solo para induzir um fluxo controlado de ar e, assim, remover os contaminantes presentes. Na implementação dessa técnica, os gases extraídos devem passar por etapas de tratamento de vapores antes de serem descartados na atmosfera (Reddy; Adams; Richardson, 1999).

Já nas técnicas de biorremediação são utilizados estímulos de microrganismos presentes no solo, através da injeção de oxigênio, nutrientes ou de outros aditivos que possam otimizar o processo da degradação causada aos contaminantes (Knop, 2003). A escolha da técnica mais apropriada depende das características do local contaminado, do tipo de contaminante, das propriedades e natureza do contaminante e do uso final do meio. A proporção e disponibilidade de contaminantes, condições de umidade, temperatura, oxigênio e a presença de compostos inibidores são frequentemente fatores limitantes para a biorremediação (Meneghetti, 2007).

A solidificação e/ou estabilização, conhecida também como encapsulamento e/ou fixação, consiste em uma técnica de tratamento para resíduos, com presença de poluentes, onde emprega-se a incorporação de aditivos visando reduzir a mobilidade dos poluentes com o objetivo de transformá-los em materiais não perigosos ou aceitáveis para as normas de disposição vigentes (Melchert, 2012).

Tal processo é utilizado com o objetivo de transformar materiais líquidos ou sólidos potencialmente poluentes em materiais sólidos menos poluentes ou até mesmo não poluentes, sendo a estabilização um processo que transforma e mantém o contaminante em sua forma menos solúvel e tóxica por meio de reações químicas, e a solidificação o processo que através de um agente cimentante é formada uma massa sólida de resíduo tratado, contribuindo para melhoria de sua integridade estrutural (Rojas, 2007).

O encapsulamento, por sua vez, consiste em revestir completamente ou encapsular partículas tóxicas ou aglomerados de resíduos com uma nova substância, com um aditivo ou ligante utilizado no processo de solidificação/estabilização (Wiles, 1987).

A *U.S Environmental Protection Agency* identificou o método solidificação/estabilização (S/S) como a melhor tecnologia de remediação de solos disponível para muitos resíduos perigosos (Tajudin *et al.*, 2015). Isto porque a técnica tem como objetivo principal conter e evitar a liberação de resíduos no meio ambiente. Para alcançar esse objetivo,

são empregados diferentes mecanismos que levam em consideração fatores importantes na avaliação da tecnologia S/S. Entre eles estão a produção de um sólido, a melhoria das características de manipulação do resíduo, a redução da área de superfície pela qual o transporte do contaminante pode ocorrer e a limitação da solubilidade do contaminante quando exposto a soluções lixiviantes (Wiles, 1987).

Existem dois tipos principais de aditivos e/ou reagentes utilizados no processo de solidificação/estabilização (S/S): orgânicos e inorgânicos. Os reagentes orgânicos têm sido pouco utilizados na remediação de áreas contaminadas por serem caracterizados como resíduos perigosos. Portanto, nesta técnica é indicado a utilização de reagentes inorgânicos, entre os quais, destaca-se o cimento Portland, a cinza volante, a cal, os fosfatos e o pó proveniente da produção de cal e cimento (USACE, 1995).

As etapas usuais do processamento ao utilizar reagentes inorgânicos são realizar uma reação química com toda a água presente, promover uma reação química com os contaminantes para torná-los insolúveis e, em seguida, encapsular os produtos resultantes (USACE, 1995). Além de ser responsável pela redução da concentração do contaminante no lixiviado, a técnica de encapsulamento também influencia na resistência que o solo adquire com a adição do agente encapsulante e, dessa forma, o solo remediado pode ser utilizado em aterros ou até mesmo aproveitado como material de pavimentação de vias no próprio local de contaminação (Perez, 2017).

De acordo com a *U.S. Army Corps of Engineers* (1995), existem ensaios pós-tratamento, que variam de projeto para projeto, que consistem em ensaios físicos e químicos, utilizados para garantir a eficácia da técnica de encapsulamento. Entre os ensaios físicos, destacam-se o ensaio de resistência à compressão simples, que fornecem parâmetros físicos do solo. Além disso, análises químicas também devem ser realizadas no lixiviado obtido por meio do ensaio de lixiviação a fim de garantir a eficiência do encapsulamento do contaminante.

A norma *Petroleum-contaminated Soil Guidance Policy*, do Departamento de Conservação Ambiental do Estado de Nova Iorque, indica o reuso de solos contaminados para materiais de construção, usinas de produção de asfalto e concreto e, quando respeitados os critérios mínimos como proteção à vida humana, águas subterrâneas e o meio ambiente, podem ser reutilizados até mesmo como material de preenchimento de escavação (*NYS Regulations And Enforcement*, 2010).

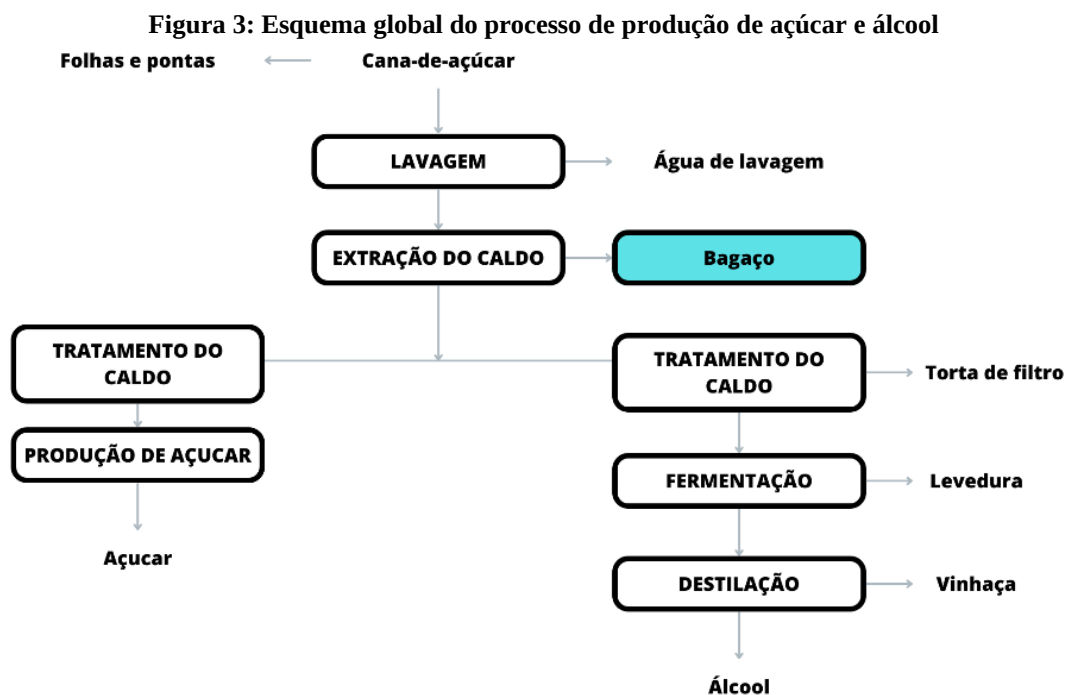
Ahmad *et al.* (2020) estudaram a estabilização e solidificação de um solo arenoso contaminado com óleo através do uso de cimento Portland, pó de forno de cimento e pó de calcário, onde foi observado que o tratamento S/S melhorou as características de compactação,

sendo elas: diminuição da umidade ótima na presença de cimento Portland e pó de forno de cimento, aumento do peso específico seco máximo e aumento do teor de umidade com o aumento do teor de pó de calcário. Além disso, houve também melhoria da resistência a compressão simples, diminuição do coeficiente de permeabilidade e diminuição da lixiviabilidade de metais pesados e diferentes tipos de hidrocarbonetos.

2.3. CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR (CBCA)

A geração da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) está diretamente relacionada com o processo de produção da cana-de-açúcar, estima-se uma produção para a safra de 2022/2023, em 572.874.900,00 toneladas, em uma área cultivada de aproximadamente 8.127,7 mil hectares, com uma produtividade média esperada de 70.484 kg/há (CONAB, 2022). Sendo que a produção no estado do Paraná de 29.029.200,00 toneladas, o que corresponde a 5,07% da produção de todo o território brasileiro.

A cana-de-açúcar é a matéria prima utilizada na fabricação de açúcar e álcool, sendo que o processo de produção desses produtos envolve diferentes etapas (Figura 3), tais como a colheita e o transporte da cana-de-açúcar até a usina, seguidos pela lavagem e processamento. A partir da extração do caldo da cana, o processo diverge: o caldo pode ser tratado para a produção de açúcar ou fermentado para a produção de álcool (Cordeiro, 2006).

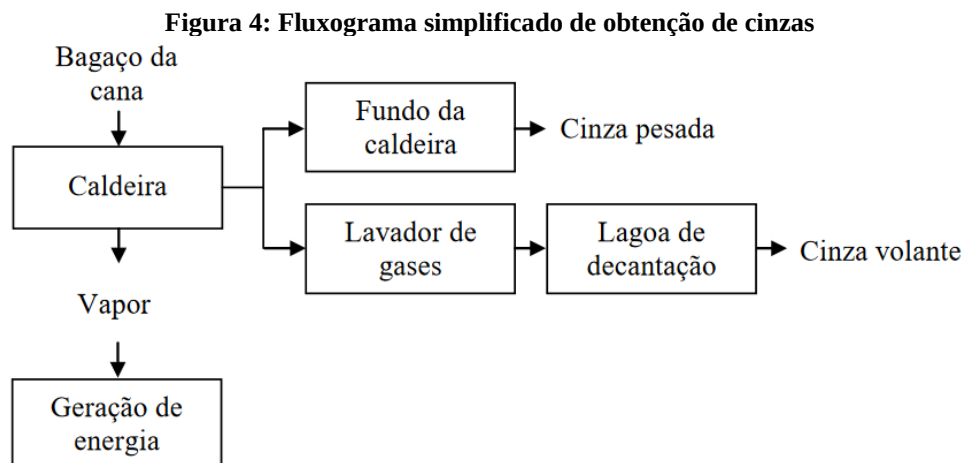


Fonte: Adaptado de Moreira e Goldemberg (1999); Cordeiro (2006)

Os resíduos gerados a partir da produção de açúcar e álcool apresentam-se como um desafio constante para o setor sucroalcooleiro. O lançamento de tais resíduos no meio ambiente gera externalidades negativas que afetam os recursos naturais. No entanto, atualmente o aproveitamento desses resíduos tornou-se uma vantagem econômica devido aos benefícios que eles propiciam (Spadotto e Ribeiro, 2006).

Dentre os inúmeros subprodutos da agroindústria canavieira, o bagaço pode ser empregado na produção de energia, combustível, hidrólise, polpa de papel, celulose e aglomerados. Spadotto e Ribeiro (2006) explicam que o bagaço é um resíduo muito utilizado para queima em caldeiras na produção de energia, sendo que o resultado do emprego deste material nesse processo é uma grande quantidade de cinza que muitas vezes não possui uma destinação adequada.

Conforme explicam James e Pandian (2017), a cinza de bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo sólido produzido em grandes quantidades, caracterizado como um subproduto da indústria de fabricação de açúcar, que consiste em cinza de fundo, coletada das caldeiras, e cinza volante, coletada dos lavadores de gases, conforme exemplificado na Figura 4.



Fonte: Castro (2015)

A cinza pesada é classificada como inerte, e apresenta propriedades semelhantes a areia natural, trata-se de um material não reativo, com baixa atividade pozolânica, e apresenta uma estrutura cristalina bem definida, com presença predominante de quartzo (Filho e Martins, 2015).

As cinzas contêm frações orgânicas e inorgânicas, sendo que a cinza volante possui maior teor de conteúdo orgânico em comparação com a cinza de fundo. A cinza de bagaço de

cana-de-açúcar tem sido reconhecida por suas diversas aplicações, como adsorventes, filtros, cerâmicas, tijolos, blocos e atividades de melhoria do solo (James e Pandian, 2017).

Trata-se de um material rico em sílica e capaz de contribuir para reações pozolânicas devido às altas quantidades de sílica, alumina e óxido de ferro presentes. Sendo que a atividade pozolânica da cinza depende da presença de sílica amorfa, em oposição à sílica cristalina, sendo influenciada pela temperatura de calcinação da cinza (James e Pandian, 2017).

A fim de classificar a atividade pozolânica de CBCA pesada e leve, Castro (2015) realizou ensaio da CBCA pesada obtendo um resultado de 101 mgCa(OH)₂/g amostra (não possui atividade pozolânica), já a CBCA leve apresentou um resultado de 569 mgCa(OH)₂/g amostra, apontando que a CBCA leve apresenta atividade pozolânica.

Em função da temperatura no interior do salão da caldeira e do tempo de exposição ao calor, são geradas cinzas residuais com diferentes colorações. Sendo a cor indicativa do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e, conseqüentemente, do seu teor de carbono (Cordeiro, 2006).

Na Figura 5a, pode ser observado o bagaço de cana *in natura*. Na Figura 5b, a coloração preta da cinza é proveniente de um processo de combustão incompleto. A partir de maior temperatura e/ou tempo de exposição ao calor, maior quantidade de carbono é liberada e a cinza adquire cor que varia entre tons de vermelhos, observado na Figura 5c, a tons de branco, visto na Figura 5d (Cordeiro, 2006).

Figura 5: Bagaço da cana-de-açúcar e diferentes cinzas pós queima

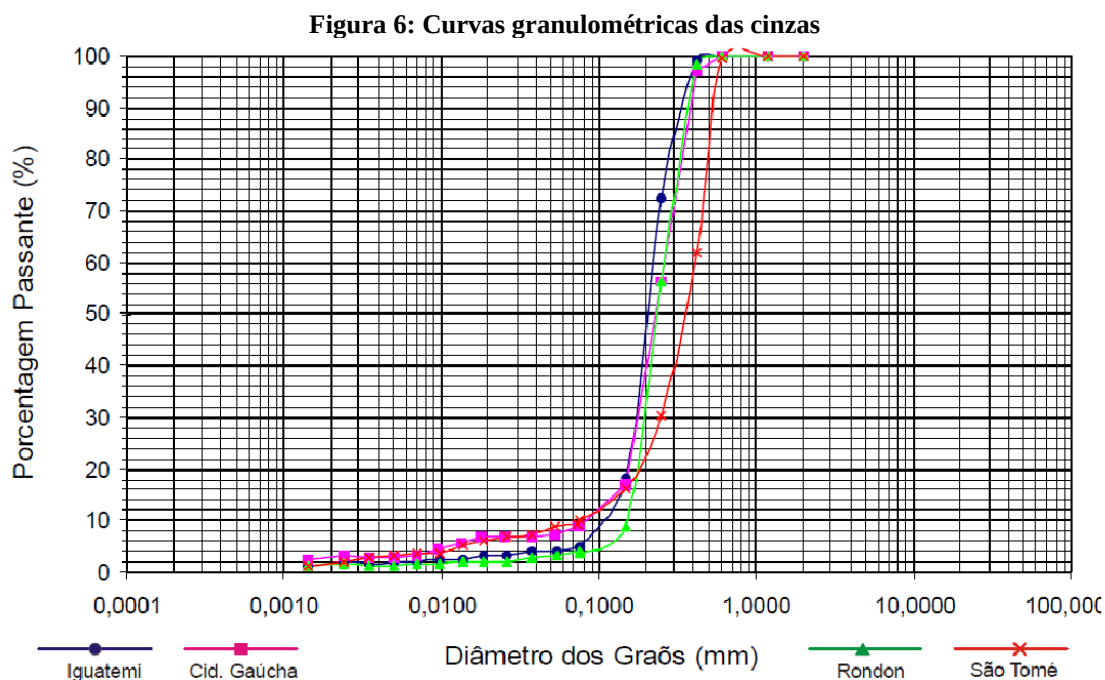


Fonte: Cordeiro (2006)

2.3.1. Características físicas, químicas e atividade pozolânica da CBCA

A distribuição granulométrica de quatro amostras de cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar, coletadas nas usinas de Iguatemi, Cidade Gaúcha, Rondon e São Tomé, situadas no estado do Paraná, é apresentada na Figura 6. Observa-se que, de forma geral, todas

se apresentaram bem graduadas, indicando que os espaços deixados por partículas maiores são preenchidos por partículas menores. Constatou-se também que as cinzas são semelhantes às areias médias em relação a sua granulometria (Nunes, 2009).



Fonte: Nunes (2009)

A massa específica dos grãos para diferentes amostras da CBCA, variou entre 2,52 g/cm³ e 2,65 g/cm³, demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de massa específica da CBCA obtida em diversos trabalhos

Autor (Ano)	Origem da amostra	Massa específica (g/cm³)
Freitas (2005)	Campos dos Goytacazes-RJ	2,58
Cordeiro, Filho e Fairbairn (2009)	São João da Barra-RJ	2,53
Nunes (2009)	Iguatemi/ Rondon/São Tomé-PR	2,61
Nunes (2009)	Cidade Gaúcha -PR	2,57
Goyal <i>et al.</i> (2007)	Punjab – Índia	2,52
Mansaneira (2010)	Astorga -PR	2,65
Castro (2015)	São Pedro do Ivaí/PR	2,64

Fonte: Autora (2023)

Diversas pesquisas foram realizadas abordando a composição química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar a fim de ilustrar as diferenças encontradas em relação a sua composição (Tabela 2).

Tabela 2: Composição química das amostras de CBCA (%)

Composto	Cordeiro (2006)	Castro (2015)	Castro (2015)	Filho (2012)	Filho e Martins (2015)
	São João da Barra - RJ	São Pedro do Ivaí - PR	Iguatemi – PR	Paraíba - Brasil	São Pedro do Ivaí -PR,
SiO ₂	64,64	25,818	57,407	77,93	48,59
Al ₂ O ₃	< 0,10	10,566	4,3117	6,01	48,59
Fe ₂ O ₃	0,10	47,980	21,786	3,56	13,10
CaO	6,33	1,5272	1,9605	3,02	1,63
Na ₂ O	0,74	-	-	0,37	0,14
K ₂ O	9,57	4,1524	4,0484	-	2,33
MnO	0,51	0,7341	0,367	-	-
TiO ₂	< 0,01	7,1618	6,4062	0,45	2,60
MgO	9,27	0,6804	1,0335	1,65	1,21
BaO	<0,16	-	-	-	-
P ₂ O ₅	8,84	0,7908	1,1373	1,76	1,21
Cl	-	0,1867	0,4648	-	0,046
CuO	-	0,1659	-	-	-
ZnO	-	0,1233	-	-	-
ZrO ₂	-	0,1135	0,1072	--	-
V ₂ O ₅	-	-	0,7214	-	-
SO ₃	-	-	0,2486	-	0,63
MN ₂ O ₃	-	-	-	-	0,210
Cr2O3	-	-	-	-	0,022

Fonte: Autora (2023)

As características do solo, a espécie de cana cultivada, quantidade e composição de agrotóxicos e fertilizantes utilizados, as condições de lavagem da cana, condições de armazenamento do bagaço, a temperatura de queima do bagaço e os locais de coleta são os principais fatores que podem influenciar as características física, química e mineralógica da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar, justificando possíveis discrepâncias de resultados quanto à caracterização deste resíduo. Isso fica claro quando são analisados os valores do teor de sílica presente na cinza do bagaço de cana-de-açúcar originária de diferentes localidades. Apesar da variação de valores, pode-se constatar que a sílica é o composto mais abundante nas cinzas, independentemente de sua origem (Filho, 2012).

Em relação a atividade pozolânica (AP), a NBR 12653 (ABNT, 2014), define a AP como a capacidade de determinado material reagir com hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias. Já os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou sílico aluminosos que quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades ligantes. A norma ainda especifica os requisitos físicos e químicos mínimos para que o material possa ser considerado pozolânico. Outros métodos podem ser utilizados para determinação da atividade pozolânica, como no caso da NBR 15895 (ABNT, 2010), que especifica um método para determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado (método Chapelle modificado), definindo assim o índice de atividade pozolânica Chapelle.

De acordo com Lima (2019), a cinza do bagaço de cana-de-açúcar pode apresentar ou não características pozolânicas, uma vez que tal propriedade é influenciada pela finura do material e pelo teor de sílica amorfa, sofrendo alterações pela queima ou modificada em laboratório.

O pré-tratamento da cinza, seja por meio de peneiração utilizando malhas finas ou pela moagem para redução do tamanho das partículas, contribui para melhorar sua reatividade. Dessa forma, a eficácia da cinza como pozolana dependerá da presença e quantidade de impurezas, da natureza da sílica contida na cinza (seja cristalina ou amorfa) e do eventual tratamento ou modificação realizados para otimizar sua reatividade (James e Pandian, 2017).

2.3.2. Efeitos da adição da CBCA no solo

Esse resíduo tem sido problemático devido à falta de técnicas de reciclagem adequadas, resultando em seu descarte em aterros sanitários ou uso como fertilizante nas lavouras de cana (Gobbi; Groenwold; Medeiros, 2010).

No entanto, estudos recentes têm explorado alternativas sustentáveis para a gestão da CBCA. Faria, Gurgel e Holanda (2012) conduziram testes cujos resultados indicam que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode ser considerada um material de resíduo sólido, não perigoso e inerte, abrindo caminho para seu reaproveitamento. Matos *et al.* (2021) observaram que essa cinza é rica em sílica e pode ser usada como material de preenchimento físico ou pozolânico, bem como possibilita o desenvolvimento de produtos da construção civil com propriedades superiores àqueles sem a presença de cinzas, tudo isso a um baixo custo.

Além disso, a CBCA tem se mostrado valiosa na estabilização de solos, contribuindo para a construção de estradas rurais. Estudos conduzidos por Siqueira e Machado (2018) apontaram que a adição desse material como aditivo mineral em camadas de pavimentos estabilizados quimicamente com solo-cimento pode reduzir o consumo de cimento e diminuir o volume de resíduos descartados em locais inadequados, o presente material também demonstra potencial para ser utilizado na estabilização do subleito de estradas, uma vez que a estabilização de solos expansivos utilizando a cinza de bagaço e cal apresenta melhora na resistência (Hasan *et al.* 2016). A adição desse material pode reduzir a plasticidade, alterar significativamente os parâmetros de compactação do solo natural e promover maior resistência ao solo, sendo que para 10% de teor de cinza em solo argiloso, foram obtidas as maiores resistências à compressão, atingindo um aumento de cerca de 32% (Baracho e Correia, 2021).

Além disso, a cinza de bagaço de cana demonstrou potencial na redução da lixiviação de substâncias tóxicas em solos contaminados. Tajudin *et al.* (2015) realizaram testes que mostraram a eficácia desse resíduo como substituto parcial do cimento na estabilização/solidificação de solos contaminados com nitrato de chumbo, proporcionando aumento da resistência e redução da lixiviabilidade em comparação com amostras não tratadas, sendo que algumas amostras chegaram a apresentar 0% de material contaminante aos 28 dias. Ketrot e Wisawapipat, (2021), também constataram uma redução significativa da extração de chumbo (Pb) ao adicionar cinza do bagaço da cana-de-açúcar em solos contaminados por mineração.

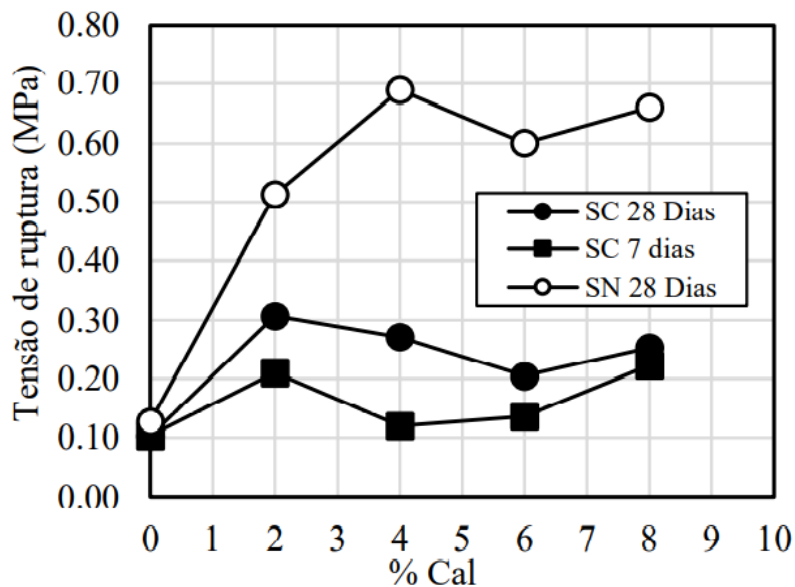
Durante análise de estabilização de solo contaminado com arsênio através da adição de cimento e CBCA, foi concluído que essa técnica reduziu significativamente a lixiviação de arsênio, tornando o solo mais seguro e menos suscetível à contaminação ambiental, sendo que para amostras com 10% de cimento + 10% de cinza de bagaço da cana-de-açúcar foi possível minimizar a lixiviação em 100% (Azhar *et al.*, 2016).

Em um estudo de solo contaminado com óleo (12% de óleo diesel em relação a massa seca total) e estabilizado com cinza volante (teores de 20, 40 e 60% em relação ao peso do solo contaminado) observou-se a diminuição do índice de plasticidade, aumento do peso específico seco máximo (devido ao preenchimento dos vazios), aumento no teor de umidade ótimo (necessário mais água para lubrificar as partículas), bem como aumento da resistência a compressão simples (possivelmente devido a cimentação) apresentando um aumento de 29,5% com a adição de 60% de cinza volante (Jayakrishnan; Gracious; Shaju, 2021).

2.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Mendes, Correia e Portelinha (2019) analisaram as propriedades geotécnicas de um solo laterítico contaminado com óleo diesel e estabilizado com cal e concluíram que, para solos naturais contaminados (SC) com óleo diesel, a contaminação causou uma redução da resistência à compressão uniaxial de aproximadamente 19% em comparação com o solo natural (SN), bem como apresentou ganho de resistência quando o solo contaminado foi tratado com cal. A Figura 7 apresenta a influência da adição de óleo diesel na resistência de um solo laterítico. Adicionalmente, os resultados demonstram que a adição de cal promove a melhoria na resistência do solo contaminado sobretudo quando se considerado diferentes períodos de cura.

Figura 7: Tensões de ruptura à compressão simples



Fonte: Mendes, Correia e Portelinha (2019)

Para os solos contaminados com diesel, a resistência a compressão simples diminui com o aumento do tempo de cura, o que resulta na deterioração das propriedades do solo. Sendo que para menores teores de diesel a diminuição da resistência ocorre de forma gradual, uma vez que é necessário um maior tempo para que ocorra a interação do diesel com todas as partículas de solo. Já para teores de diesel que excedem 8%, a quantidade de diesel no solo é grande o suficiente para degradar rapidamente as propriedades do solo, de modo que a diminuição na resistência a compressão simples não é claramente afetada pelo aumento do tempo de cura (Chen *et al.*, 2017).

Quando o solo foi estabilizado com cimento, a RCS das amostras com diferentes teores de diesel aumentou com o aumento do tempo de cura, uma vez que com o tempo, a reação de hidratação do cimento, a troca iônica, a agregação e as reações de endurecimento causadas pela adição de cimento ao solo se desenvolveram o suficiente, causando a agregação das partículas do solo e o preenchimento dos poros, de modo que a RCS aumentou com o tempo de cura (Chen *et al.*, 2017).

Karabash *et al.* (2023) observaram que a RCS do solo diminuiu quando contaminado com diferentes tipos de materiais. A redução observada foi de 6,8 vezes em solos contaminados com 18% de petróleo bruto, 3,5 vezes em solos contaminados com 17% de diesel, 3,5 vezes em solos contaminados com 17% de querosene e 5,4 vezes em solos contaminados com 12% de gasolina, em comparação com o solo não contaminado.

Estudos de um solo contaminado com diesel e petróleo bruto e tratado com cimento Portland, pó de calcário e pó de forno de cimento também demonstraram melhorias significativas nos resultados de RCS para misturas tratadas por S/S, sendo que todas passaram no critério de resistência da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA), ou seja, 340 kPa após 28 dias de cura. Além disso, os resultados de RCS dos solos estabilizados foram comparados com os requisitos mínimos de resistência para materiais de estradas pavimentadas e não pavimentadas, 1380 e 690 kPa, respectivamente (Mustafa *et al.*, 2021).

Jayakrishnan, Gracious e Shaju (2021), também observaram uma tendência de diminuição da RCS na ordem de até 45,2% com o aumento do percentual de diesel. Além disso, constatou-se que o óleo diesel diminui a densidade do solo e aumentou os vazios, levando à fragilidade do mesmo, ou seja, à medida que o teor de óleo aumenta, os valores de peso específico seco máximo e teor de umidade ótima tendem a diminuir.

2.5. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Na área geotécnica, no contexto das análises de comportamento, é de extrema importância o estudo das características e o entendimento da estrutura e da microestrutura do solo, uma vez que através desta é possível uma melhor caracterização física entre os agentes cimentantes, o solo e o contaminante, em casos de solos contaminados e estabilizados. Sendo assim, essas análises permitem uma compreensão mais completa das interações entre os componentes do solo, contribuindo para uma melhor avaliação do seu comportamento (Lopera, 2016; Cocke, 1990).

Acredita-se que o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) pode auxiliar na avaliação microestrutural do solo. Essa ferramenta permite a observação e análise de agentes cimentantes, da composição básica intra-agregados, da superfície dos agregados ou revestimentos, bem como contribui para avanços nos estudos sobre os efeitos do manejo e da conservação dos solos (Brizzi *et al.*, 2019).

Em estudo de solo contaminado com cloreto de zinco, através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi possível observar que a estrutura do solo natural apresenta uma matriz mais densa, com poucos vazios. Já na presença do contaminante, verificou-se que os vazios do solo eram mais evidentes, o que explica a menor resistência encontrada para esse tipo de mistura. Após o encapsulamento com cal e cimento, observou-se a formação de pequenos aglomerados, possivelmente devido às reações pozolânicas que geram a floculação e cimentação da estrutura do solo (Perez, 2017).

De forma similar, em estudo realizado em solo contaminado com óleo diesel e encapsulado com cal, constatou-se que no solo na situação natural (Figura 8), os grãos de quartzos estavam bem definidos, visíveis e separados das partículas finas. Já para o solo contaminado (Figura 9), os grãos já não se encontram bem definidos, e as partículas agregadas umas às outras devido a presença do óleo (Mendes; Correia; Portelinha, 2018).

Figura 8: Microscopia eletrônica de varredura - Solo Natural



Fonte: Mendes, Correia e Portelinha (2018)

Figura 9: Microscopia eletrônica de varredura - Solo Contaminado



Fonte: Mendes, Correia e Portelinha (2018)

Após o encapsulamento do solo com o uso da cal, observou-se que os vazios foram preenchidos (Figura 10) e que, juntamente às reações pozolânicas do estabilizante, ocorreu uma maior resistência à mistura. Também foi observada a presença de muitas partículas finas envolvendo os grãos de solo (Mendes; Correia; Portelinha, 2018).

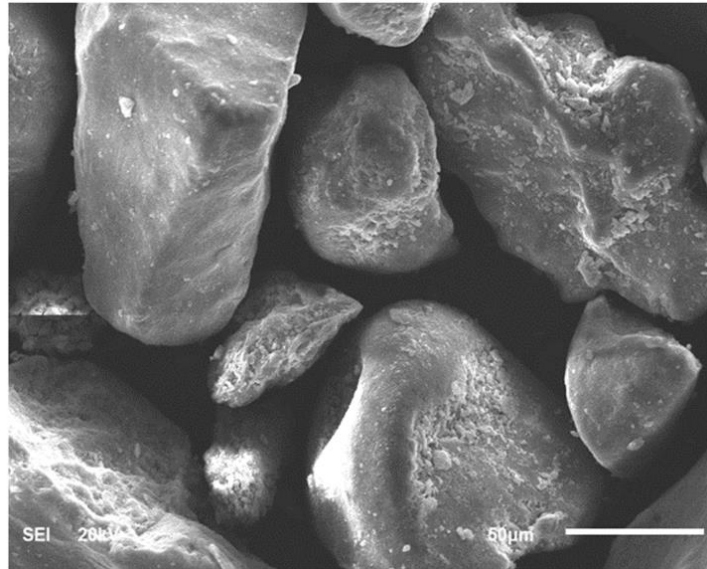
Figura 10: Microscopia eletrônica de varredura - Solo contaminado e encapsulado



Fonte: Mendes, Correia e Portelinha (2018)

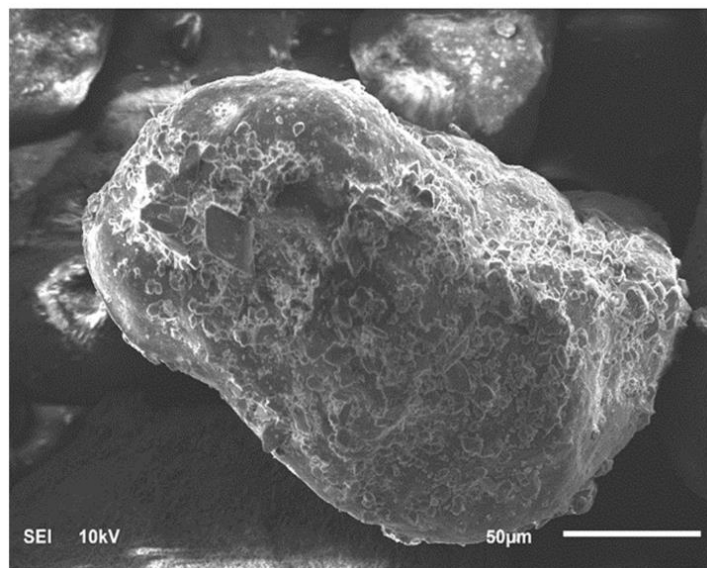
Ahmad *et al.* (2020) realizaram análise de MEV de um solo contaminado com diesel, onde constatou-se que na presença de 10% de diesel houve o revestimento das partículas por produtos de hidrocarbonetos (Figura 11 e Figura 12), afetando assim o contato entre as partículas e resultando em maior aglomeração das mesmas.

Figura 11: MEV - Solo Natural



Fonte: Ahmad *et al.* (2020)

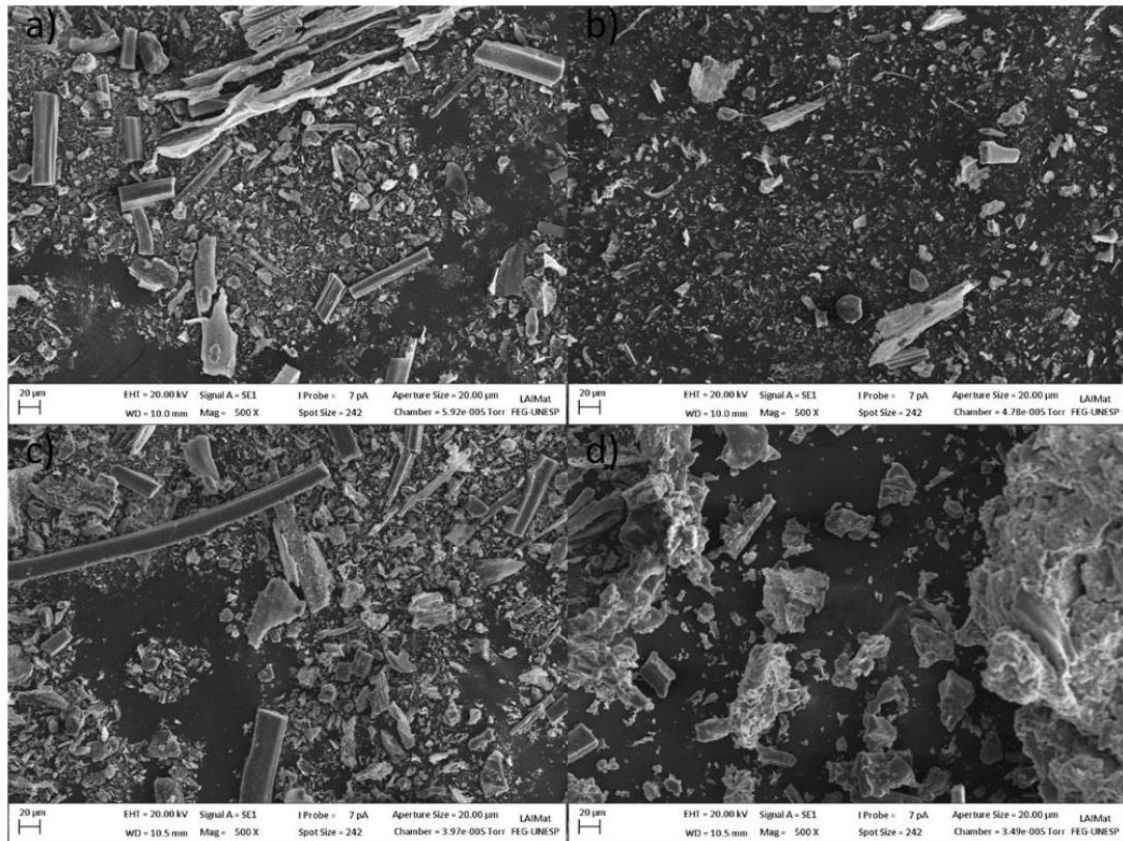
Figura 12: MEV - Solo Contaminado



Fonte: Ahmad *et al.* (2020)

Através da microscopia também foi constatado que a CBCA possui uma superfície porosa, áspera e de formato irregular, conforme pode ser visto na Figura 13 (Cruz *et al.*, 2021).

Figura 13: MEV das CBCA sob aumento de 500 vezes onde a=500°C, b=600°C, c=700°C e d=800°C

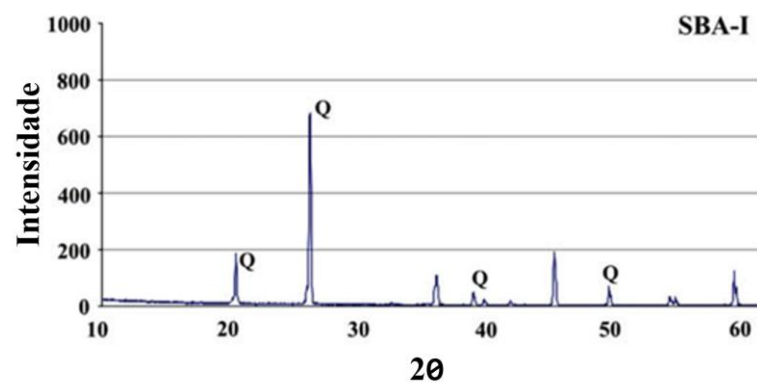


Fonte: Cruz *et al.* (2021)

2.6. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX)

A cristalinidade de uma amostra de CBCA de Ibaté (SP) foi avaliada por meio de difratometria de raios X, a qual não identificou a presença de halo amorfo nos difratogramas (Figura 14), sendo o quartzo identificado como o principal componente do CBCA. Esse resultado apoia a hipótese de que a CBCA pode ser utilizada como substituto do agregado fino, atuando como material inerte, em vez de substituir o cimento Portland, que possui propriedades ligantes (Sales e Lima, 2010).

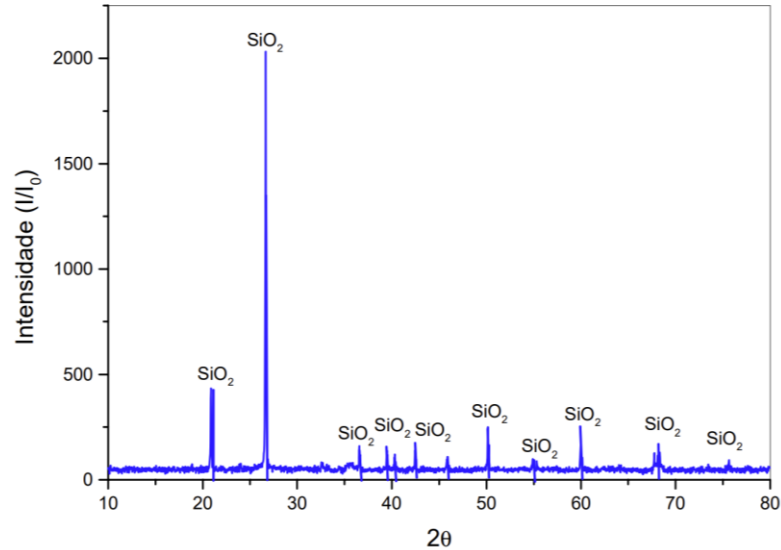
Figura 14: DRX CBCA de Ibaté (SP)



Fonte: Adaptado de Sales e Lima (2010)

Zardo *et al.* (2004), por sua vez analisaram uma amostra de CBCA de uma usina de Araras (SP), e observaram a formação de SiO_2 cristalino (quartzo), porém os picos de intensidade se encontravam mais definidos (Figura 15).

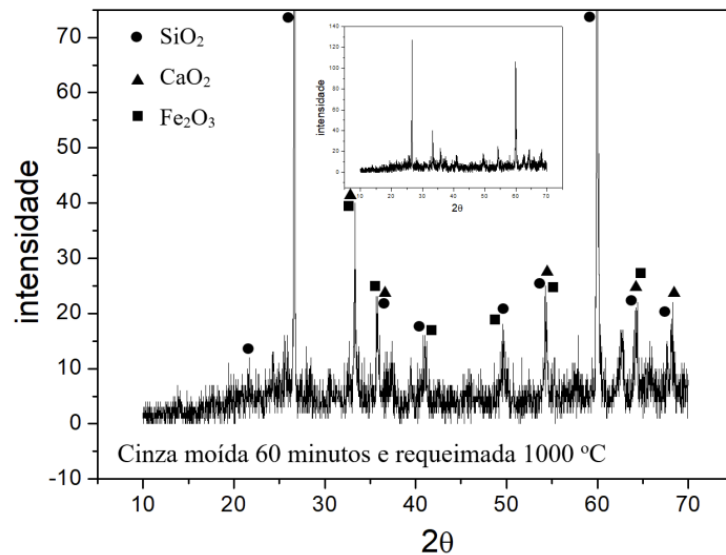
Figura 15: DRX CBCA de Araras (SP)



Fonte: Zardo *et al.* (2004)

Cruz *et al.* (2021) também apontam para a presença do mineral quartzo (sílica cristalina) na composição da CBCA, bem como cristobalita (na posição de $2\theta \sim 21^\circ$). Malacarne (2021), por sua vez, encontraram as seguintes fases cristalinas: quartzo, cal, hematita (Figura 16), alumina, magnésia, caulim, em amostra de CBCA sob diversas temperaturas de queima e moagem.

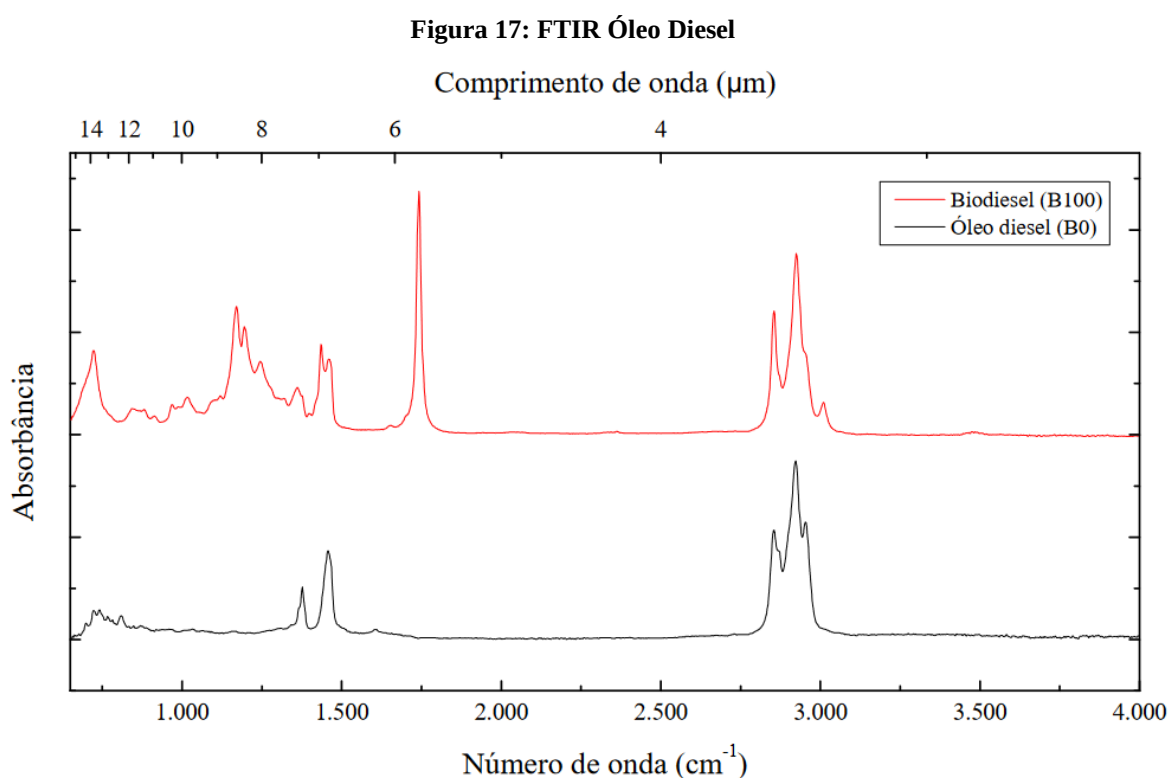
Figura 16: DRX CBCA de Dourados (MS)



Fonte: Malacarne (2021)

2.7. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

O espectro de infravermelho do óleo diesel apresenta três principais regiões de absorção, relacionadas aos modos vibracionais dos alcanos. A região entre 2.840 e 3.000 cm^{-1} exibe a absorção mais intensa, associada às vibrações axiais das ligações C–H nos grupamentos metila (CH_3) e metileno (CH_2). Absorções de intensidade intermediária ocorrem entre 1.300 e 1.500 cm^{-1} , devido às vibrações angulares de deformação angular das ligações C–H dos grupamentos metila e metileno. Já na região próxima a 720 cm^{-1} , há uma absorção de baixa intensidade, resultante das vibrações angulares assimétricas das ligações C–H do grupamento metileno, conforme visto na Figura 17 (Aliske, 2010).



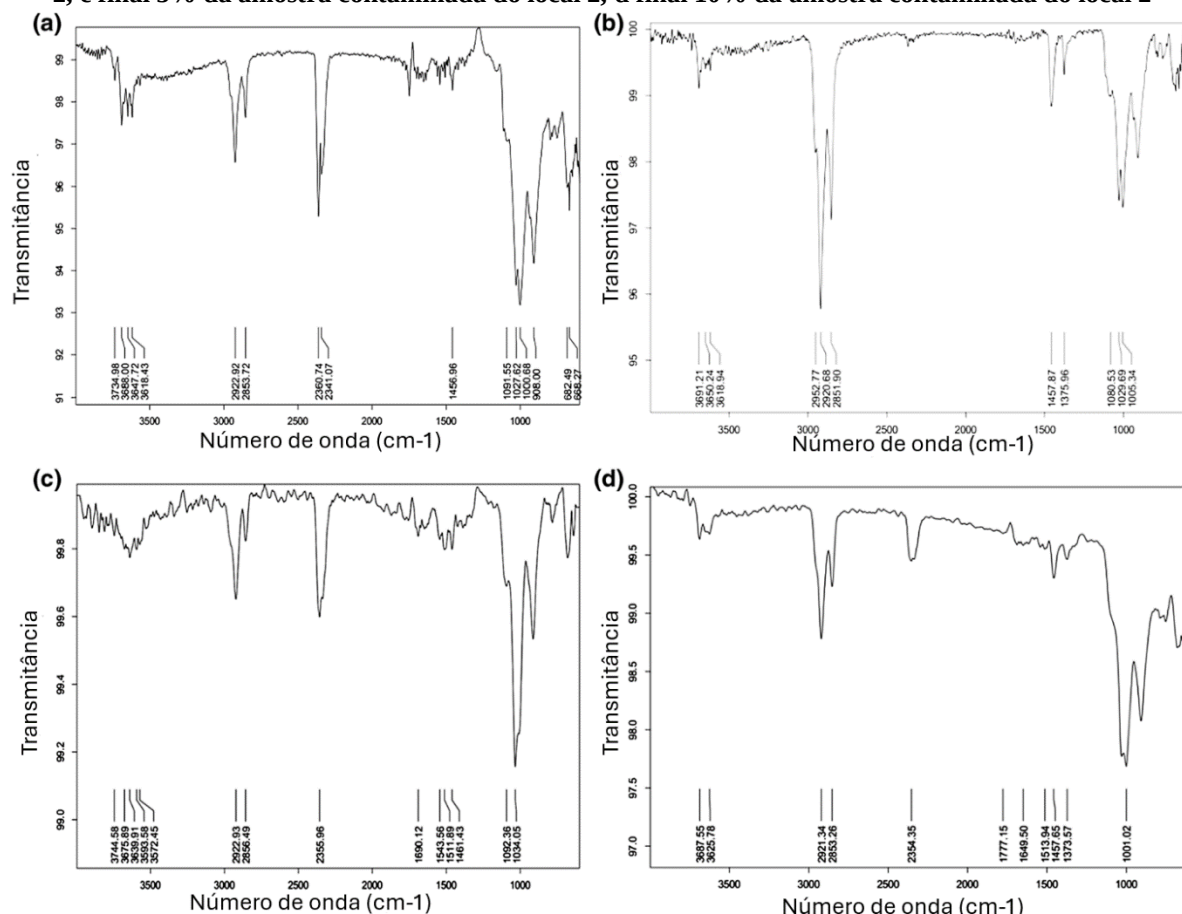
Fonte: Aliske (2010)

Devatha, Vishnu Vishal e Purna Chandra Rao (2019) utilizaram os resultados de FTIR para identificar os grupos funcionais de hidrocarbonetos presentes em amostras de solo contaminadas com 5% e 10% de óleo bruto antes e depois do período de remediação. Os espectros de FTIR indicaram o grupo (O–H) variando de $3618,43$ a $3734,98\text{ cm}^{-1}$ e $3618,94$ a $3691,21\text{ cm}^{-1}$ de número de onda, o grupo (C–H) de $2853,72$ a $2922,92\text{ cm}^{-1}$ e $2851,90$ a $2952,77\text{ cm}^{-1}$, compostos (NH_2 , N–H e C–H) estão entre um número de onda variando de

668,27 a 682,49 cm^{-1} . As ligações C–H e O–H presentes confirmam que o grupo de alcanos de hidrocarbonetos está presente.

Ainda observaram que os grupos funcionais como álcoois, fenóis, grupo metila, hidrocarbonetos alifáticos, e grupo amida são responsáveis pela presença de hidrocarbonetos de petróleo e os mesmos picos característicos foram observados, mas em menor intensidade, nas amostras tratadas (Figura 18), podendo atribuir que as espécies de plantas utilizadas podem degradar a contaminação por óleo após 7 semanas do plantio (Devatha; Vishnu Vishal; Purna Chandra Rao, 2019).

Figura 18: Amostra inicial de 5% do local contaminado 2, b inicial 10% de amostra contaminada do local 2, c final 5% da amostra contaminada do local 2, d final 10% da amostra contaminada do local 2

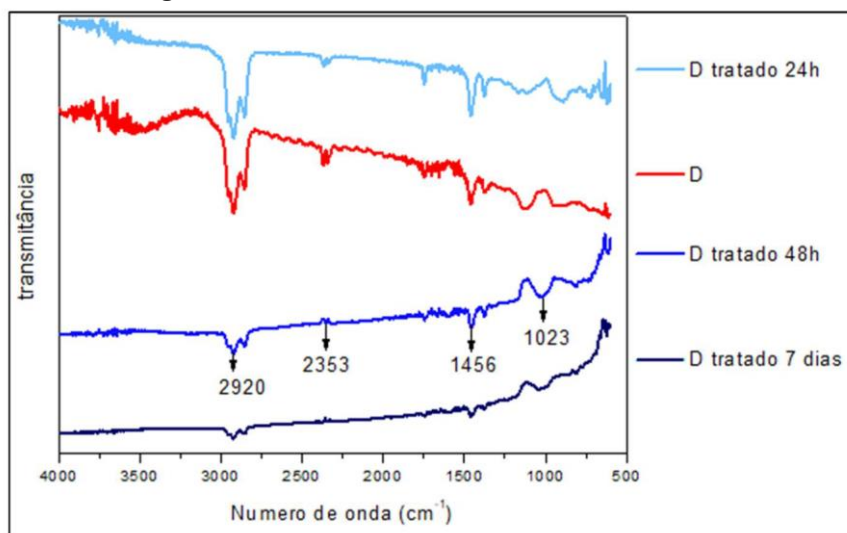


Fonte: Adaptado de Devatha, Vishnu Vishal e Purna Chandra Rao (2019)

Salmazo (2019), por sua vez, avaliou o uso de *Bacillus subtilis* como ferramenta para biodegradação de óleo diesel, a Figura 19 apresenta os espectros de FTIR obtidos de solo contaminado com óleo diesel antes e depois do cultivo de *B. subtilis*. Os picos característicos do óleo diesel foram comparados com as amostras com cultivo de *B. subtilis* após 24h, 48h e 7 dias. Os resultados revelaram uma degradação contínua do diesel por *B. subtilis* em todas as

amostras. Os espectros de óleo diesel na amostra de solo após 24 h mostraram poucas deformidades no pico principal de absorção, indicando um processo de biodegradação lento. A degradação do óleo diesel foi observada pelo desaparecimento dos principais picos característicos, que foram: 2920 cm^{-1} referente ao CH_2 e CH_3 ; 2353 cm^{-1} , para o C-O; 1456 cm^{-1} , para CH_2 ; e 1023 cm^{-1} , para C-O correspondente ao grupo éster.

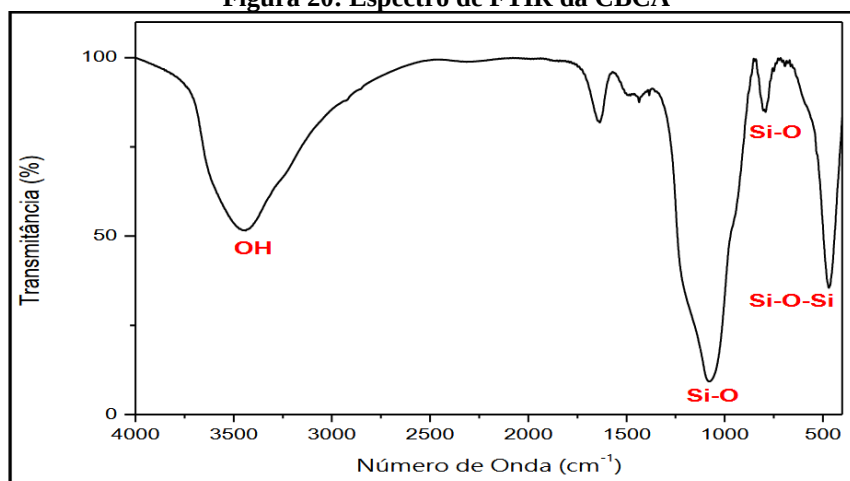
Figura 19: FTIR Diesel tratado com *Bacillus subtilis*



Fonte: Salmazo (2019)

Anhesine *et al.* (2022), por sua vez, realizou o ensaio espectrofotometria de infravermelho da CBCA e na Figura 20 podem ser observados os elementos e compostos (silício e óxido de silício) encontrados. São observadas quatro bandas no espectro de FTIR por volta de 3400, 1080, 798 e 460 cm^{-1} .

Figura 20: Espectro de FTIR da CBCA



Fonte: Anhesine *et al.* (2022)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

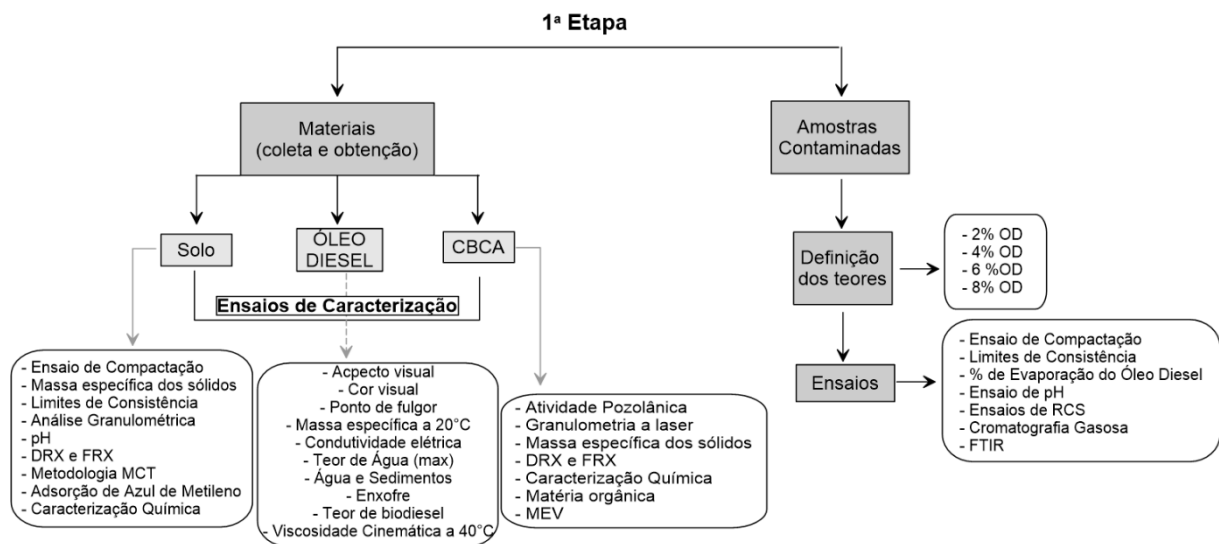
O programa experimental deste trabalho de pesquisa foi dividido em duas etapas distintas, sendo essas:

1ª Etapa: Caracterização dos materiais, e avaliação da influência do óleo diesel nas propriedades geotécnicas de um solo laterítico arenoso; e

2ª Etapa: avaliação da eficiência da adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar no tratamento do solo contaminado.

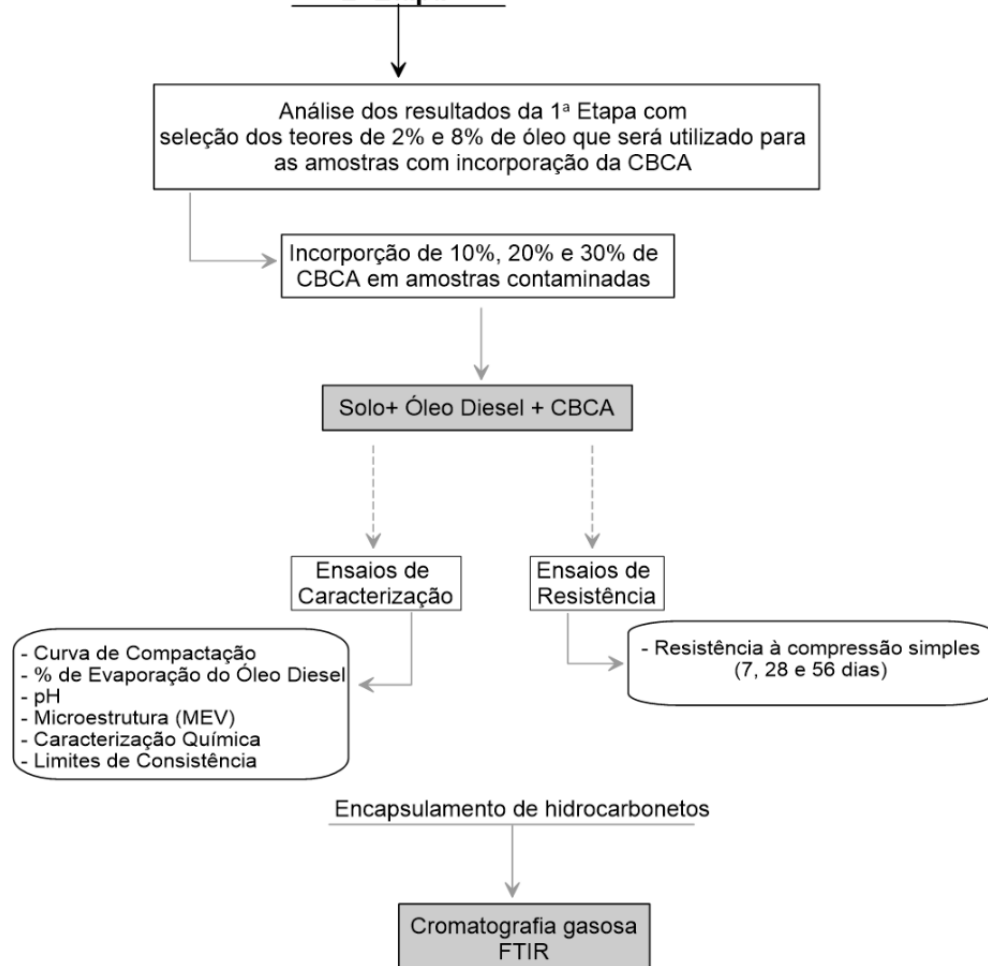
A Figura 21 apresenta um fluxograma com as principais atividades realizadas durante a 1ª etapa da pesquisa, enquanto a Figura 22 apresenta o fluxograma das principais atividades da 2ª etapa. A seguir serão detalhadas cada uma das etapas realizadas.

Figura 21: Fluxograma da 1ª Etapa do programa experimental



Fonte: Autora (2023)

Figura 22: Fluxograma da 2ª Etapa do programa experimental



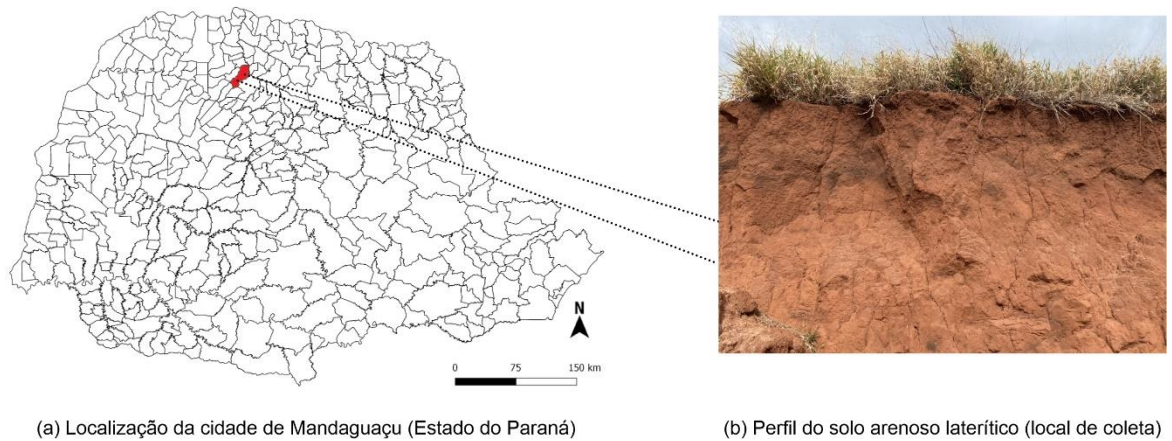
Fonte: Autora (2023)

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Solo

O solo utilizado nesta pesquisa é um solo arenoso laterítico proveniente do município de Mandaguaçu-PR, localizado na latitude: 23°21'45,2" S e longitude: 52°05'23,6"W e utilizado em pesquisas anteriores (Ferreira *et al.*, 2018; Guideli *et al.*, 2018; Ladeira *et al.*, 2019; Rios, 2022; Sguarezi, 2022). A Figura 23 apresenta o talude onde foi realizado a coleta do material. Optou-se pela utilização desse material por se tratar de um solo típico da região Noroeste do Paraná, bem como por ser considerado um solo favorável a estabilização química, uma vez que apresenta baixo teor de matéria orgânica e predominância de argilominerais não expansivos (Rios, 2022).

Figura 23: Local da coleta do solo natural



Fonte: Autora (2023)

Para a presente pesquisa, foram coletados aproximadamente 600 kg de solo, de forma que foram necessárias três coletas nos dias 03/08/2023, 10/08/2023 e 18/08/2023, sendo que tais amostras foram transportadas em sacos plásticos até o Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Maringá (UEM), onde foi passado pela peneira nº 4 (4,8mm), e acondicionadas em bandejas metálicas e lona, a fim de atingirem o teor de umidade higroscópico em local sem vento e sol (Figura 24), posteriormente, as amostras devidamente preparadas, foram armazenadas em tambores plásticos.

Figura 24: Processo de preparo da amostra de solo (Secagem)



Fonte: Autora (2023)

3.1.2. Óleo diesel

O contaminante selecionado para a pesquisa foi o óleo diesel tipo S500, que se trata de um combustível fóssil, composto por hidrocarbonetos e pequena quantidade de nitrogênio, oxigênio e enxofre, com aspecto líquido límpido avermelhado, pouco volátil e imiscível em água (Silva e Correia, 2018).

O óleo S500 foi obtido em um posto de combustível comercial localizado no município de Maringá-PR. Optou-se pelo emprego deste tipo de óleo uma vez que o mesmo é comercializado em posto de combustível, bem como por ser atualmente objeto de diversas pesquisas como Silva e Correia (2018), Mendes, Correia e Portelinha (2019), e Portelinha *et. al.*, (2021). O Laboratório da Universidade Estadual de Maringá (UEM) é responsável pelo controle da qualidade da amostra de óleo S500 comercializada neste posto de combustível, o que facilita a obtenção de amostras bem caracterizadas.

Conforme consta em laudo no Anexo A, as características da amostra de óleo diesel S500 foram quantificadas pelo Laboratório de Análise de Combustíveis da UEM. Os parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Análise do combustível - UEM

Característica (*)	Unidade	Resultado	Especificação (*) B S 500	Método
Aspecto visual	-	L.I.I	L.I.I (1)	Visual
Cor visual	-	Avermelhado	(2)	Visual
Ponto de fulgor	°C	43,5	38 (min)	NBR 7974
Massa específica 20°C	kg/m³	844,3	815 a 885,0	NBR 7148
Condutividade elétrica	pS/m	189	25 (min)	D2624/D4308
Teor de Água (max)	mg/kg	171	500	D6304

(1) Límpido e isento de impurezas

(2) Conforme disposto no art 11, da Resolução nº. 65 de 9.12.2011

a) A partir de 1º de julho de 2012, “vermelho” para o óleo diesel S500

b) O corante vermelho deve ser adicionado de forma tal que seu teor na mistura seja de 20mg/L

Fonte: Autora (2023)

No laboratório de análises de combustíveis Automotivos – LACAUT, de Curitiba-PR, foram realizadas as seguintes análises: aspecto, água e sedimentos, cor, destilação, 10% vol. recuperados, 50% vol. recuperados, 85% vol. recuperados, 95%vol. recuperados, enxofre, massa específica a 20°C, ponto de fulgor, teor de água, teor de biodiesel, e viscosidade cinemática a 40°C (Tabela 4)

Tabela 4: Análise do combustível - LACAUT

Análise	Resultado	Limite (1)	Incerteza de medição	Fator de Abrangência (k)	Unidade	Método
Água e Sedimentos	< 0,01	0,05 máx	-	-	% volume	ASTM D2709-22
10% vol. Recuperados	192,2	Anotar	3,6	2,13		
50% vol. Recuperados	288,0	245,0 a 310,0	2,8	2,11		
85% vol. Recuperados	343,10	360,0 máx	2,2	2,01	°C	ASTM D86-23
90% vol. Recuperados	353,9	Anotar	2,7	2,00		
95% vol. Recuperados	376,3	-	3,4	2,03		
Enxofre	311	500 máx	9,0	2,00	mg/kg	ASTM D7039-20
Teor de biodiesel	13,6	14 mín (2)	0,3	2,03	% volume	EN 14078-14
Viscosidade Cinemática a 40°C	2,903	2,0 a 5,0	0,062	2,18	mm²/s	ASTM D445-21 ^{E2}

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, que para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (v_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

Nota (1): Os limites citados para as análises referem-se à Resolução n°. 50/2013 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) e resoluções n°. 8 de 19 de dezembro de 2023 e n°. 16 de 29 de outubro de 2018 do Conselho Nacional de Política Energética CNPE.

Nota (2): O limite citado para a análise refere-se percentual estabelecido pela legislação vigente, conforme Resoluções n°. 8 de 19 de dezembro de 2023 e n°. 16 de 29 de outubro de 2018 do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE e a Resolução n°. 50/2013 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Segundo esta mesma resolução será admitida variação de +/-0,5% do volume.

Fonte: Autora (2023)

3.1.3. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA)

As amostras de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pela Usina Renuka Vale do Ivaí S/A, no município de São Pedro do Ivaí, localizada no estado do Paraná (Figura 25).

Figura 25: Usina Renuka Vale do Ivaí S/A



Fonte: Victória Brasil (2023)

A usina produz cerca de 2700 toneladas de bagaço por dia, sendo que a cinza gerada diariamente é de aproximadamente 55,89 toneladas, obtida a partir da queima do bagaço a uma temperatura estimada de 800°C (Filho e Martins, 2015).

No complexo são geradas a cinza pesada e a cinza leve, uma vez que a caldeira possui uma tecnologia que permite a coleta da cinza leve, que é arrastada junto aos gases de exaustão e retirada por um lavador de gases. Essa cinza, juntamente com água, é levada para um tanque (Figura 26-a), e posteriormente para um filtro tambor rotativo a vácuo (Figura 26-b) com a função de separar a cinza leve da água da lavagem. Finalmente, a água da lavagem é direcionada para um decantador (Figura 26-c) a fim de realizar o seu tratamento e posterior reutilização, enquanto a cinza é direcionada para uma caçamba de um caminhão (Figura 26-d) para posterior descarte (Filho e Martins, 2015). Uma vez realocada nos caminhões de coleta, a cinza, bem como outros resíduos gerados pela usina, é transferida para depósito de resíduos (Figura 26-e).

Para este trabalho de pesquisa optou-se pela utilização da cinza leve, que foi coletada em sacos plásticos e levada ao Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, onde foi seca em temperatura ambiente e posteriormente peneirada na malha 0,075mm (peneira n° 200) para retirada de partículas provenientes da combustão incompleta e homogeneização do material, de forma similar a Berenguer (2019), Cordeiro (2006) e Silva *et al.* (2019). A Figura 27 apresenta amostra da cinza natural e da cinza passada na peneira n°. 200.

Figura 26: Processo de geração da cinza do bagaço da cana-de-açúcar



(a) tanque com cinza e água



(b) filtro tambor rotativo



(c) decantador



(d) plataforma de abastecimento

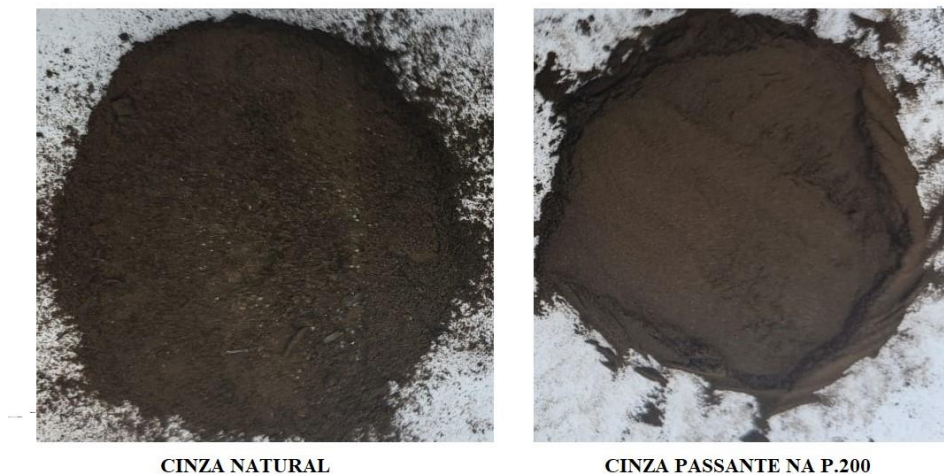


(e) depósito de resíduos

Fonte: Autora (2023)

Salienta-se que a utilização da CBCA leve em oposição a CBCA pesada se deve ao fato de pesquisas apontarem que a CBCA leve apresenta atividade pozolânica enquanto a CBCA pesada não apresenta (Castro, 2015). Optou-se pela não requeima e moagem do material uma vez que se objetivava o uso de um resíduo gerado na sua forma natural e sem utilização de consumo de energia adicional que poderia inviabilizar o seu uso futuro.

Figura 27: Amostra da CBCA leve após coleta e preparo para a pesquisa



Fonte: Autora (2023)

3.1.4. Misturas de solo e óleo diesel

Inicialmente estabeleceu-se a utilização dos teores de óleo diesel de 4%, 8% e 12% em relação a massa seca de solo. Esses teores foram estabelecidos com base em diversos estudos realizados anteriormente (Silva e Correia, 2018; Portelinha *et. al*, 2021; Safedian; Rajabi; Ghasemzadeh, 2018). Porém durante os ensaios de compactação observou-se que a trabalhabilidade do material e a dificuldade da mistura do solo com o óleo e a água poderiam inviabilizar o uso de 12% de óleo diesel. Observou-se ainda um grande acúmulo de líquido durante a compactação e uma compactação não homogênea (Figura 28), além disso, o solo escorregava do cilindro durante a desforma. Em razão disso, optou-se por estabelecer novos teores de óleo diesel, fixando-os em 2%, 4%, 6% e 8%, relativos à massa seca do solo. As porcentagens de 8% e 12% são indicativas de níveis de contaminação por derramamento (Daciolo; Correia; Portelinha, 2017). Adicionalmente Shah (2003), aponta para porcentagens entre 7% e 10% na índia.

Figura 28: Ensaio de compactação 8% de óleo diesel



Fonte: Autora (2023)

O preparo das amostras de solo com óleo diesel foi realizado da seguinte forma: a) secagem prévia do solo em bandejas por um período mínimo de 48 horas (Figura 29-a); b) posteriormente o solo foi seco em estufa, na temperatura de 105°C, por um período de 48 horas, conforme Figura 29-b visando eliminar parte da água contida na amostra (Portelinha *et al.*, 2021); c) na sequência o solo foi passado na peneira nº 2, visando sua melhor homogeneização e por fim d) adição do óleo diesel ao solo seco dentro de um saco plástico (Figura 29-c). O uso do saco plástico é recomendado na literatura visando prevenir a evaporação do óleo diesel (Portelinha *et al.*, 2021). O saco deve ser selado e os materiais devidamente misturados até atingir uma consistência homogênea e uniforme. Estabeleceu-se um período de 72 horas de repouso, em ambiente com temperatura e umidade controlada. Após esse período o ensaio de compactação foi realizado. A Figura 30 apresenta o aspecto visual das amostras com diferentes teores de óleo diesel.

Figura 29: Preparo das amostras de solo e óleo diesel para ensaio de compactação



(a) Secagem do solo em bandeja

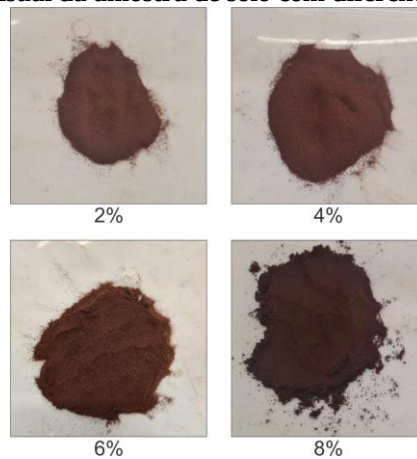


(b) Secagem do solo em estufa



(c) Solo contaminado com óleo diesel e acondicionado em saco plástico

Fonte: Autora (2023)

Figura 30: Aspecto visual da amostra de solo com diferentes teores de óleo diesel**Fonte: Autora (2023)****3.1.5. Misturas de solo, óleo diesel e CBCA**

Na 2ª etapa experimental deste projeto, foi adicionada a CBCA no solo contaminado com óleo diesel. Optou-se por fixar os teores de 2% e 8% de óleo diesel a fim de avaliar as duas situações de contaminação. Para a estabilização do solo contaminado foram adicionados teores de 10, 20% e 30% de CBCA.

O processo de mistura foi composto pelas seguintes fases: definição do teor de cinza a ser utilizado em relação a massa seca total da amostra, ou seja, para a amostra de 20% CBCA, serão utilizados 20% de cinza e 80% de solo. A Tabela 5 apresenta as matrizes estudadas neste projeto de pesquisa.

Tabela 5: Matrizes estudadas

Mistura	Solo seco (%)	Óleo diesel (%)	CBCA (%)
SN	100	-	-
SN + 2%OD	100	2	-
SN + 4%OD	100	4	-
SN + 6%OD	100	6	-
SN + 8%OD	100	8	-
SN + 20CBCA	80	-	20
SO ₂ CBCA ₁₀	90	2	10
SO ₂ CBCA ₂₀	80	2	20
SO ₂ CBCA ₃₀	70	2	30
SO ₈ CBCA ₁₀	90	8	10
SO ₈ CBCA ₂₀	80	8	20
SO ₈ CBCA ₃₀	70	8	30

Fonte: Autora (2024)

Uma vez definidos os teores a serem utilizados, o solo é contaminado com óleo diesel e submetido a uma homogeneização por 72 horas, enquanto, paralelamente, a CBCA é seca em estufa pelo mesmo período. Após essas 72 horas, a CBCA é retirada da estufa e misturada ao solo já contaminado, sendo então homogeneizados por mais 72 horas. Esse processo totaliza 144 horas, desde a contaminação inicial até que o material esteja pronto para os ensaios. A Figura 31 mostra o aspecto visual das amostras tratadas com CBCA.

Figura 31: Aspecto visual das misturas de SN-OD-CBCA



Fonte: Autora (2024)

3.2. ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Para a caracterização geotécnica do solo foram realizados os seguintes ensaios: análise granulométrica, massa específica dos sólidos, limite de liquidez e limite de plasticidade, realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá e foram utilizadas amostras deformadas de solo. Já para a CBCA foram realizados ensaios de massa específica dos sólidos e análise granulométrica a laser.

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade também foram repetidos para as amostras de solo contaminado com óleo diesel, e posteriormente para as amostras de solo-diesel-CBCA. Para a realização dos ensaios de caracterização, as amostras foram preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica. A Figura 32 e Tabela 6 apresentam algumas etapas dos ensaios de caracterização do solo natural.

Tabela 6: Ensaios de caracterização

Ensaio	Norma	Condição
Solo – Análise granulométrica	NBR 7181:2016	Solo Natural
Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica	NBR 6508:1984	Solo Natural e CBCA
Solo – Determinação do limite de liquidez	NBR 6459:2016	Solo natural; Solo-óleo diesel; solo-diesel-CBCA
Solo – Determinação do limite de plasticidade	NBR 7180:2016	Solo natural; Solo-óleo diesel; solo-diesel-CBCA

Fonte: Autora (2023)

Figura 32: Ensaios de caracterização geotécnica em andamento

(a) Ensaio de sedimentação



(b) Picnômetros (Massa específica dos sólidos)



(c) Limite de liquidez



(d) Limite de plasticidade

Fonte: Autora (2023)

Para a análise granulométrica da cinza foi empregado o ensaio de difração a laser (Figura 33), realizado no laboratório COMCAP da UEM. Como a CBCA se apresenta com aspecto pulverulento e com características diferentes do solo natural, a técnica de sedimentação não se apresenta adequada para essa análise quantitativa. O ensaio foi realizado utilizando-se a amostra de CBCA passante na peneira nº 200.

Este método oferece informações sobre a distribuição do tamanho das partículas utilizando a técnica de difração a laser e se fundamenta no fato de que as partículas dispersam a luz em todas as direções, gerando um padrão de intensidade que varia de acordo com o tamanho das partículas (ISO 13320-1, 1999).

Para a análise também são utilizados dispersantes cuja função é realizar a separação dos aglomerados de partículas, sendo que comumente utiliza-se a água, entretanto o dispersante pode ser qualquer líquido que seja límpido e opticamente uniforme, desde que a amostra não seja solúvel nesse dispersante, não afetando assim o tamanho original da amostra (França e Couto, 2007).

Figura 33: Equipamento de difração a laser



Fonte: Autora (2023)

As análises podem ser realizadas utilizando-se as teorias de Mie e Fraunhofer, sendo recomendado o uso da teoria de espalhamento Mie quando já se tem o conhecimento prévio dos índices de refração do material analisado. Já a aproximação de Fraunhofer é recomendada para partículas opacas e maiores que o comprimento de onda da luz (Papini, 2003).

3.2.1. Análise Granulométrica

A seguir são apresentados os resultados de caracterização geotécnica do solo natural (Tabela 7), com uso de defloculante. A Figura 34 apresenta a curva de distribuição granulométrica do solo. Os resultados se aproximam daqueles que foram obtidos anteriormente por Sguarezi (2022) e Rios (2022), realizados para amostras de solo proveniente do mesmo município.

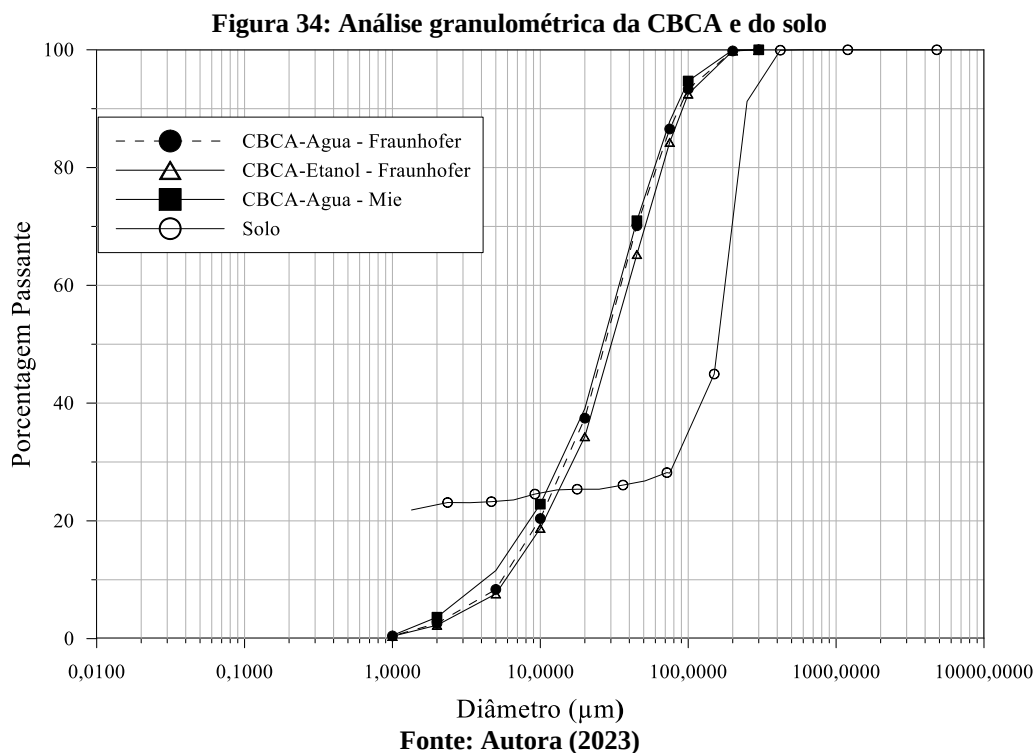
Tabela 7: Resultados de caracterização do solo	
Parâmetros geotécnicos	Solo
D ₁₀ (mm)	0,00135
D ₃₀ (mm)	0,088
D ₆₀ (mm)	0,18
Cu	133
Cc	32
Fração Argila (%)	23
Fração Silte (%)	5
Fração Areia (%)	72
Limite de Liquidez (%)	25
Limite de Plasticidade	15
Índice de Plasticidade	10
Classificação unificada	SC - Areia argilosa
Classificação AASHTO	A-2-4
IG	0
ρ_s (kN/m ³)	26,3

Fonte: Autora (2023)

Os sistemas de classificação indicaram que de acordo com classificação unificada o solo é uma areia argilosa (SC) e de acordo com a classificação AASHTO é do tipo A-2-4 (pedregulhos ou areais siltsos ou argilosos, com bom comportamento de subleito).

Para Cc entre 1 e 3 o solo é considerado bem graduado, já para Cu entre 4 e 6 o solo também é considerado bem graduado (Martins, 2020), para ambos os casos se constatou que o solo utilizado nesta pesquisa é mal graduado.

A análise granulométrica da CBCA foi realizada a laser e utilizando o etanol como dispersante pela teoria de Fraunhofer e o dispersante água destilada pelas teorias Mie e Fraunhofer. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 34.



Observa-se que, em sua fração mais grossa, o material apresentou granulometria similar, porém ocorreram as maiores variações no trecho de granulometria mais fina do material, o que já era previsto, uma vez que a teoria de Fraunhofer é recomendada para partículas maiores.

França e Couto (2007) realizaram ensaios com os dispersantes água e etanol, que apresentam os índices de refração 1,33 e 1,36 respectivamente, demonstrando a diferença de refração entre ambos e justificando o deslocamento da curva com o dispersante etanol em relação ao dispersante água.

A distribuição das partículas indicou que cerca de 22% das partículas apresentam diâmetro entre 1-10 μm , 72% apresentam diâmetro entre 10-100 μm e cerca de 6% apresentam diâmetro superior a 100 μm . Há na literatura recomendações de que quase a totalidade das partículas de pozolanas se encontrem abaixo da peneira de 35 μm (John; Cincotto; Silva, 2003 *apud* Sales, 2014). Alguns autores consideram que apenas as partículas abaixo de 15 μm possuem atividade pozolânica (Isaia, 2007 *apud* Sales, 2014). Quando isso não ocorre, pode-se realizar a moagem, tendo como consequência a finura e atividade pozolânica aumentadas (Garcés *et al.*, 2010).

Para a presente pesquisa foi observado que apenas 22% das partículas apresentam diâmetro inferior a 10 μm , podendo apontar para uma baixa atividade pozolânica, porém optou-se pela não moagem do material uma vez que se objetivava o uso de um resíduo gerado na sua

forma natural e sem utilização de gasto de energia adicional que poderia inviabilizar o seu uso futuro.

3.2.2. Massa Específica

O ensaio de massa específica dos grãos para o solo natural indicou que a massa específica dos sólidos (ρ_s) é igual a $26,3 \text{ kN/m}^3$, correspondente ao valor encontrado por Rios (2022), e similar ao valor de $26,9 \text{ kN/m}^3$ obtido por Ladeira *et al.* (2019). Gonçalves *et al.* (2018) observou um valor de $27,8 \text{ kN/m}^3$ para solos do mesmo município. O resultado indica a predominância de quartzo, o que é coerente com solos arenosos (Rios, 2022).

Já a análise da massa específica da CBCA (Figura 35) foi obtido um valor de $26,10 \text{ kN/m}^3$, o que corresponde aos valores obtidos por Freitas (2005), Nunes (2009) e Mansaneira (2010). Tal valor corresponde ao esperado, uma vez que o mineral predominante na CBCA é a sílica, que apresenta valores de massa específica entre $22,00 \text{ kN/m}^3$ para sílica ativa e $26,50 \text{ kN/m}^3$ para o quartzo (Filho, 2012).

Figura 35: Massa específica da CBCA



Fonte: Autora (2024)

3.2.3. Limites de Atterberg

Os valores obtidos para os limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade obtidos para o solo natural estão próximos aos resultados obtidos por Rios (2022), Ladeira *et al.* (2019), Guideli *et al.* (2018) e Ferreira *et al.* (2018), obtidos para solos do município de Mandaguaçu-PR (Tabela 8).

Tabela 8: Limites de Atterberg para o solo de Mandaguaçu-PR

Trabalhos	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade IP
Autora (2023)	25	15	10
RIOS (2022)	25	13	12
Ladeira <i>et al.</i> (2019)	29	16	13
Guideli <i>et al.</i> (2018)	26	16	10
Ferreira <i>et al.</i> (2018)	31	15	16

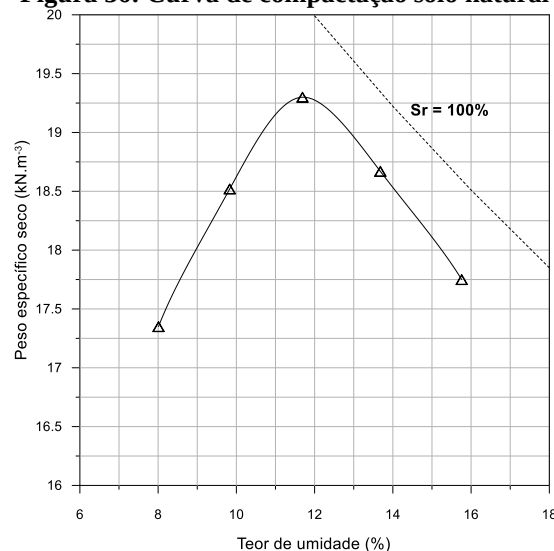
Fonte: Autora (2023)

3.2.4. Ensaio de compactação do solo e das misturas

Os ensaios de compactação foram realizados na energia normal (Proctor normal) utilizando-se o cilindro metálico e o soquete pequenos e seguindo as orientações da NBR 7182 (ABNT, 2016). Optou-se pelo não reuso do material, sobretudo porque a adição de óleo diesel dificulta a garantia de obtenção de uma amostra homogênea. A amostra de solo utilizada foi seca ao ar até a umidade higroscópica, e passada integralmente na peneira 4,8 mm.

As curvas de compactação foram realizadas para as amostras de solo natural e solo contaminado com 2%, 4%, 6% e 8% de óleo diesel. Posteriormente foram realizados para as amostras contaminadas com 2% e 8% de diesel e tratadas com 10%, 20% e 30% de CBCA.

A Figura 36 apresenta a curva de compactação do solo natural, onde observou-se um teor de umidade ótimo de 11,69% e peso específico seco máximo de 19,30 kN/m³. Os valores se apresentaram similares a valores obtidos em pesquisas anteriores (Tabela 9).

Figura 36: Curva de compactação solo natural

Fonte: Autora (2023)

Tabela 9: Comparativo dos parâmetros de compactação

Autores	w_{ot} (%)	γ_{dmáx.} (kN/m³)
Autora (2023)	11,69	19,30
Rios (2022)	11,60	19,23
Ladeira et al (2019)	12,20	18,75

Fonte: Autora (2023)

3.2.5. Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova (CP) foi realizada utilizando como referência os parâmetros obtidos das curvas de compactação dos materiais: massa específica seca máxima e teor de fluídos ótimo. Os corpos de prova para os ensaios de RCS foram compactados em três camadas, com dimensões de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro (Figura 37).

Após a moldagem, os CP foram removidos do molde metálico, suas dimensões e massa foram devidamente aferidas e em seguida o CP foi acondicionado em um saco plástico, devidamente identificado e vedado para evitar variações significativas no teor de fluídos. Os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura, em câmara úmida com temperatura e umidade controlados, por períodos de 7, 28 e 56 dias.

Nesta pesquisa, o solo natural será referenciado como SN, solo contaminado com óleo diesel como SN + 2%OD para 2% de óleo diesel, SN + 4%OD para 4% de óleo diesel, SN + 6%OD para 6% de óleo diesel e SN + 8%OD para 8% de óleo diesel. Já para as misturas estabilizadas com a cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar, SO₂CBCA₁₀, para um solo contaminado com 2% de óleo diesel e tratado com 10% de cinza, SO₈CBCA₁₀, para um solo contaminado com 8% de óleo diesel e tratado com 10% de cinza e assim sucessivamente, sendo a porcentagem de contaminante e cinza referente ao peso seco total. Também foi realizada a análise de uma mistura adicional composta por 80% de solo e 20% de cinza em relação a massa seca total, a fim de comparar a influência do óleo na mistura com a CBCA.

Figura 37: Moldagem dos CPs



Fonte: Autora (2024)

3.2.6. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Os ensaios de RCS foram realizados de acordo com a NBR 12770 (ABNT, 2022) utilizando a prensa do Laboratório de Geotecnia da Universidade Estadual de Maringá (UEM). Foi acoplado na prensa uma célula de carga de 2 kN, em velocidade controlada de 0,5mm/min. Além disso, dois transdutores de deslocamento verticais foram utilizados para monitoramento dos deslocamentos e/ou deformações durante a ruptura das amostras. A Figura 38 ilustra o ensaio de RCS em andamento.

Figura 38: Ensaio de RCS em andamento



Fonte: Autora (2023)

Os ensaios foram realizados com o intuito de obter a resistência do solo não contaminado, do solo contaminado com diferentes teores de óleo diesel e do solo contaminado e tratado com diferentes teores de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

As amostras de solos não contaminadas e contaminadas para os testes de resistência à compressão simples foram preparadas no mesmo peso específico seco para eliminar o efeito da variação do peso específico seco para diferentes teores de fluido (Karabash *et al.*, 2023). Porém, após a mistura da CBCA os valores de peso específico seco e teor de fluídos apresentaram grandes variações, impossibilitando a padronização do peso específico seco e teor de fluídos

para as amostras com CBCA, utilizando assim o peso específico seco máximo e teor de fluido ótimos correspondentes à cada curva de compactação para as misturas com a CBCA.

3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

3.3.1. Caracterização química

A caracterização inicial das amostras de solo foi realizada de acordo com as metodologias IAC (Instituto Agrônomo) para análise física e a metodologia EMBRAPA para análises químicas. As análises foram realizadas no Laboratório AgriSolum, externo à UEM, e consistiram em analisar valores de pH (CaCl_2 e H_2O); carbono; matéria orgânica; capacidade de troca de cátions (CTC); CTC efetiva; ferro; zinco; manganês; frações de argila, areia, e silte no solo (Tabela 10).

Tabela 10: Análise química do solo

Atributos Químicos						
	Unidade	Am. 01	Am. 02	Am. 03	Média	Desvio padrão
pH em CaCl_2		4	4	4	4,00	0,00
pH em H_2O		4,3	4,5	4,5	4,43	0,12
MO	%	0,24	0,30	0,24	0,26	0,03%
CTC	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	3,11	4,52	3,48	3,70	0,73
CTC efetiva	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	0,99	1,02	1,1	1,04	0,06
Cálcio (Ca^{2+})	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	0,1	0,12	0,12	0,11	0,01
Magnésio (Mg^{2+})	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	0,06	0,07	0,08	0,07	0,01
Potássio (K^+)	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01
Fósforo (P)	mg/dm^3	0,09	0,09	0,18	0,12	0,05
Enxofre (S)	mg/dm^3	Ns	Ns	ns	Ns	Ns
Boro (B)	mg/dm^3	Ns	Ns	ns	Ns	Ns
Cobre (Cu)	mg/dm^3	0,78	0,84	1,02	0,88	0,12
Ferro (Fe)	mg/dm^3	41,64	40,32	50,1	44,02	5,31
Manganês (Mn)	mg/dm^3	6,42	6,6	7,92	6,98	0,82
Zinco (Zn)	mg/dm^3	4,56	0,42	0,5	1,83	2,37

Fonte: Autora (2023)

Os resultados da análise química das três amostras analisadas demonstram a baixa variabilidade e homogeneidade entre os resultados. Conforme esperado, observou-se a baixa porcentagem de matéria orgânica (em média 0,26 %), de forma similar ao constatado por Rios (2022), uma vez que ambos os solos provêm do município de Mandaguaçu-PR. O baixo valor de CTC também está relacionado com a baixa porcentagem de matéria orgânica contida nas amostras de solo, como também ao tipo de argilomineral.

Conforme observado em pesquisas anteriores (Rios, 2022), o pH do solo é ácido, enquanto a concentração de ferro é elevada, sobretudo considerando que solo apresenta comportamento laterítico e com presença de óxidos na sua composição.

No caso da CBCA, foram analisadas a CTC e a matéria orgânica, além do levantamento de elementos químicos. Os resultados da análise química da amostra são apresentados nas tabelas (Tabela 11 e Tabela 12), onde foi possível observar uma maior quantidade de ferro (10,77%) em relação aos outros nutrientes.

Tabela 11: Atributos Químicos

Atributos Químicos		
Atributos	Método	
Carbono orgânico		2,63 %
Umidade à 65°	Total	1,29 %
CTC	Mmol C/Kg ⁻¹	31,77

Fonte: Autora (2023)

Tabela 12: Análise Química

Macronutrientes	Método	%	Micronutrientes	Método	%
N – Total	Oxidação ac. perclórico	0,37	Cu	Total	0,02
P ₂ O ₅	Total	0,54	Fe	Total	10,77
K ₂ O	Solúvel em água	0,16	Mn	Total	0,15
Ca	Total	0,65	Zn	Total	0,3
Mg	Total	0,31	B	Total	0,003
S	Total	0,4			

Fonte: Autora (2023)

A determinação da quantidade de matéria orgânica em solos é baseada na sua oxidação a CO₂ por íons dicromato, em meio fortemente ácido. Como tal método determina o teor de carbono orgânico, a conversão para matéria orgânica é feita por meio do fator de van Bemmelen (1,724), uma vez que se pressupõe de que a matéria orgânica do solo contém 58 % de carbono orgânico (EMBRAPA, 2009)

A partir da análise dos resultados, observou-se que a matéria orgânica presente na cinza corresponde a 4,53%, valor maior em comparação com a matéria orgânica presente no solo (0,24%) e, conforme explicado por Sobral *et al.* (2015), por ser superior a 3% é considerado um valor alto. Também se observou o aumento da CTC quando comparado com o do solo (3,70) sendo considerado alto o valor de CTC acima de 15 (Sobral *et al.*, 2015).

3.3.2. Fluorescência de Raio-X (FRX)

Os ensaios de FRX foram feitos em amostras passante na peneira n° 200, e realizados pelo Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A Tabela 13 apresenta os resultados da análise de fluorescência de raios-x do solo natural, sendo observado que os elementos encontrados em maior quantidade foram: silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe).

O silício é o elemento presente em maior quantidade na amostra, conforme esperado, uma vez que tal amostra têm como granulometria predominante a areia. A presença de alumínio e o ferro são justificadas pelo comportamento laterítico do solo estudado. Elementos que também estão presentes são: titânio (Ti), enxofre (S), cálcio (Ca), potássio (K), manganês (Mn) e zircônio (Zr). Tais valores foram semelhantes aos encontrados por Gonçalves *et al.* (2018), para o solo de Mandaguaçu-PR.

Tabela 13: Composição química do Solo Natural

Elemento	Fórmula Composta	Concentração (%)
Si	SiO ₂	59.743
Al	Al ₂ O ₃	28.818
Fe	Fe ₂ O ₃	8.945
Ti	TiO ₂	1.853
S	S	0.278
Ca	CaO	0.119
K	K	0.099
Mn	MnO	0.097
Zr	ZrO ₂	0.047

Fonte: Autora (2024)

Os constituintes químicos da CBCA também foram analisados de forma qualitativa e quantitativa através do ensaio de fluorescência de raio X (FRX). A Tabela 14 apresenta os resultados, cujos valores foram semelhantes aos encontrados por Castro (2015) e Filho e Martins (2015), apresentando algumas variações possivelmente devido a cinza empregada nesta pesquisa ter sido passada na peneira n°. 200.

A partir da análise do ensaio de fluorescência de raio X (FRX), foi possível confirmar a atividade pozzolânica da cinza, uma vez que a soma dos elementos SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, maior que 70% caracterizam o material como pozzolânico (Castro, 2015; ABNT, 2014).

Tabela 14: Composição química da CBCA

Elemento	Fórmula Composta	Concentração (%)
Si + Al + Fe	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	90,029
Si	SiO_2	35,785
Al	Al_2O_3	28,406
Fe	Fe_2O_3	25,838
Ti	TiO_2	4,024
K	K_2O	2,646
Ca	CaO	1,641
P	P_2O_5	1,065
MnO	MnO	0,428
ZrO ₂	ZrO_2	0,052
ZnO	ZnO	0,049
CuO	CuO	0,049
Sr	Sr	0,010
Y	Y	0,006

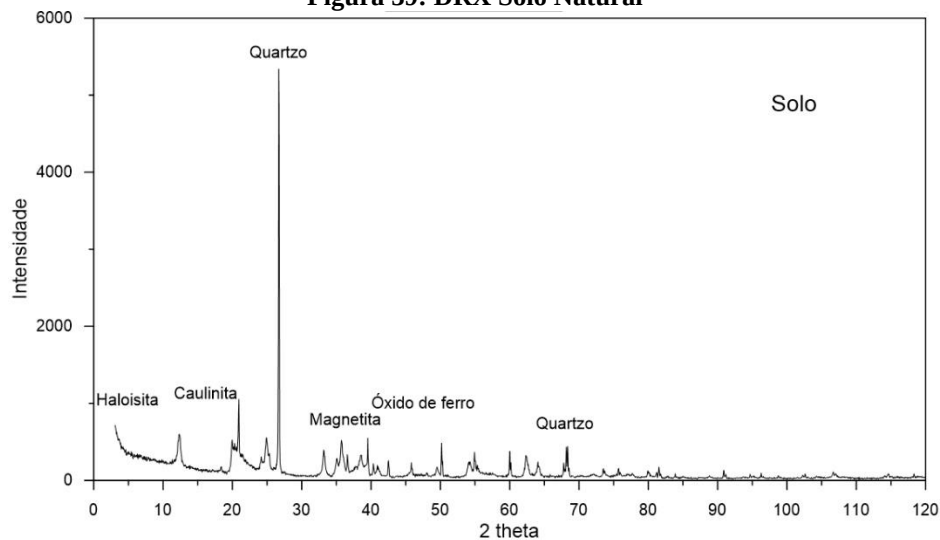
Fonte: Autora (2024)

3.3.3. Difratometria de Raio -X (DRX)

Os ensaios de difração de raio X (DRX) foram realizados para as amostras de solo e CBCA passante na peneira n° 200. Os ensaios foram realizados pelo Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A partir da análise dos picos constantes no difratograma, foi verificado se a amostra é considerada amorfa ou cristalina por meio de um banco de dados específico, sendo possível a identificação dos principais minerais que compõem a amostra de solo e CBCA.

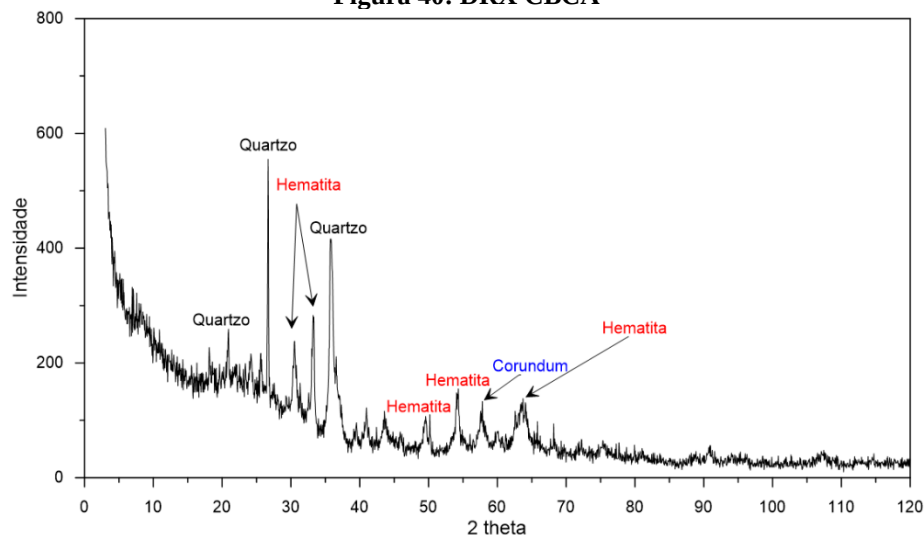
A Figura 39 apresenta os resultados da análise de difratometria de raios-x do solo natural, apontando para a presença de haloisita, caulinita, magnetita, óxido de ferro e quartzo. Os resultados apresentados são coerentes, uma vez que solos lateríticos apresentam óxidos de ferro na sua constituição e argilominerais de baixa atividade.

Gonçalves *et al.* (2018), durante análise do solo do mesmo município, constatou a presença de Quartzo (SiO_2), Hematita (Fe_2O_3) e Caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$). Rios (2022), por sua vez, observou a presença de minerais como a halosita, quartzo, caulinita, jarosita, feroxyhyte e alumina, compostos principalmente por oxigênio, silício, ferro, alumínio e hidrogênio, além de potássio, ferro, entre outros.

Figura 39: DRX Solo Natural**Fonte: Autora (2024)**

Já análise DRX da CBCA apontou uma pequena presença de fase amorfa, sendo o material majoritariamente composto pela fase cristalina, onde foram observadas as fases Fe_2O_3 (Hematita), SiO_2 (Quartzo) e Al_2O_3 (Corundum), conforme Figura 40.

A presença de Fe_2O_3 , SiO_2 , e Al_2O_3 , condiz com o encontrado em literatura (Cruz *et al.*, 2021; Malacarne, 2021), bem como reforça os resultados do ensaio de FRX. Analisando os difratogramas, é possível verificar que a cinza apresenta picos elevados, situados no ângulo de $2\theta \sim 26^\circ$, característicos do mineral quartzo (sílica cristalina), presente na composição das CBCA (Cruz *et al.*, 2021).

Figura 40: DRX CBCA**Fonte: Autora (2024)**

3.3.4. Atividade pozolânica

A avaliação da atividade pozolânica foi realizada para a amostra de CBCA, passante na peneira n° 200. O ensaio foi realizado pelo Laboratório de inovação em cimentos ecoeficientes, em Porto Alegre - RS, pelo método de Chapelle modificado por Raverdy *et al.* (1980), seguindo a NBR 15895 (ABNT, 2010).

O ensaio consiste em adicionar 2g de CaO, 1g do material supostamente pozolânico e 250 ml de água livre de CO₂ em um recipiente. Em seguida, o recipiente é agitado em banho-maria por cerca de 16 horas. A quantidade de CaO que reage com 1g do material é considerada como o valor de atividade pozolânica. É estabelecido que o consumo mínimo de Ca (OH)₂ necessários para que o material apresente uma atividade pozolânica considerável é de 436mg/g (Altoé, 2012).

O ensaio resultou em um valor de $498,96 \pm 18,48$ mg Ca(OH)₂/g amostra (constante no Anexo C), indicando que o material apresenta atividade pozolânica na sua forma natural, independente de requeima e moagem. Porém, esse é um valor relativamente baixo, uma vez que materiais como a sílica ativa, sílica de casca de arroz e metacaulim apresentam valores de 1542, 1336 e 1193 mg Ca(OH)₂/g amostra respectivamente (Filho *et al.*, 2017).

3.3.5. Comportamento Laterítico

Para definir se o solo apresentava comportamento laterítico foram realizados ensaios de absorção de azul de metileno e mini-mcv, abordados a seguir:

3.3.5.1. Adsorção de azul de metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno foi realizado para a amostra de solo no Laboratório de Saneamento Ambiental da UEM. O ensaio foi produzido com o objetivo de identificar o possível argilomineral presente no solo, através da capacidade de troca catiônica (CTC) e estimar se o solo possui comportamento laterítico ou não.

Para realização de tal ensaio foi necessária a preparação de aproximadamente 2 gramas de material passante na peneira n°. 400, que posteriormente foi seco em estufa a fim de se obter a massa seca do solo utilizado. Uma vez seco e homogeneizado, o solo foi colocado em um becker juntamente com 10 ml de água destilada, posicionado sobre um agitador magnético, e agitado por aproximadamente 3 minutos (Figura 41).

Figura 41: Amostra de solo em processo de agitação.

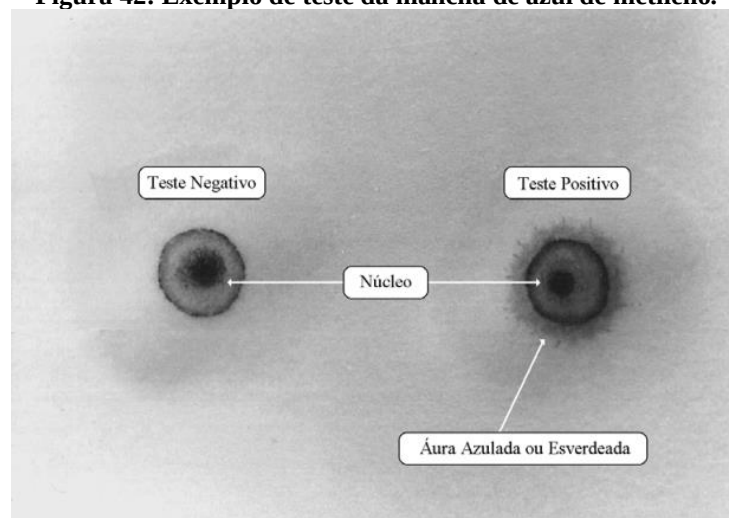


Fonte: Autora (2023)

Após agitação prosseguiu-se com adição de 1 ml da solução de azul de metileno (concentração de 1,5 g/l), que ficou sob agitação constante por 30 segundos. Em seguida foi retirada uma gota da suspensão através do uso de um bastão de vidro e colocado sobre papel filtro.

É necessário então verificar se o teste é positivo ou negativo (Figura 42), caso o teste seja negativo, adicionar mais 1 ml de azul de metileno, aguardar 30 segundos e repetir o teste do papel de filtro, continuando este procedimento até que o teste seja positivo. Caso o teste seja positivo, aguardar mais 3 minutos com a amostra sob agitação e realizar novamente o teste, se for positivo o ensaio está encerrado, se for negativo, adiciona-se mais 1 ml de azul de metileno e repete-se o ensaio até que o novo teste seja positivo.

Figura 42: Exemplo de teste da mancha de azul de metileno.



Fonte: Fabbri (1994)

Uma vez definido o volume da solução de azul de metileno (ml) necessário para que o teste e sua validação sejam positivos, calcula-se a capacidade de troca de cátions, e volume de azul de metileno, por meio das seguintes equações:

$$CTC = \frac{V \times C \times 100}{M} \quad (1)$$

$$Vb = \frac{1,5 \times V \times 100}{M \times 1000} \quad (2)$$

Onde:

V: Volume da solução de azul (ml)

C: Concentração da solução de azul (N)

M: Massa de solos seca (g)

CTC: Capacidade de troca de cátions (meq/100g ou cmol+/kg)

Vb: Valor de azul de metileno (g/100g de agregado)

Os resultados são apresentados na Tabela 15, onde observa-se que o valor baixo da CTC fornece o indicativo da presença de argilomineral caulinita. O valor do Vb, superior a 1,5, apresenta indicativo de comportamento não laterítico. Entretanto, pesquisas anteriores indicaram que esse ensaio não forneceu resultado compatível com a metodologia MCT, específica para a classificação de comportamento laterítico dos solos tropicais.

Tabela 15: Resultados ensaio de adsorção de azul de metileno

Material ensaiado	Amostra 1	Amostra 2
	Solo Natural	Solo Natural
Peso do material seco (g)	0,8069	0,8702
% de Argila	100%	100%
Concentração da solução de azul de metileno (g/l)	1,5	1,5
Volume de solução gasto (ml)	19	21
CTC	11	11
Vb	3,5	3,6
Argilomineral provável	Caulinita	Caulinita

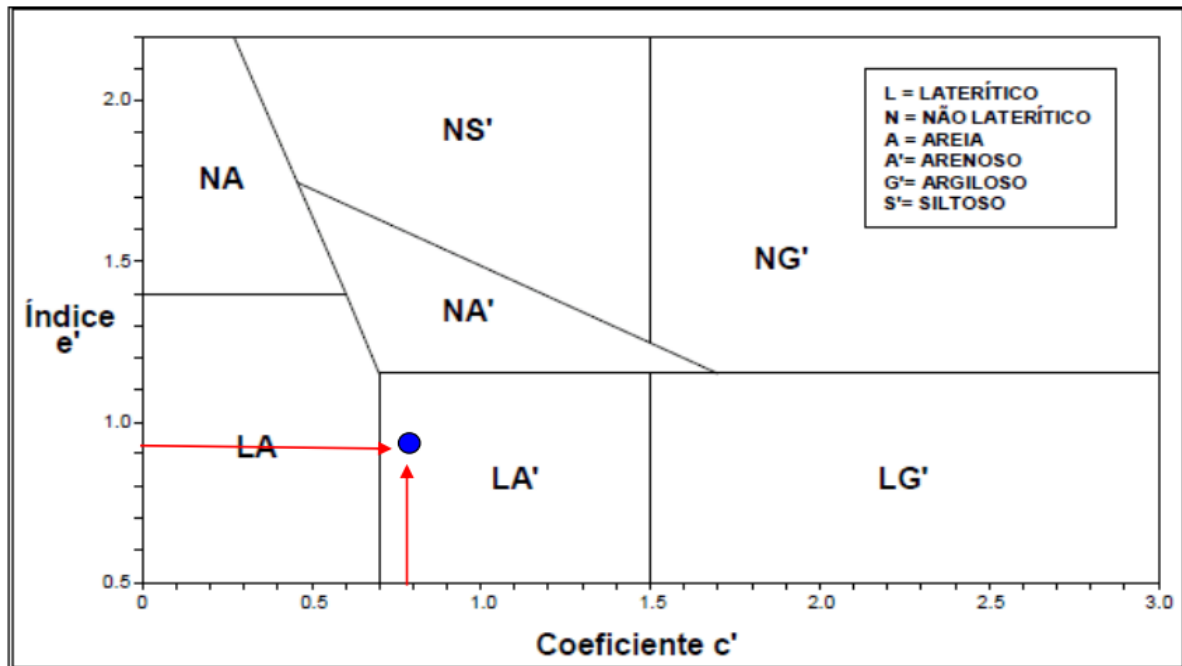
Fonte: Autora (2023)

3.3.5.2. Ensaio Mini-MCV

O ensaio Mini-MCV foi realizado pelo Laboratório de Geotecnia do ITA no município de São José dos Campos-SP, onde foram obtidos os parâmetros: coeficiente angular da reta $d' = 123,71 \text{ kg/m}^3$, coeficiente de classificação $e' = 0,91$, coeficiente de classificação $c' = 0,78$, e

perda por imersão $P_i = 58\%$, que classificou o solo como arenoso laterítico (Figura 43), confirmando o comportamento laterítico do solo da região.

Figura 43: Classificação Mini-MCV



Fonte: Autora (2024)

3.4. PH

A medição do pH é utilizada para determinar o grau de acidez ou alcalinidade de materiais de solo suspensos em água e em solução de cloreto de cálcio, podendo ser empregada para determinar a solubilidade dos minerais do solo, a mobilidade de íons no solo e avaliar a viabilidade do ambiente solo-planta (ASTM, 2019).

Para realização deste ensaio seguiu-se os procedimentos especificados pela EMBRAPA no manual de métodos de análise de solos (EMBRAPA, 2018), sendo eles:

Primeiramente o solo deve ser seco a temperatura ambiente e posteriormente peneirado em uma peneira de 2,00 mm (nº 10). Para a composição das amostras são utilizadas uma massa de 10 g de solo.

A mistura de 10 g de solo foi colocada em um recipiente e adicionado 25 ml de água destilada para criar uma mistura de relação 1 para 2,5. Já para a segunda mistura são colocadas 10 g de solo um recipiente e adicionados 25 ml de cloreto de cálcio mantendo uma relação 1 para 2,5.

Ambos os compostos são misturados e deixados em repouso por 1 hora, após o repouso a amostra foi ligeiramente agitada com um bastão e o eletrodo mergulhado na suspensão.

Tal procedimento foi realizado para amostras de solo natural e solo com os teores de 2%, 4%, 6% e 8% de óleo diesel, bem como para as amostras contaminadas com 2% e 8% OD e tratadas com 10%, 20% e 30% CBCA.

Durante a presente pesquisa não foi possível realizar a análise do pH do óleo diesel, logo tomou-se como base o valor de 7 encontrado na literatura (Gallina *et al.*, 2011).

3.5. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A fim de analisar as bandas de absorção do óleo diesel e as possíveis modificações causadas pela CBCA, foi realizado o ensaio em um espectrômetro FTIR Bruker Vertex 70V, na Universidade Estadual de Maringá-PR.

Discos opticamente transparentes foram preparados triturando e misturando cuidadosamente aproximadamente 0,002 g de amostras (solo, solo + óleo diesel, solo + óleo diesel + CBCA) com aproximadamente 0,198 g de brometo de potássio (KBr). Cerca de 0,20 g da mistura moída foram então comprimidos em uma mini prensa para formar os discos transparentes (Figura 44).

Figura 44: Pastilha de Kbr + SN 8% OD



Fonte: Autora (2023)

Os espectros de infravermelho foram obtidos entre números de onda de 4.000 e 400 cm^{-1} com resolução espectral de 2 cm^{-1} e tamanho de abertura de 100 mm. Para garantir uma relação sinal-ruído aceitável, 128 varreduras foram coletadas para cada amostra. O ar foi usado como fundo e os espectros foram coletados no modo de transmissão.

3.6. MICROESTRUTURA

A análise da microestrutura da CBCA foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da UEM. Os equipamentos utilizados foram o Shimadzu Superscan SS-550, FEI Quanta 250 para o MEV e o metalizador Bal-Tec SCD 050.

As amostras (SN, CBCA e SN + CBCA), utilizadas no MEV foram retiradas de fragmentos dos corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão não confinada, salientando ainda que não foi possível a análise das amostras com óleo diesel uma vez que ela poderia contaminar o equipamento da universidade.

3.7. CROMATOGRAFIA GASOSA

A técnica de cromatografia gasosa consiste na separação de misturas por interação diferencial dos seus componentes entre uma fase estacionária (líquido ou sólido) e uma fase móvel (líquido ou gás). A cromatografia gasosa é uma técnica aplicada para misturas cujos constituintes sejam voláteis ou semivoláteis, que possuam ponto de ebulição de até 300 ° C e que sejam termicamente estáveis. Tal método é largamente empregado tanto para separação quanto para a identificação e quantificação das espécies separadas (Nascimento *et al.*, 2018).

Através deste método a amostra é vaporizada e introduzida em um fluxo de gás denominado gás de arraste que passa por um tubo contendo a fase estacionária (coluna cromatográfica), onde ocorre a separação da mistura (Amorim, 2019). As substâncias separadas saem da coluna dissolvidas no gás de arraste e passam por um detector, que emite um sinal elétrico proporcional à quantidade de material eluído. O registro deste sinal em função do tempo é o cromatograma, sendo que as substâncias aparecem nele como picos com área proporcional à sua massa, possibilitando a análise quantitativa (Skoog; Holler; Nienam, 2007).

Segundo o ITRC (2018) uma das metodologias de avaliação da concentração de TPH mais indicadas para realização de avaliação de risco à saúde humana é a determinação do TPH fracionado por cromatografia a gás uma vez que é possível obter amostras representativas, que por sua vez podem ser analisadas para caracterizar a natureza de uma mistura de hidrocarbonetos. Sendo que para a obtenção do TPH, é necessária a análise de todos os hidrocarbonetos presentes no intervalo das cadeias de carbono C10 (n-decano) e C40 (n-tetracontano) (Guedes, 2020).

Na Tabela 16 são apresentados valores de TPH encontrados em diversos postos de combustíveis de Natal/RN, sendo que apenas os Postos I, III e VII, ultrapassam o valor de 1000 mg/Kg e por isso devem sofrer intervenção e passar por processo de remediação do solo.

Tabela 16: Resultado de TPH em solos contaminados por combustíveis em alguns postos

Postos	TPH (mg/Kg)
Posto I	1815,0
Posto II	111,0
Posto III	1017,0
Posto IV	143,3
Posto V	190,3
Posto VI	423,8
Posto VII	1150,8
Posto VIII	119,8
Posto IX	288,6
Posto X	142,2

Fonte: Bezerril et al. (2011)

Shiraishi (2020), por sua vez, aponta para níveis de TPH encontrados em postos contaminados em Londrina-PR, sendo a maior concentração de 17.600 mg/kg de solo. Os compostos químicos benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos e naftaleno foram detectados em diferentes pontos da cidade, sendo que o benzeno foi identificado em água subterrânea ao nível de 1.774,2 µg/L.

A Resolução SEDEST Nº 3 DE 17/01/2020 também especifica o valor orientador de TPH 1000 mg/kg para solo; e para água = 600 µg/L, bem como BTXE (benzeno, tolueno, xilenos e etilbenzeno) e HPA's (hidrocarbonetos poliaromáticos) conforme especifica a Tabela 17 .

O ensaio de cromatografia Gasosa foi realizado pelo laboratório Pro-Ambiente utilizando a metodologia EPA 3550C, a preparação das amostras de solo e sedimento é realizada por extração ultrassônica. Já análise de TPH é realizada por cromatografia em fase gasosa com detector de ionização por chama (GC-FID) conforme a EPA 8015B.

Destaca-se que o uso desta técnica na engenharia geotécnica ainda é bem pouco explorado. Portanto, pretende-se contribuir com o estado na arte de encapsulamento de hidrocarbonetos através do uso da cromatografia gasosa.

Tabela 17: Valores de investigação (VI) para o solo e água subterrânea

Substância	Valores de investigação para solo			Valores de investigação para água
	Agrícola	Residencial	Industrial	
Benzeno	0,06(3)	0,08(3)	0,15(3)	5(3)
Tolueno	30(3)	30(3)	75(3)	700(3)
Etilbenzeno	35(3)	40(3)	95(3)	300(3)
Xilenos	25(3)	30(3)	70(3)	500(3)
Antraceno				5(2)
Benzo (a) pireno	0,4(3)	1,5(3)	3,5(3)	0,7(3)
Benzo (g,h,i) perilene				0,05(2)
Benzo (a) antraceno	9(3)	20(3)	65(3)	1,75(3)
Benzo (k) fluoranteno	0,38(1)	1(1)	10(1)	0,05(2)
Criseno				0,05(2)
Dibenzo (a,h) antraceno	0,15(3)	0,6(3)	1,3(3)	0,18(3)
Fluoranteno				1(2)
Fenantreno	15(3)	40(3)	95(3)	140(3)
Indenol (1,2,3-cd) pireno	2(3)	25(3)	130(3)	0,17(3)
Naftaleno	30(3)	60(3)	90(3)	140(3)
Pireno	0,1(1)	10(1)	100(1)	

TPH: para Solo = 1000 mg/kg; para água = 600 µg/L - CETESB (2006).

(1) Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health - Summary Tables, Update 2002.

(2) Lista Holandesa de valores de qualidade do solo e de água subterrânea - valores de intervenção.

(3) Resolução CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009.

Fonte: Paraná (2020)

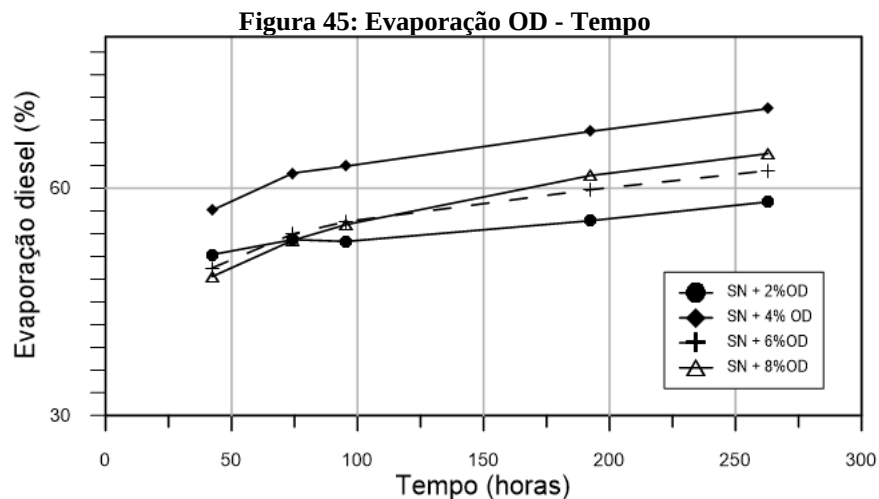
4. RESULTADOS

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados da influência do teor de óleo diesel nas propriedades geotécnicas do solo laterítico estudado e posteriormente tratado com CBCA.

4.1. EVAPORAÇÃO DO ÓLEO DIESEL

A fim de entender o comportamento da evaporação do óleo diesel, optou-se pela realização de ensaio da evaporação do óleo diesel através do método da estufa. Tal ensaio consiste em colocar uma amostra composta por mistura de solo natural seco com óleo diesel, para secar em estufa, sendo assim observado a variação da massa de óleo com o passar do tempo.

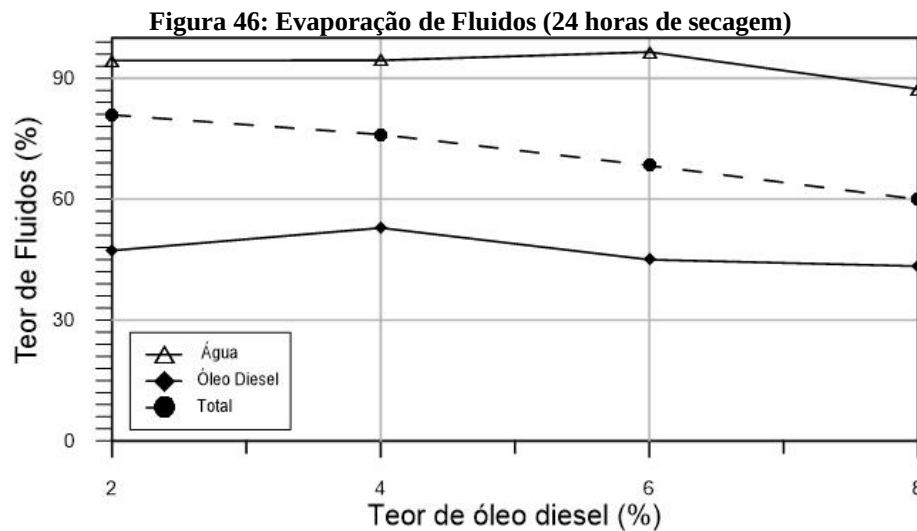
Durante a análise constou-se que com o passar dos dias, não houve estabilização do valor da massa, apontando para a constante evaporação do óleo (Figura 45). Constatou-se ainda que a amostra com maior evaporação foi a de 4% OD, seguida por 8% OD, 6% OD e 2% OD. Isso apontou de forma geral uma evaporação crescente, ou seja, quanto maior o teor de diesel, maior a sua evaporação, com exceção do teor de 4% OD, possivelmente esse teor apresentava uma melhor distribuição do diesel sobre o solo, facilitando assim a sua evaporação nos primeiros dias. Recomenda-se ensaios complementares a fim de visualizar a distribuição de óleo sobre as partículas de solo, bem como a análise da evaporação por um período maior. Tendo em vista o longo prazo que demoraria para a total evaporação do OD, optou-se por padronizar as leituras em aproximadamente 24h após a sua colocação na estufa.



Fonte: Autora (2024)

Posteriormente em uma segunda amostra preparada nas mesmas condições foi acrescentada água, em uma quantidade constante, e desta forma foi possível constatar o teor de água evaporado. Foi constatado que, para um período de 24h de secagem em estufa, em amostras com 2% de óleo diesel ocorreu uma evaporação de 81% dos fluidos, decrescendo até alcançar uma evaporação de apenas 60% dos fluídos nas amostras com 8% de óleo diesel. Sendo que destes apenas 43% do óleo diesel e 87% da água evaporaram (Figura 46).

Ou seja, quanto maior a quantidade de óleo acrescentada, menor foi a evaporação dos fluidos em geral (água e óleo diesel) observada para as primeiras 24h. Também se constatou que o óleo diesel reteve parte da água no solo em até 13% para maiores teores de óleo.



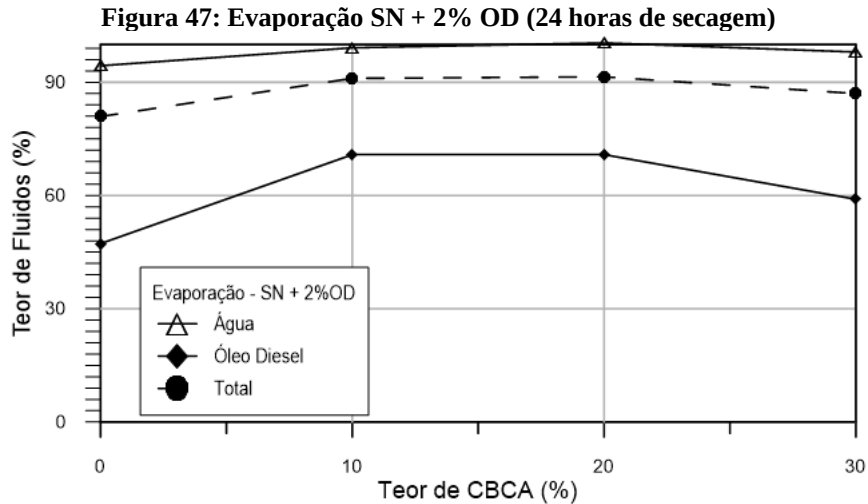
Fonte: Autora (2024)

Khamehchiyan, Charkhabi e Tajik (2006) obtiveram uma evaporação de óleo de aproximadamente 50% para uma areia silto-argilosa contaminada com petróleo bruto, similar aos resultados encontrados na presente pesquisa.

Desta forma, levando em consideração que durante as leituras dos teores de umidade na realização de ensaios, foi observado que havia uma variação constante no teor de umidade com o passar dos dias, sendo constatado que durante o processo de secagem o óleo diesel também evaporava junto à água, optou-se por trabalhar com teor de fluídos em substituição ao teor de umidade, uma vez que ambos estão evaporando, conforme adotado por Safedian, Rajabi e Ghasemzadeh (2018) e Portelinha *et al.* (2021).

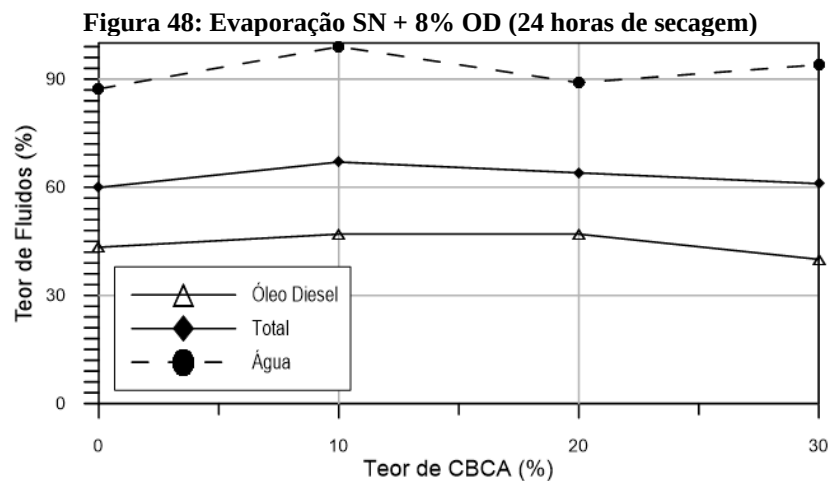
Também foram realizadas as mesmas análises para misturas de solo, CBCA, óleo diesel e água, onde foi possível observar que para amostras com 2% de óleo diesel, a CBCA levou a um aumento da evaporação dos fluidos em geral, apresentando aproximadamente 100%

de evaporação da água ao adicionar cinza, e uma evaporação de 71% de óleo para amostras com 10% e 20% de CBCA e chegando a uma evaporação de 59% para 30% de CBCA (Figura 47), esse resultado aponta para uma maior evaporação de óleo para os menores teores de CBCA e retenção do diesel no solo ao se utilizar maiores teores de CBCA.



Fonte: Autora (2024)

Como já esperado, observou-se que as amostras compostas por 8% de óleo diesel e tratadas com CBCA apresentaram menores evaporações em relação as amostras com 2% de óleo, com evaporações de aproximadamente 94% da água ao adicionar cinza, e uma evaporação de 47% de óleo para amostras com 10% e 20% de CBCA e chegando a uma evaporação de 40% para 30% de CBCA, esse resultado aponta para uma maior evaporação de óleo para os menores teores de CBCA e retenção do diesel no solo ao se utilizar maiores teores de CBCA (Figura 48).



Fonte: Autora (2024)

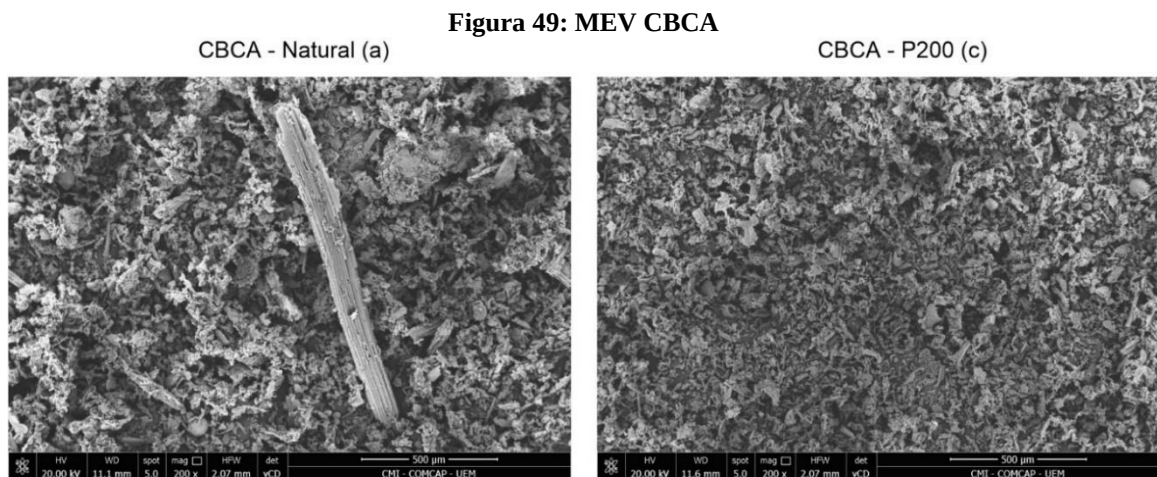
A evaporação do óleo é influenciada pelas suas propriedades físicas e químicas, bem como pela temperatura e umidade do ambiente. Em solos contaminados com óleo, a taxa de evaporação e a quantidade de óleo evaporado dependem do tamanho e da composição das partículas do solo, além das propriedades térmicas do solo e do óleo. Geralmente, a evaporação aumenta quando as partículas do solo são menores e diminui quando a quantidade de óleo é maior. Esse fenômeno parece estar relacionado à condutividade térmica e às propriedades de adesão e coesão das amostras de solo (Khomehchiyan; Charkhabi; Tajik, 2006).

Isso pode ser observado no ensaio de evaporação com CBCA, uma vez que ao ser adicionada nas amostras, observou-se uma maior evaporação do óleo diesel, já que a adição da CBCA nas amostras levou a diminuição das partículas.

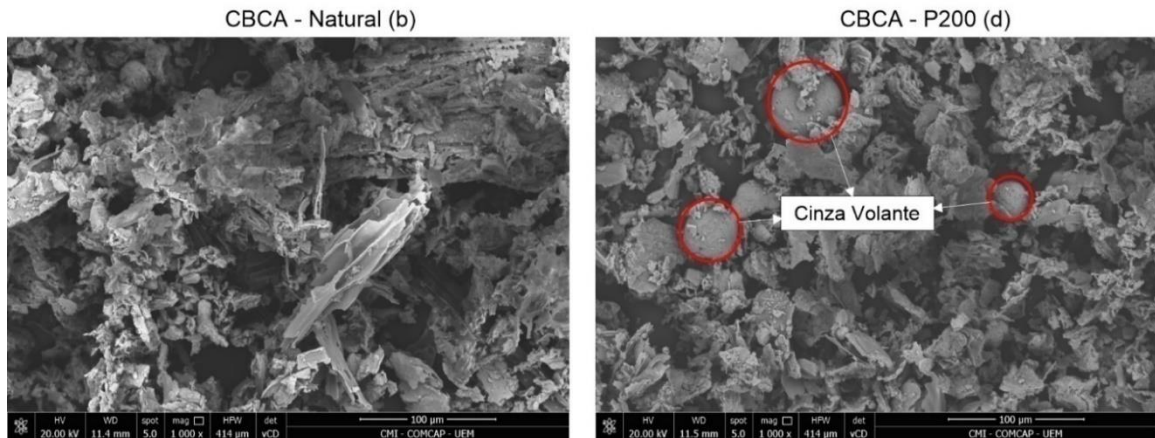
4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Os ensaios de MEV foram realizados no COMCAP, da UEM, por meio dos equipamentos: Marca: FEI , Modelo: Quanta 250; Marca: shimadzu, Modelo: SUPERSCAN SS-550 e para Metalização o Bal-Tec SCD 050.

Durante a análise das imagens de MEV da CBCA, foi possível observar que a amostra passada na peneira 200 apresenta-se mais homogênea (Figura 49c e 49d), como já era esperado. Também foi identificada a formação de pequenos fragmentos circulares na amostra passada na peneira 200 (Figura 49d), que se trata da cinza volante, conforme observado por Canul, Moreno e Rangel (2016).

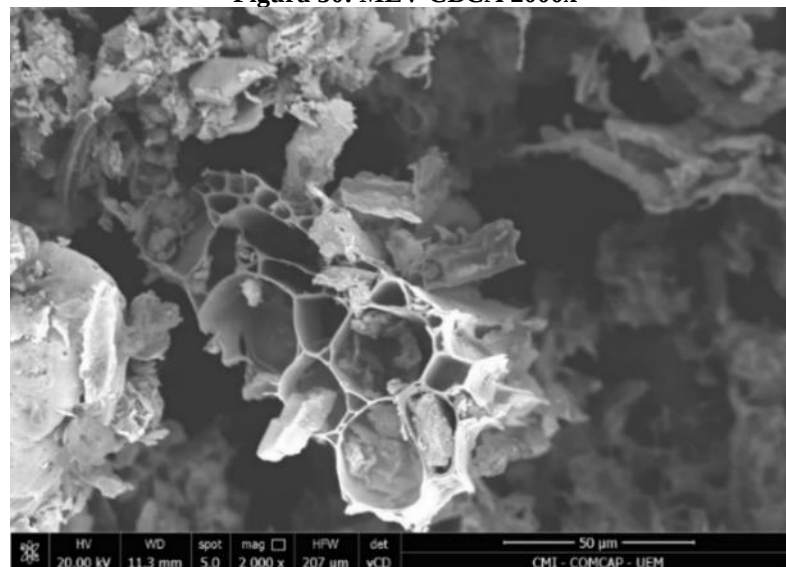


Fonte: Autora (2024)

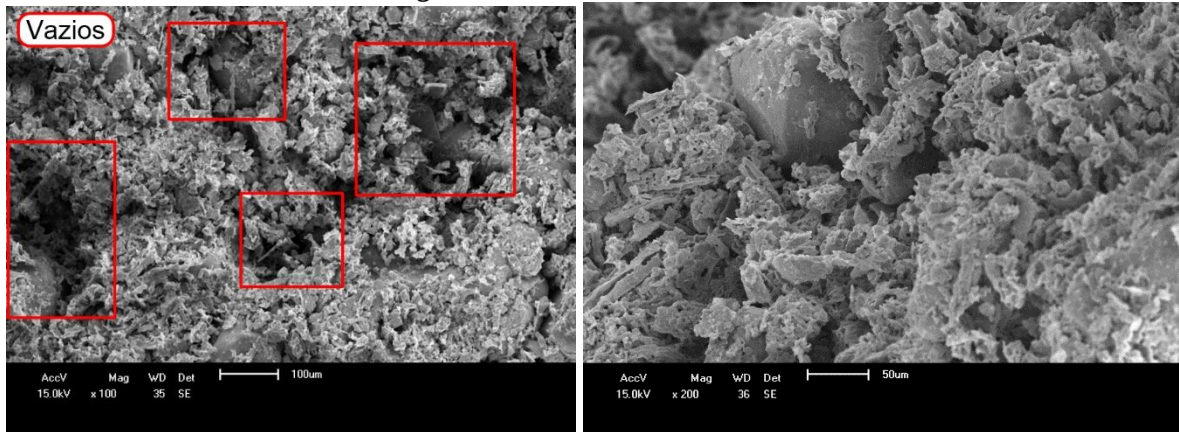
Figura 49: MEV CBCA**Fonte: Autora (2024)**

Cinzas volantes são partículas finas, de tamanho inferior a 150 μm , que são encontradas no fluxo de gases liberados por chaminés. Elas podem ser capturadas por precipitadores eletrostáticos, filtros mecânicos, ou, em alguns casos, liberadas diretamente na atmosfera (Cirino *et al.*, 2021).

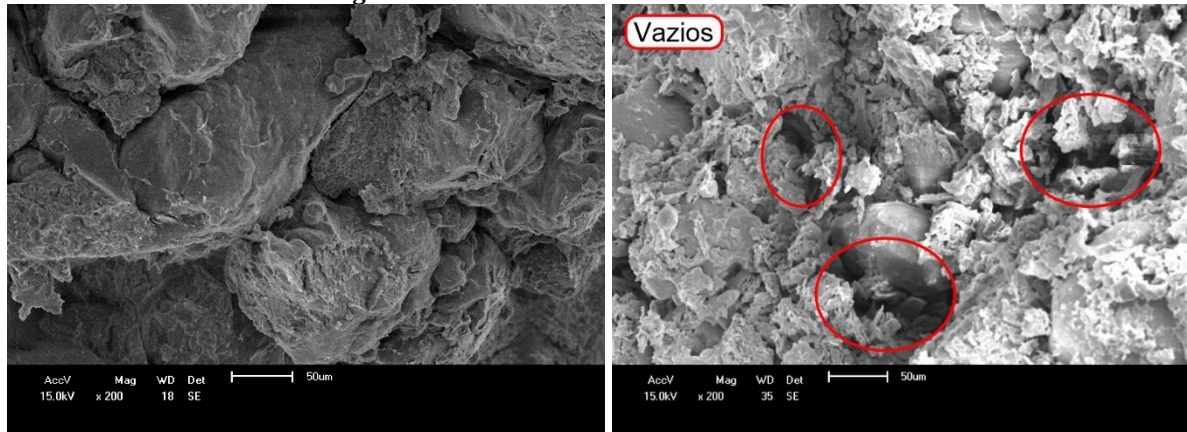
Também foi possível observar a estrutura porosa da CBCA, com elevados vazios em sua amostra (Figura 50).

Figura 50: MEV CBCA 2000x**Fonte: Autora (2024)**

Ensaios realizados em amostra de SN + 20%CBCA, foi possível visualizar os vazios presentes na amostra (Figura 51) apontando para uma possível diminuição da resistência das amostras misturadas com a cinza, bem como a estrutura dispersa da CBCA sobre os grãos de solo, demonstrando que não houve uma ligação entre as partículas, apontando que possivelmente não ocorreram as reações pozolânicas necessárias.

Figura 51: MEV SN + 20% CBCA**Fonte: Autora (2024)**

Já na Figura 52 é possível observar um comparativo entre a amostra de solo natural, onde os grãos de solo estão bem definidos e não apresentam tantos vazios, e uma amostra de SN + 20%CBCA mostrando que os grãos já não se encontram mais tão bem encaixados, aumentando os vazios da amostra (destacados em vermelho nas imagens).

Figura 52: MEV SN e SN + 20% CBCA – 200X**Fonte: Autora (2024)**

4.3. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Durante a execução do ensaio de limite de liquidez pelo aparelho Casagrande, verificou-se que a incorporação de óleo diesel causava uma lubrificação no equipamento devido a alteração de viscosidade, provocando o descolamento da mistura da concha (Figura 53). Desta forma, quanto maior o teor de óleo diesel maior será a dificuldade de execução do ensaio, não sendo possível a realização do ensaio para os teores de 4%, 6% e 8% de óleo diesel.

Figura 53: Ensaio de limite de liquidez para amostra de solo com óleo diesel



Fonte: Autora (2023)

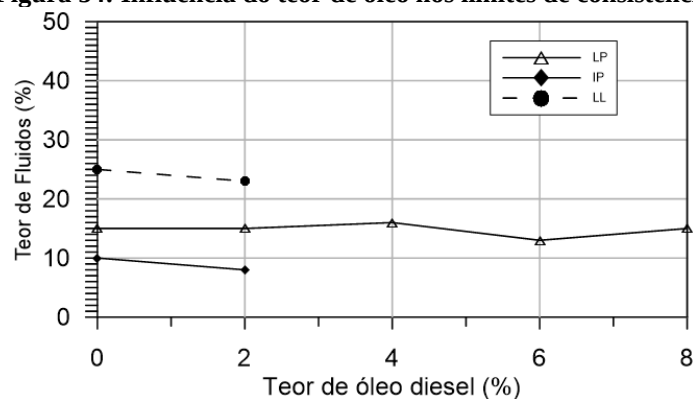
Em relação ao limite de plasticidade, a execução foi satisfatória para todos os teores estudados. A Tabela 18 e a Figura 54 apresentam os resultados obtidos. De maneira geral, existe uma tendência de decréscimo do limite de liquidez com a adição de óleo diesel, enquanto o limite de plasticidade parece não sofrer influência. Apenas a amostra com 6% de óleo indicou uma diminuição do limite de plasticidade.

Tabela 18: Limites de Atterberg solo contaminado

	SN	SN + 2%OD	SN + 4%OD	SN + 6%OD	SN + 8%OD
LL	25	23	-	-	-
LP	15	15	16	13	15
IP	10	8	-	-	-

Fonte: Autora (2023)

Figura 54: Influência do teor de óleo nos limites de consistência



Fonte: Autora (2023)

Khamehchiyan, Charkhabi e Tajik (2006), estudaram os efeitos do petróleo bruto em solos argilosos e arenosos e observaram a diminuição dos limites de Atterberg conforme aumento da contaminação do solo com óleo diesel. Rahman *et al.* (2010) estudaram os efeitos causados pelo óleo de motor em solos residuais basálticos, observando a diminuição dos limites para os solos contaminado.

De forma similar, também foram realizados os ensaios de limite de liquidez pelo aparelho de Casagrande para as amostras com CBCA (Tabela 19), não sendo possível a realização do ensaio para as amostras SN + 20%CBCA, SO₈CBCA₂₀ e SO₈CBCA₃₀ devido a não aderência ao aparelho.

Tabela 19: Limites de Atterberg SN contraminado e tratado com CBCA

Amostra	SO₂ CBCA₁₀	SO₂ CBCA₂₀	SO₂ CBCA₃₀	SO₈ CBCA₁₀	SO₈ CBCA₂₀	SO₈ CBCA₃₀	SN + 20% CBCA
LL	27	24	33	26	-	-	-
LP	20	21	38	20	27	31	16
IP	7	3	5	6	-	-	-

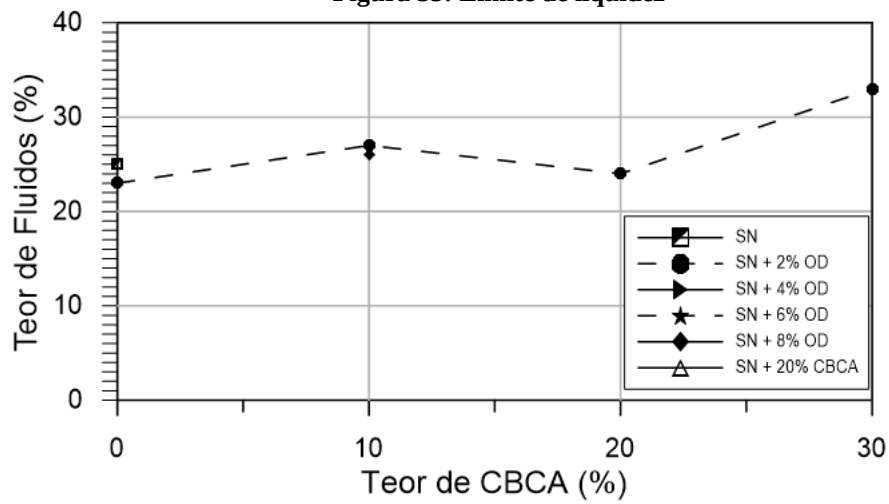
Fonte: Autora (2024)

Com relação as amostras com 2% de óleo diesel, observou-se uma tendência do aumento do limite de plasticidade (Figura 56) e do limite de liquidez (Figura 55) e diminuição índice de plasticidade (Figura 57) a partir do aumento do teor de CBCA. Já para as amostras com 8% de óleo diesel, não foi possível a análise do limite de liquidez, porém o limite de plasticidade (Figura 56) manteve a tendência de aumento com o aumento do teor de CBCA.

Também foi possível a análise da influência da CBCA nos limites de consistência em solo natural (sem a presença de óleo diesel), onde verificou-se a diminuição do limite de plasticidade (Figura 56). Não foi possível a realização do limite de liquidez uma vez que só conseguiu-se obter pontos próximos de 15 golpes, e quando se colocou mais material seco na mistura, não foi possível a realização do ensaio, sendo classificado como não plástico.

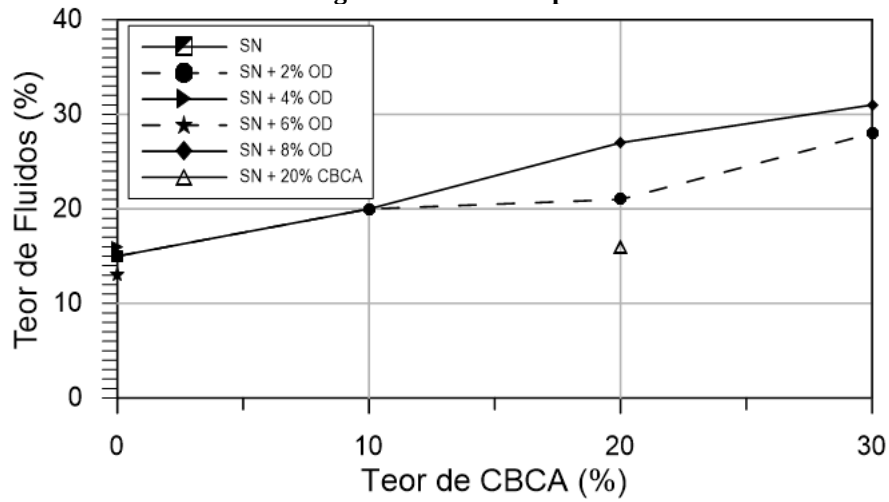
Baracho e Correia (2021) observaram a diminuição do limite de liquidez e limite de plasticidade com o aumento do teor de CBCA, apontando ainda que solos com menores IPs são preferidos para a construção de estradas ou sub-base de pavimentos rodoviários por serem menos plásticos.

Figura 55: Limite de liquidez



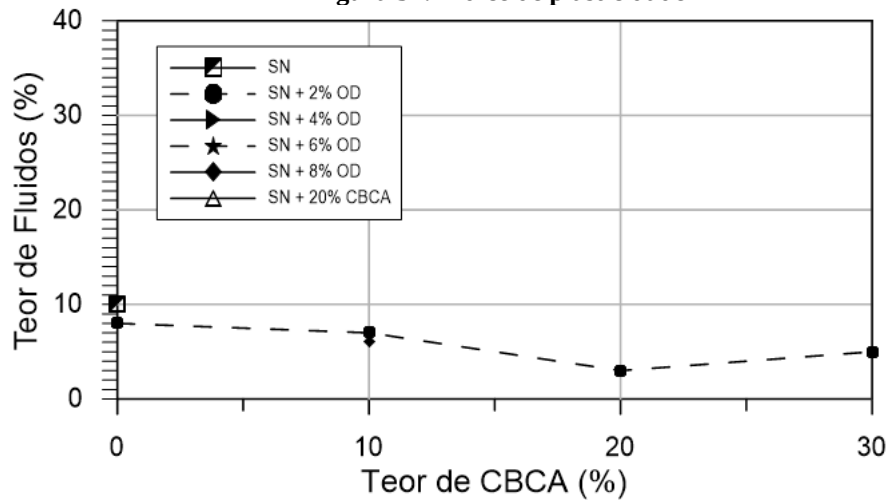
Fonte: Autora (2024)

Figura 56: Limite de plasticidade



Fonte: Autora (2023)

Figura 57: Índice de plasticidade



Fonte: Autora (2023)

Devido à impossibilidade de obter resultados para todas as amostras, assim como às dificuldades encontradas durante a execução dos mesmos, recomenda-se a utilização do método do cone sueco para os ensaios de limite de liquidez, a fim de viabilizar a comparação dos resultados.

4.4. PH

Durante análises, foi observado o aumento do pH quando o solo foi contaminado com óleo diesel (Tabela 20). O delta pH é negativo, indicando predominância de cargas negativas e, nesses casos, o solo retém mais cátions do que ânions (Santos, 2015).

Tabela 20: pH amostras com OD

Teor de óleo	0%	2%	4%	6%	8%
pH em H ₂ O	4,89	5,5	5,48	5,67	6,13
pH em KCl	4,24	4,20	4,25	4,38	4,32
Delta pH	-0,65	-1,30	-1,23	-1,29	-1,81

Fonte: Autora (2024)

Essa tendência de aumento do pH para maiores teores de óleo pode ter sido ocasionada uma vez que o pH do óleo diesel é de aproximadamente 7 (Gallina *et al.*, 2011), logo, maior que o pH do solo natural e, quando misturados, faz com que o pH da mistura seja maior.

Ao adicionar CBCA nas amostras houve um aumento do pH tanto em H₂O quanto em KCl apresentando resultados próximo a 7, ou seja, um pH neutro. Também observou-se que o teor de óleo teve uma influência muito baixa no pH dos solos tratados com a CBCA (Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23). A elevação do pH em decorrência de doses crescentes de cinzas é relatado na bibliografia (Bega, 2014), e de acordo com Bhoi, Mandal e Juneja (2020), isso se deve o pH da CBCA ser em torno de 8.

Após a adição da CBCA, o delta pH continuou sendo negativo, indicando uma maior retenção de cátions do que ânions, porém com uma tendência de diminuição (Santos, 2015). Blankenagel (2005) comenta que as reações pozolânicas só podem ocorrer em níveis de pH acima de 10, porque é neste meio que a sílica se torna solúvel, tal resultado pode apontar para a baixa atividade pozolânica da CBCA, podendo justificar a adição de um agente químico a fim de aumentar o pH e a atividade pozolânica.

Tabela 21: pH com SN + 2%OD

Teor de CBCA	0%	10%	20%	30%
pH em H ₂ O	5,50	6,65	7,12	7,25
pH em KCl	4,20	5,87	6,57	7,04
Delta pH	-1,30	-0,78	-0,55	-0,21

Fonte: Autora (2024)**Tabela 22: pH com SN + 8%OD**

Teor de CBCA	0%	10%	20%	30%
pH em H ₂ O	6,13	6,56	7,17	7,60
pH em KCl	4,32	5,75	6,65	7,15
Delta pH	-1,81	-0,81	-0,52	-0,45

Fonte: Autora (2024)**Tabela 23: pH com SN + 20% CBCA**

Teor de Óleo diesel	0%	2%	8%
pH em H ₂ O	7,43	7,12	7,17
pH em KCl	7,13	6,57	6,65
Delta pH	-0,3	-0,55	-0,52

Fonte: Autora (2024)

4.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Inicialmente, serão apresentados alguns aspectos gerais relacionados à execução do ensaio de compactação. Para as amostras de solo contaminado com 2% de óleo diesel e com menores teores de água houve dificuldade para realizar a homogeneização da mistura solo-óleo diesel-água, onde observou-se a formação de pequenos aglomerados (Figura 58b) que se desfizeram parcialmente, mesmo após a passagem em peneira (Figura 58c), resultando em corpos de prova com camadas não homogêneas (Figura 58d).

Figura 58: Aspecto visual da compactação no ramo seco da mistura SN+2% OD



(a) mistura SN+2%OD



(b) mistura SN+2%OD e água



(c) mistura homogeneizada



(d) corpo de prova compactado

Fonte: Autora (2023)

A formação de pequenos agregados nas amostras de solo contaminado foi previamente observada por Daka (2015) durante a análise da distribuição granulométrica de solo contaminado com óleo. Durante este estudo observou-se que a contaminação por óleo causou redução de agregados finos enquanto formava torrões de solo.

Para as amostras de solo com maiores teores de óleo diesel, a água apresentava dificuldade para se infiltrar na mistura solo-óleo-diesel e, após a compactação, os corpos de prova apresentavam fissuras e vazamento de óleo, conforme Figura 59.

Figura 59: Aspecto visual da compactação para amostras com maiores teores de óleo diesel.



(a) mistura solo-óleo diesel-água

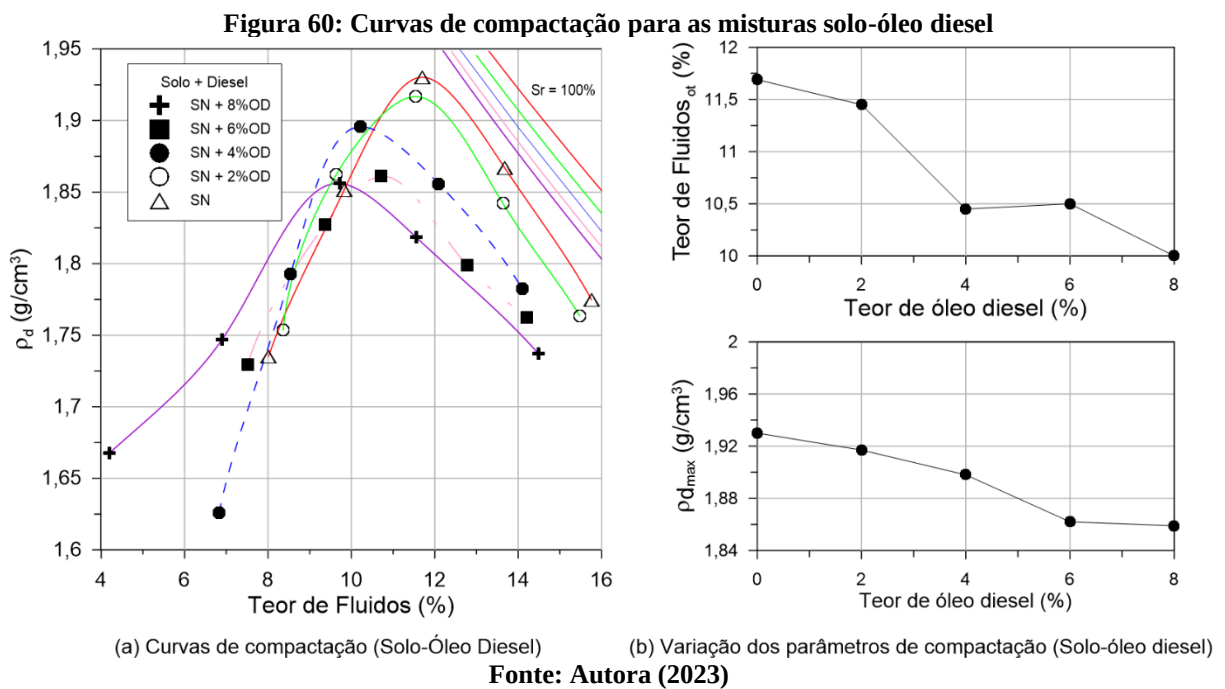


(b) corpo de prova compactado

Fonte: Autora (2023)

As curvas de compactação obtidas são apresentadas na Figura 60a, onde podem ser observadas a tendência de diminuição do peso específico seco máximo e do teor de fluidos ótimo com o aumento do teor de óleo diesel (Figura 60b). A diminuição do peso específico seco máximo também foi observada por Portelinha *et al.* (2021).

O aumento no teor de óleo diesel tende a diminuir o peso específico seco máximo do solo, uma vez que esse efeito se deve ao peso específico do óleo diesel ($8,44 \text{ kN/m}^3$) ser muito inferior ao solo ($26,30 \text{ kN/m}^3$). Portanto, a substituição das partículas do solo por materiais mais leves, como o óleo diesel, diminuiu peso específico seco máximo dos solos contaminados (Ahmad *et al.*, 2020).

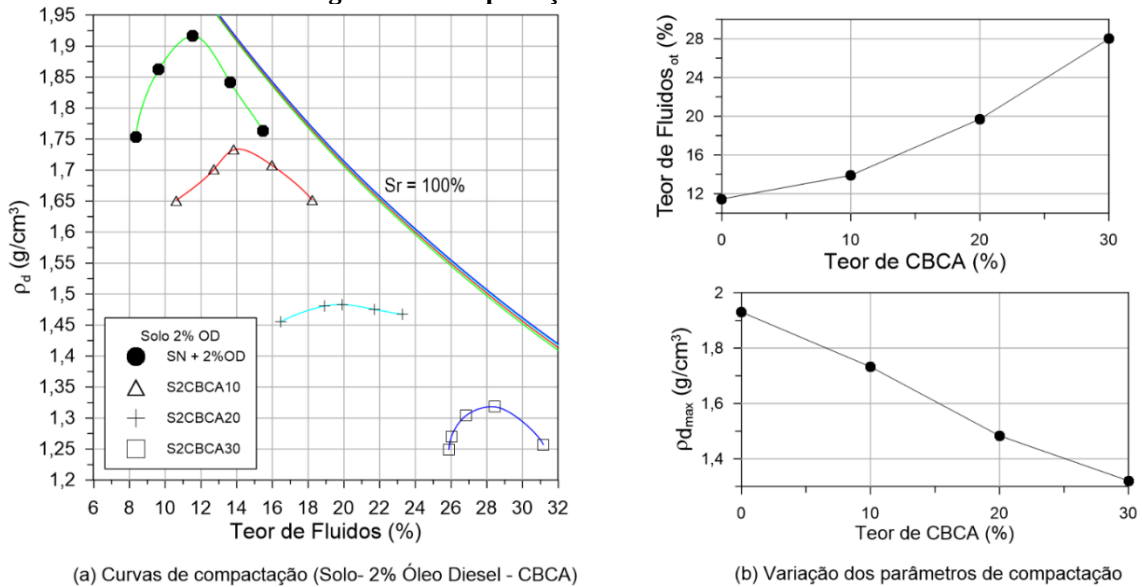


Khamehchiyan, Charkhabi e Tajik (2006), estudaram os efeitos do petróleo bruto em solos argilosos e arenosos, observando que geralmente ocorre a redução da massa específica seca máxima com o aumento do teor do óleo, bem como a redução do teor de umidade ótimo. Os autores ainda constataram que as curvas de compactação passaram a apresentar um formato incomum para teores de óleo superior a 8%, indicativo uma quantidade excessiva de óleo para uma compactação eficaz. Rahman *et al.* (2010) verificaram os efeitos causados pelo óleo de motor em solos residuais basálticos e observaram uma diminuição do peso específico seco máximo e do teor de umidade ótimo. De forma similar a Khamehchiyan, Charkhabi e Tajik

(2006) e Rahman *et al.* (2010), constatou-se na presente pesquisa a diminuição do peso específico seco máximo e do teor de umidade ótima com o aumento do teor de óleo diesel.

Foi realizado o tratamento da amostra contaminada com 2% de óleo diesel, onde observou-se um aumento do teor de fluídos ótimos e diminuição do peso específico seco máximo conforme o aumento do teor de CBCA (Figura 61).

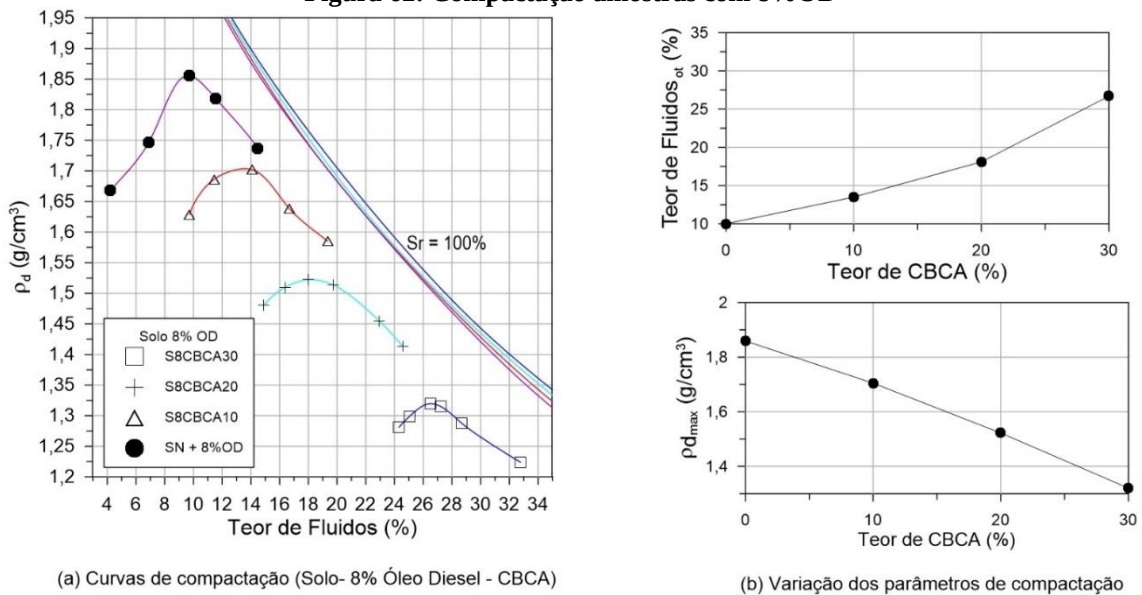
Figura 61: Compactação amostras com 2%OD



Fonte: Autora (2024)

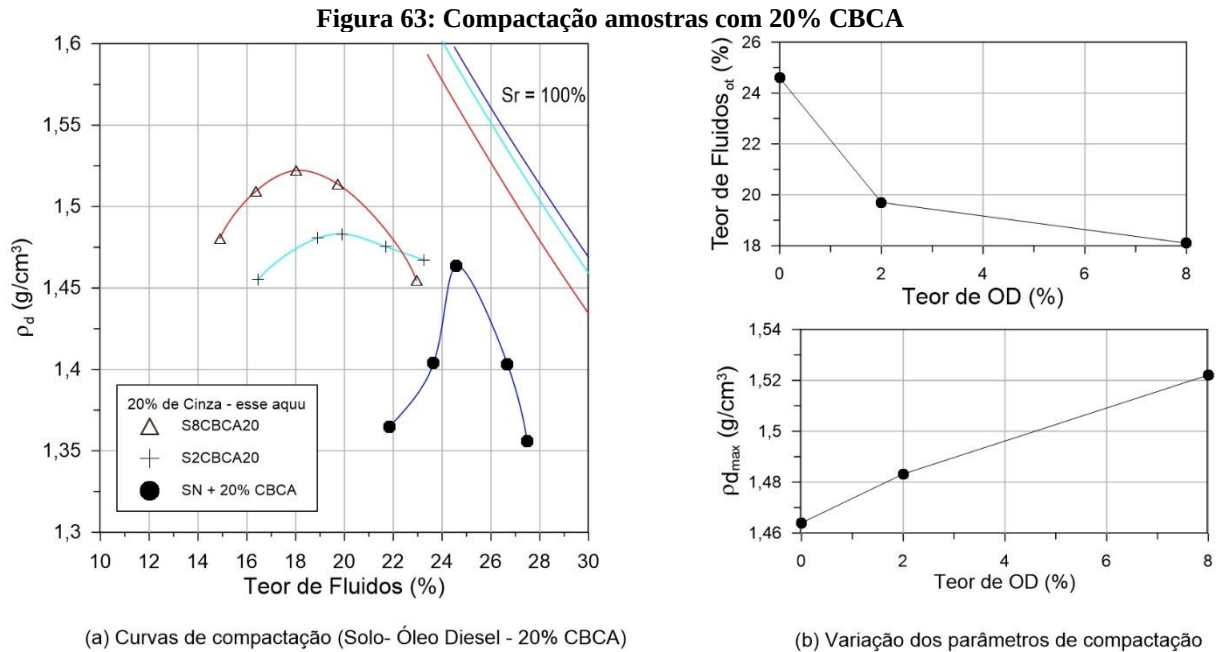
Também foi identificado o mesmo comportamento de aumento do teor de fluídos ótimos e diminuição do peso específico seco máximo conforme o aumento do teor de CBCA para as amostras com 8% de óleo diesel (Figura 62).

Figura 62: Compactação amostras com 8%OD



Fonte: Autora (2024)

Foi elaborada a curva de compactação de uma amostra de solo com 20% de CBCA sem o uso de óleo diesel a fim de melhor compreensão do comportamento das amostras. Observou-se a diminuição do teor de fluídos e aumento do peso específico seco máximo à medida em que o teor do óleo diesel aumentava (Figura 63), demonstrando o comportamento lubrificante do óleo diesel.



Fonte: Autora (2024)

Junior *et al.* (2018) também observaram que houve aumento da umidade ótima e diminuição do peso específico aparente seco máximo ao acrescentar cimento e cinza no solo, justificando o resultado pela presença dos materiais pozolânicos, os quais necessitam de água para a realização das reações de hidratação do material.

Por meio do ensaio de compactação, também foi possível observar que a amostra ainda apresentou grande expulsão de óleo diesel com 10% de cinza, seguida de uma diminuição para 20% de CBCA e não houve vazamento e rachaduras para 30% de CBCA, conforme pode ser observado na Figura 64 para os corpos de prova do último ponto (ramo úmido) de suas respectivas curvas de compactação. A Tabela 24 apresenta os parâmetros de compactação utilizados para moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência a compressão simples.

Figura 64: Compactação 8% OD tratado com CBCA**Fonte: Autora (2024)****Tabela 24: Parâmetros de compactação adotados**

Mistura	Teor de Fluidos ótimo (%)	Teor de Fluidos adotado (%)	γ_d máximo (kN/m ³)	γ_d adotado (kN/m ³)
SN	11,69	10,00	19,30	18,59
SN + 2%OD	11,45	10,00	19,17	18,59
SN + 4%OD	10,45	10,00	18,98	18,59
SN + 6%OD	10,50	10,00	18,62	18,59
SN + 8%OD	10,00	10,00	18,59	18,59
SN + 20CBCA	24,59	24,59	14,64	14,64
SO ₂ CBCA ₁₀	13,90	13,90	17,33	17,33
SO ₂ CBCA ₂₀	19,70	19,70	14,83	14,83
SO ₂ CBCA ₃₀	28,00	28,00	13,21	13,21
SO ₈ CBCA ₁₀	13,50	13,50	17,05	17,05
SO ₈ CBCA ₂₀	18,10	18,10	15,22	15,22
SO ₈ CBCA ₃₀	26,70	26,70	13,20	13,20

Fonte: Autora (2024)

4.6. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

Na primeira etapa desta pesquisa foram realizados ensaios de resistência a compressão simples para amostras de solo natural, e contaminadas com os teores de 2%, 4%, 6% e 8% de óleo diesel. A Tabela 25 apresenta os resultados dos ensaios. Todos os ensaios foram realizados pelo menos em triplicata (apresentando um total de 124 corpos de prova) e são apresentados no anexo E.

Tabela 25: Resistência a compressão simples de solo contaminado com diesel (kPa)

Amostra	7 Dias	28 Dias	56 Dias
SN	325,88	-	-
SN + 2%OD	282,08	272,94	313,43
SN + 4%OD	281,81	238,31	232,20
SN + 6%OD	258,25	191,17	208,76
SN + 8%OD	279,64	225,11	269,54

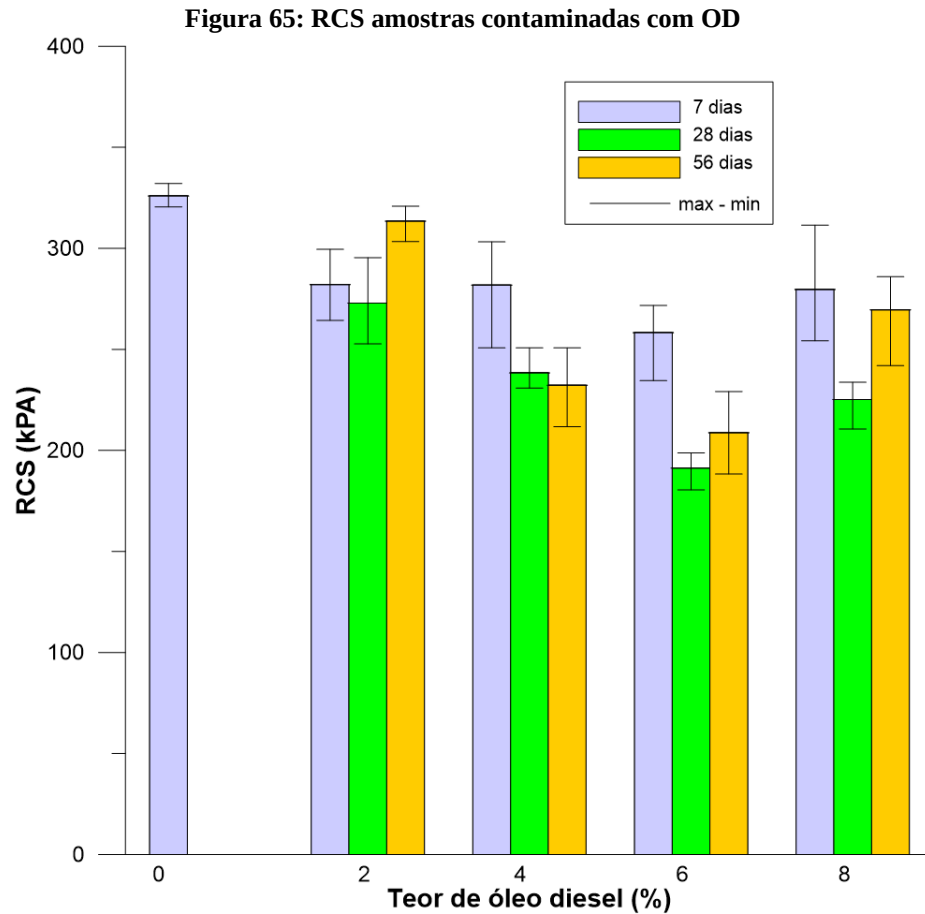
Fonte: Autora (2024)

A respeito da influência do óleo diesel na resistência a compressão simples do solo, constatou-se que nos primeiros 7 dias de cura a resistência se manteve aproximadamente constante para os diversos teores de óleo, apresentando uma redução de 13%, 14%, 21% e 14% em relação ao solo não contaminado.

Já para as amostras com 28 dias de cura, observou-se um decréscimo da resistência para todos os teores de óleo, demonstrando o efeito nocivo do diesel com o passar do tempo. A pior situação ocorreu para o solo contaminado com 6% de óleo diesel, tal fenômeno pode ser atribuído a padronização do teor de fluidos ótimo e peso específico seco máximo, ou seja, o melhor ponto da curva de 8% OD, para moldagem dos corpos de prova, sendo neste caso as moldagens com 8% OD favorecidas. Outra possível explicação é que durante a moldagem dos corpos de prova com 8% de óleo ocorreram grandes expulsões de óleo, de forma que o corpo de prova poderia apresentar um menor teor do que aquele utilizado inicialmente.

Dessa forma, para os 28 dias houve um decréscimo de 16%, 27%, 41% e 31% da resistência a compressão simples das amostras contaminadas com 2%, 4%, 6% e 8% OD. Mendes, Correia e Portelinha (2019) obtiveram uma redução de aproximadamente 19% da resistência para solo contaminado com 8% de óleo diesel e 28 dias de cura.

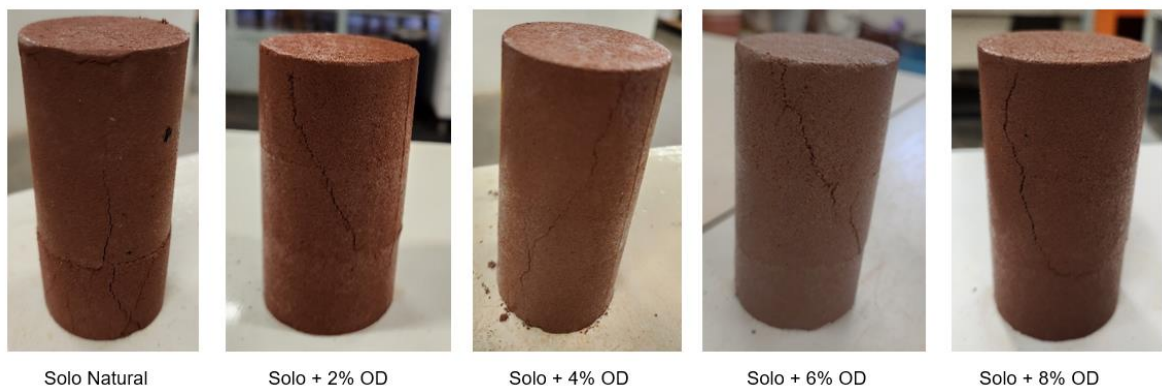
Por fim, para as amostras rompidas com 56 dias, observou-se um significativo aumento da RCS para os teores de 2% e 8% de óleo diesel, tal comportamento pode ser justificado pela evaporação do óleo com o passar do tempo. A Figura 65 apresenta os resultados de resistência para as amostras de solo natural, e solo contaminado com os teores de 2%, 4%, 6% e 8% OD e tempos de cura de 7, 28 e 56 dias.



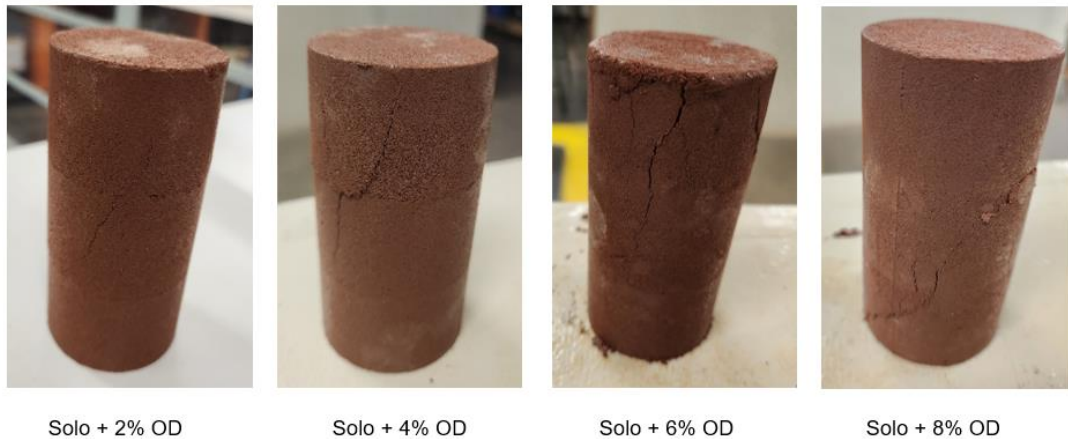
Fonte: Autora (2024)

A respeito dos corpos de prova, observou-se que, de forma geral, para todas as amostras e tempo de cura, os rompimentos ocorreram de forma diagonal. Também se observou o surgimento de algumas manchas brancas para o período de 56 dias de cura (Figura 66, Figura 67 e Figura 68).

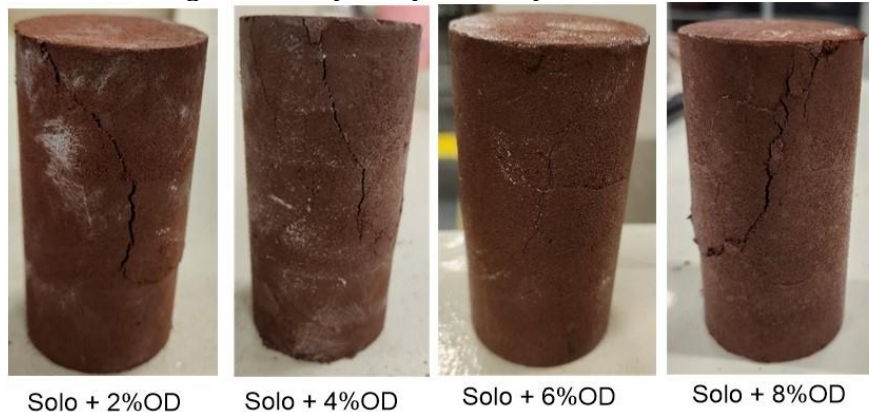
Figura 66: Corpos de prova rompidos com 7 dias



Fonte: Autora (2024)

Figura 67: Corpos de prova rompidos com 28 dias

Fonte: Autora (2024)

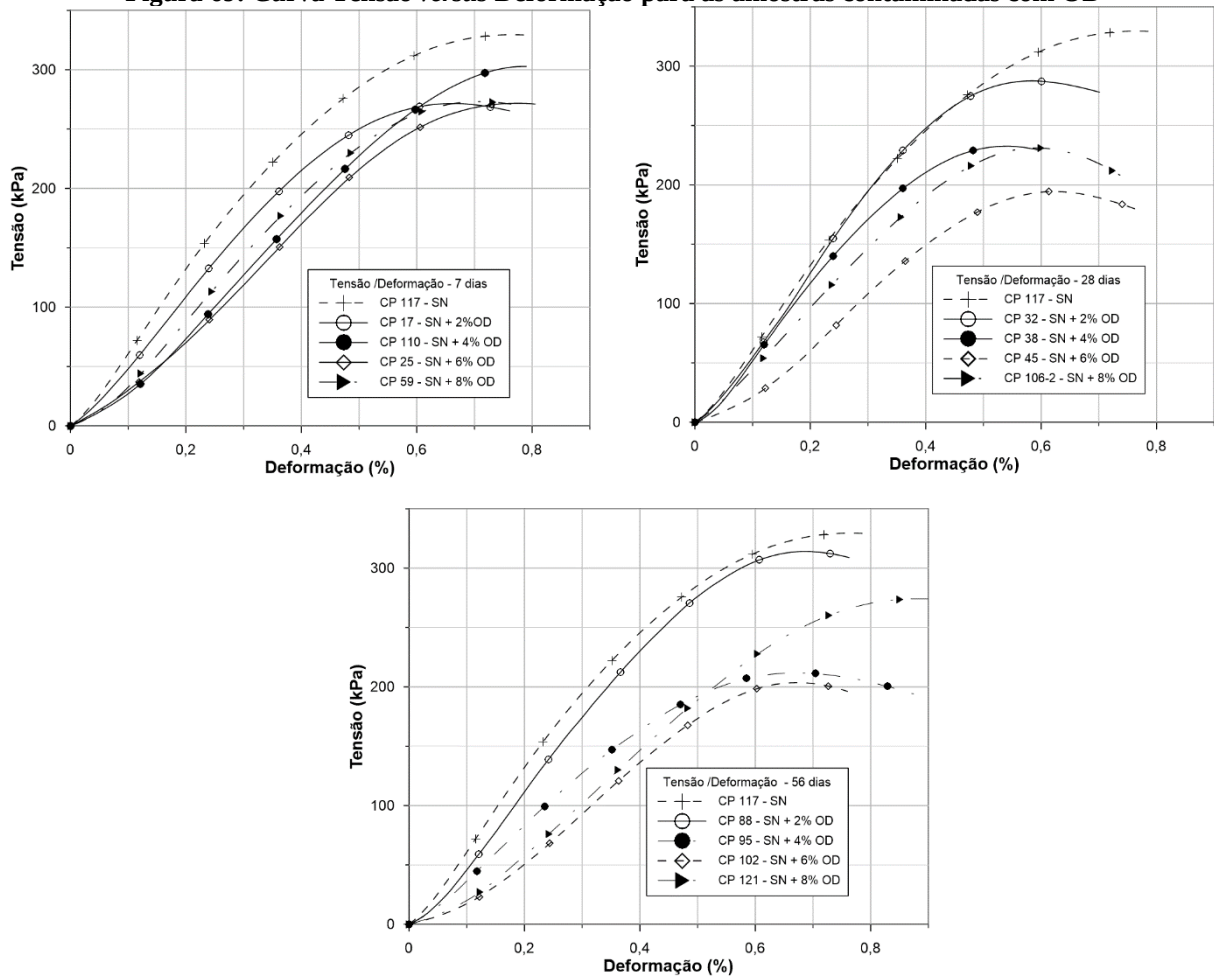
Figura 68: Corpos de prova rompidos com 56 dias

Fonte: Autora (2024)

A partir da análise dos gráficos de tensão *versus* deformação (Figura 69) observou-se a menor resistência dos corpos contaminados com óleo diesel, em relação ao solo natural (SN). A respeito das deformações, verificou-se que o OD não causou variações significativas, apresentando uma deformação no rompimento de aproximadamente 0,7%. Tal resultado demonstra que o OD diminuiu a rigidez das amostras, uma vez que apresentaram a mesma deformação para menores cargas.

Aos 56 dias de tempo de cura visualizou-se que a amostra com 2% OD se assemelha a curva de solo natural tanto na tensão como na deformação, tal resultado aponta para uma possível evaporação do OD.

Figura 69: Curva Tensão versus Deformação para as amostras contaminadas com OD



Fonte: Autora (2024)

Para moldagem dos CPs de solo natural e contaminados para todos os teores de óleo padronizou-se o teor de fluidos ótimo e peso específico seco máximo, tomando como base a curva da mistura SN + 8% OD. Para controle padronizou-se o grau de compactação de 100% aceitando variações de mais ou menos 2%, também foram observados índices de vários, saturação e porosidade que não apresentaram grandes variações entre as amostras e tempos de cura, apresentando de forma geral um índice de vazios médio de 0,41, grau de saturação médio de 63% e porosidade média de 29% (Tabela 26). A baixa variação nesses valores se deve ao fato que todos os CPs foram moldados com o mesmo teor de fluidos e peso específico seco.

Tabela 26: Condições dos corpos de prova

Amostra	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρ_d (g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)
SN	7 dias	9,75%	-0,25%	1,859	100,01%	0,41	61,9%	29,3%	325,88
SN + 2%OD	7 dias	9,74%	-0,26%	1,859	100,00%	0,41	61,8%	29,3%	282,08
SN + 4%OD	7 dias	10,00%	0,00%	1,871	100,66%	0,41	64,9%	28,8%	281,81
SN + 6%OD	7 dias	9,72%	-0,28%	1,867	100,46%	0,41	62,6%	29,0%	258,25
SN + 8%OD	7 dias	10,19%	0,19%	1,848	99,40%	0,42	63,3%	29,7%	279,64
SN + 2%OD	28 dias	9,52%	-0,48%	1,861	100,13%	0,41	60,6%	29,2%	272,94
SN + 4%OD	28 dias	9,80%	-0,20%	1,862	100,16%	0,41	62,5%	29,2%	238,31
SN + 6%OD	28 dias	10,05%	0,05%	1,858	99,95%	0,42	63,7%	29,3%	191,17
SN + 8%OD	28 dias	10,28%	0,28%	1,866	100,38%	0,41	66,0%	29,0%	225,11
SN + 2%OD	56 dias	10,29%	0,29%	1,846	99,30%	0,42	63,7%	29,8%	313,43
SN + 4%OD	56 dias	9,99%	-0,01%	1,857	99,91%	0,42	63,1%	29,4%	232,20
SN + 6%OD	56 dias	9,91%	-0,09%	1,859	100,01%	0,41	62,9%	29,3%	208,76
SN + 8%OD	56 dias	10,21%	0,21%	1,861	100,09%	0,41	65,0%	29,3%	269,54

Fonte: Autora (2024)**4.6.1. Resistência a compressão simples - 2% OD**

Uma vez obtidos os efeitos da incorporação de óleo diesel no solo, optou-se pelo tratamento de amostras contaminadas com 2% e 8% de óleo diesel. A Tabela 27 apresenta os resultados dos ensaios de amostras contaminadas com 2% de óleo diesel e tratadas com 10%, 20% e 30% de CBCA.

Tabela 27: Resistência a compressão simples de solo contaminado com 2% OD (kPa)

Amostra	7 Dias	28 Dias	56 Dias
SN + 2% OD	282,08	272,94	313,43
S2CBCA10	144,11	146,29	222,95
S2CBCA20	94,58	133,3	138,56
S2CBCA30	132,09	139,78	157,34

Fonte: Autora (2024)

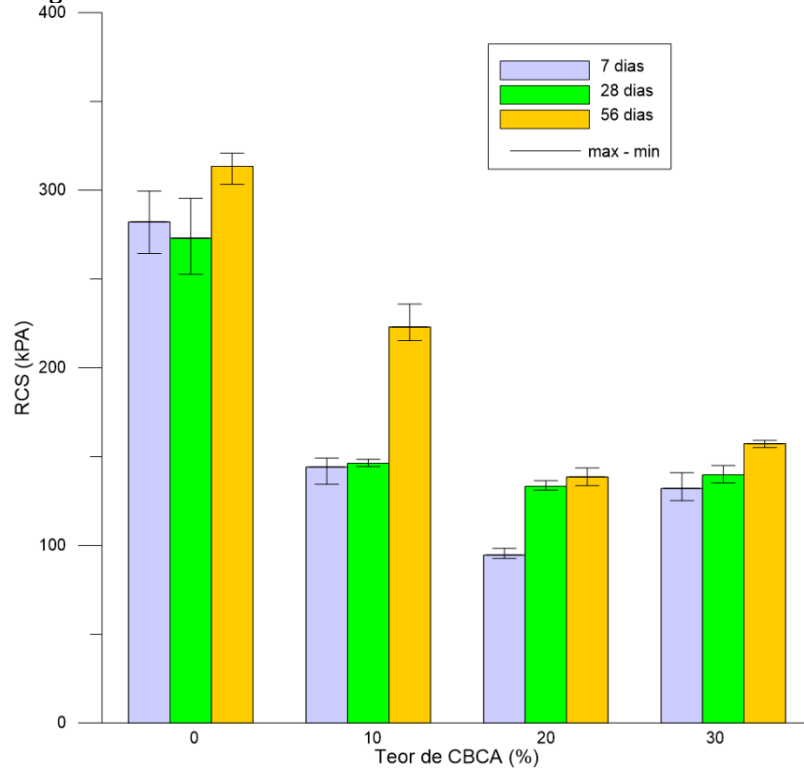
A respeito da influência da CBCA em amostras contaminadas com 2% OD na resistência a compressão simples do solo, constatou-se que para todos os teores de CBCA e tempos de cura, houve uma redução na RCS das amostras, sendo os melhores resultados

encontrados para as amostras com 10% de CBCA, que apresentou uma redução da RCS de 49%, 46% e 29% para 7, 28 e 56 dias de cura respectivamente

Também se constatou que os resultados de 7 e 28 dias de cura foram semelhantes (com exceção da amostra com 20% de CBCA, sendo observado um aumento significativo na resistência apenas para os 56 dias de cura.

A Figura 70 apresenta os resultados de RCS para as amostras de solo contaminado com 2%OD e tratado com os teores de 10%, 20% e 30% de CBCA e tempos de cura de 7, 28 e 56 dias.

Figura 70: RCS amostras com 2%OD e tratadas com CBCA

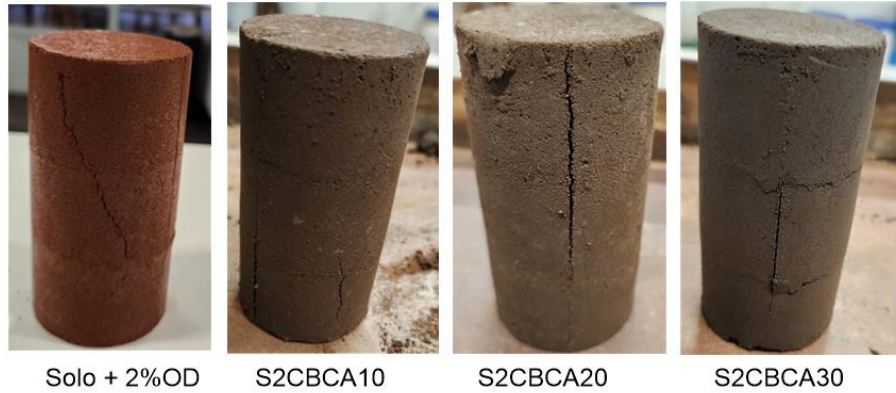


Fonte: Autora (2024)

No presente estudo observou-se a diminuição da RCS das amostras conforme se aumentava o teor de cinza, esse resultado também pode ser justificado pelo rearranjo das partículas, uma vez que na Figura 71, Figura 72 e Figura 73, pode ser observado que o rompimento dos CPs passou a ocorrer na vertical, na junção de ambas as bandas dos CPs. Nas amostras com 10% de CBCA, ainda é possível visualizar outras trincas ao longo do CPs, ou até mesmo trincas na diagonal.

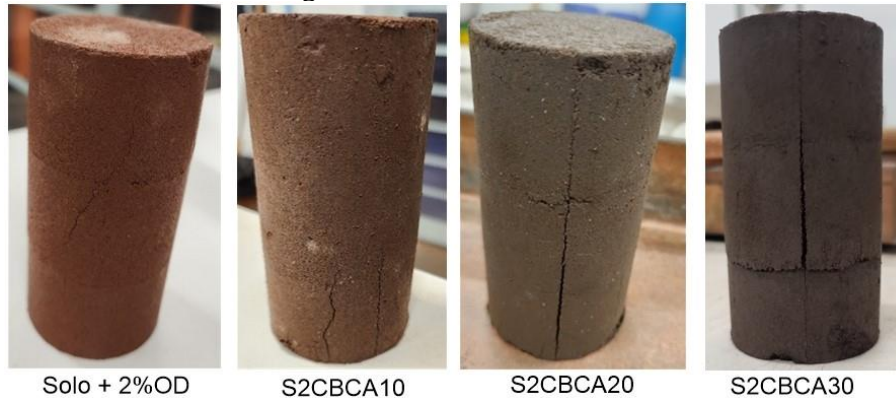
Além do mais, a análise visual demonstrou que aos 56 dias os CPs apresentaram reações e passaram a apresentar manchas brancas, que podem ser uma justificativa para o aumento da RCS em especial as amostras com 10% de CBCA.

Figura 71: CPs 2%OD - 7 dias



Fonte: Autora (2024)

Figura 72: CPs 2%OD - 28 dias



Fonte: Autora (2024)

Figura 73: CPs 2%OD - 56 dias

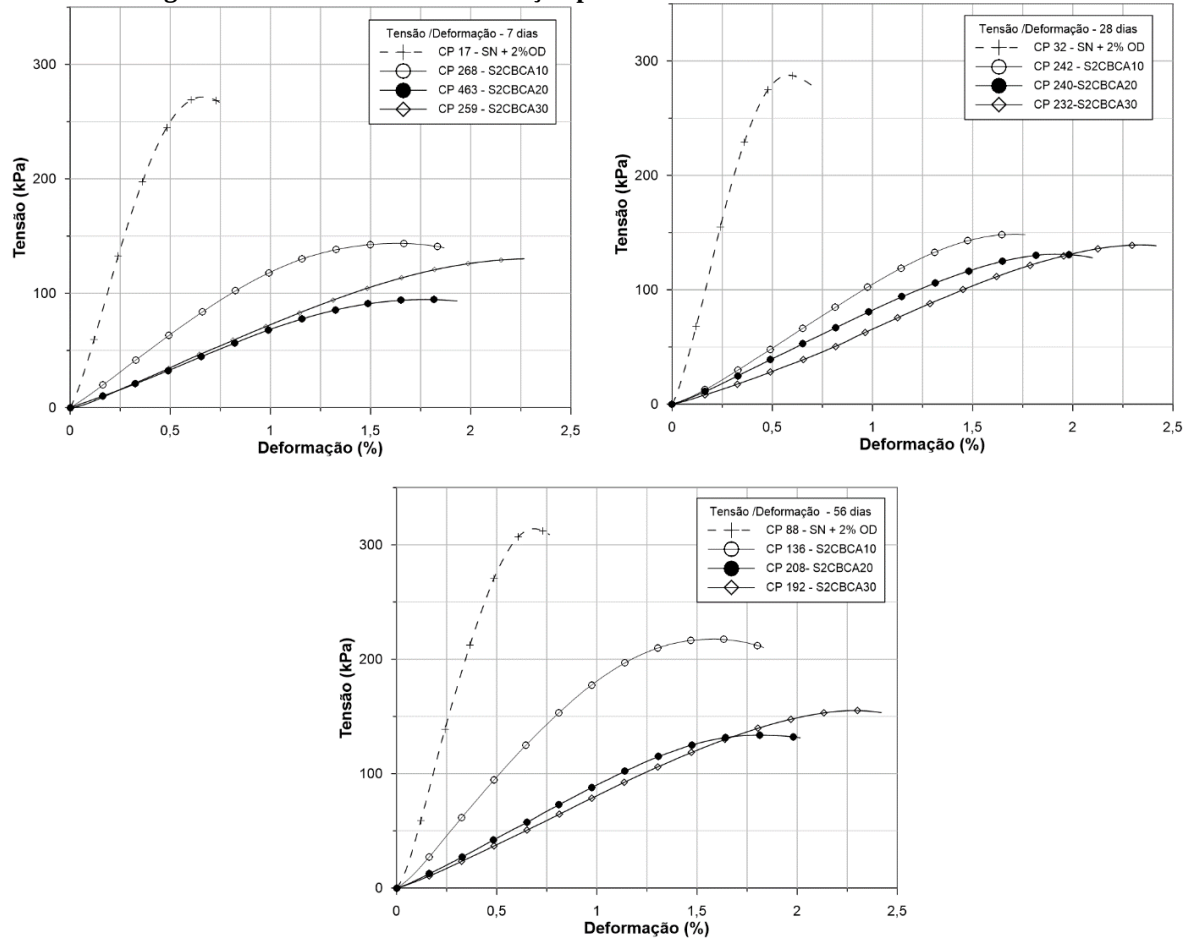


Fonte: Autora (2024)

A partir da análise dos gráficos de tensão *versus* deformação (Figura 74) observou-se a menor resistência dos corpos tratados com a CBCA, em relação ao solo contaminado, bem

como os CPs apresentaram maiores deformações após a adição da cinza, passando de uma deformação no rompimento de aproximadamente 0,7% até 2,3%. Tal resultado demonstra que a CBCA diminuiu a rigidez das amostras.

Figura 74: Tensão versus Deformação para amostras contaminadas com 2% OD



Fonte: Autora (2024)

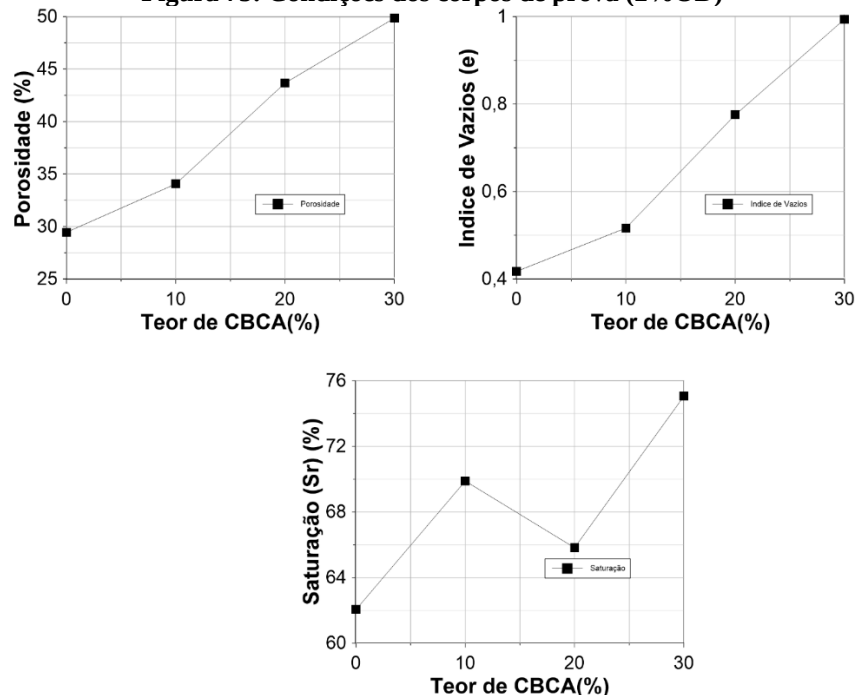
Em relação as amostras contaminadas com 2% de óleo diesel tratadas com 10%, 20% e 30% de CBCA, não foi possível padronizar o mesmo teor de fluidos e peso específico seco devido à grande variação entre suas curvas de compactação, sendo adotado os parâmetros do teor de fluídos ótimo e peso específico seco máximo das suas respectivas curvas de compactação. Também se padronizou o grau de compactação de 100% aceitando variações de mais ou menos 2%. Foram observados índices de vazios, grau de saturação e porosidade que apresentaram grandes variações entre as amostras, não houve grandes variações para os diversos tempo de cura uma vez que os CPs foram moldados com as mesmas características (Tabela 28).

Tabela 28: Condições dos corpos de prova (2%OD)

Amostra	Tempo de Cura	W mold	ΔW	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	N	RCS (kPa)
SN+2%OD	7 dias	9,74%	-0,26%	1,859	100,00%	0,41	61,8%	29,31%	282,08
SN+2%OD	28 dias	9,52%	-0,48%	1,861	100,13%	0,41	60,6%	29,22%	272,94
SN+2%OD	56 dias	10,29%	0,29%	1,846	99,30%	0,42	63,7%	29,81%	313,43
S2CBCA10	7 dias	13,99%	0,09%	1,733	100,00%	0,52	71,1%	34,08%	144,11
S2CBCA10	28 dias	13,88%	-0,02%	1,730	99,83%	0,52	70,2%	34,19%	146,29
S2CBCA10	56 dias	13,33%	-0,57%	1,737	100,10%	0,51	68,3%	33,90%	222,95
S2CBCA20	7 dias	19,79%	0,09%	1,467	98,88%	0,79	65,7%	44,15%	94,58
S2CBCA20	28 dias	19,11%	-0,59%	1,485	100,10%	0,77	65,3%	43,46%	133,30
S2CBCA20	56 dias	19,39%	-0,31%	1,487	100,23%	0,77	66,4%	43,39%	138,56
S2CBCA30	7 dias	28,49%	0,49%	1,318	99,78%	0,99	75,4%	49,79%	132,09
S2CBCA30	28 dias	28,30%	0,30%	1,314	99,49%	1,00	74,5%	49,93%	139,78
S2CBCA30	56 dias	28,50%	0,50%	1,316	99,69%	0,99	75,3%	49,83%	157,34

Fonte: Autora (2024)

Foi possível observar um aumento progressivo da porosidade e do índice de vazios, apresentando um aumento de até 69% e 138% respectivamente, esse aumento está relacionado a porosidade da cinza, conforme já observado na análise por microscopia. A respeito da saturação foi registrado uma tendencia de aumento em geral, apresentando apenas um decréscimo para as amostras com 20% de CBCA que se deve ao fato do baixo aumento do teor de umidade em relação ao aumento do índice de vazios (Figura 75 e Tabela 28).

Figura 75: Condições dos corpos de prova (2%OD)

Fonte: Autora (2024)

4.6.2. Resistência a compressão simples - 8% OD

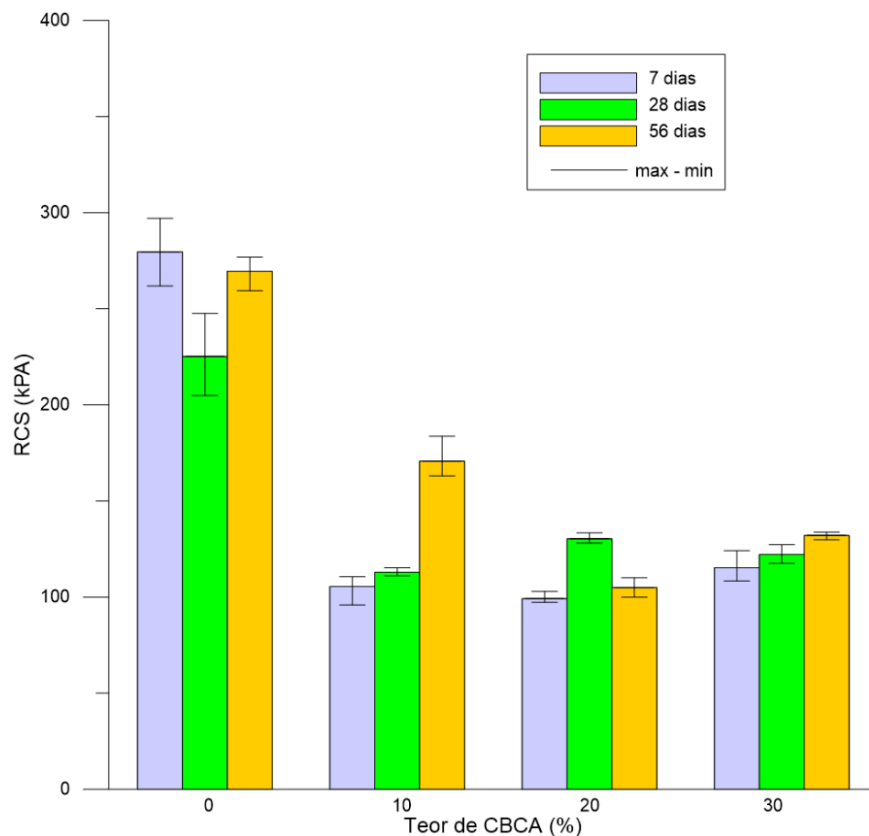
A Tabela 29 e a Figura 76 apresenta os resultados dos ensaios de amostras contaminadas com 8% de óleo diesel e tratadas com 10%, 20% e 30% de CBCA. A respeito da influência da CBCA em amostras contaminadas com 8% de óleo diesel na resistência a compressão simples do solo, constatou-se que para todos os teores de CBCA e tempos de cura, houve uma redução na RCS das amostras, sendo os melhores resultados encontrados para as amostras com 10% de CBCA, que apresentou uma redução da RCS de 37% para 56 dias. Também se constatou que os resultados de 7 e 28 dias de cura foram semelhantes para todas as amostras, sendo observado um aumento significativo na resistência apenas para os 56 dias de cura na amostra com 10% CBCA. As demais amostras não apresentaram grandes variações mesmo após o tempo de cura.

Tabela 29: Resistência a compressão simples de solo contaminado com 8% OD (kPa)

Amostra	7 Dias	28 Dias	56 Dias
Solo + 8% OD	279,64	225,11	269,54
S8CBCA10	105,53	112,98	170,73
S8CBCA20	99,17	130,31	104,89
S8CBCA30	115,27	122,13	131,98

Fonte: Autora (2024)

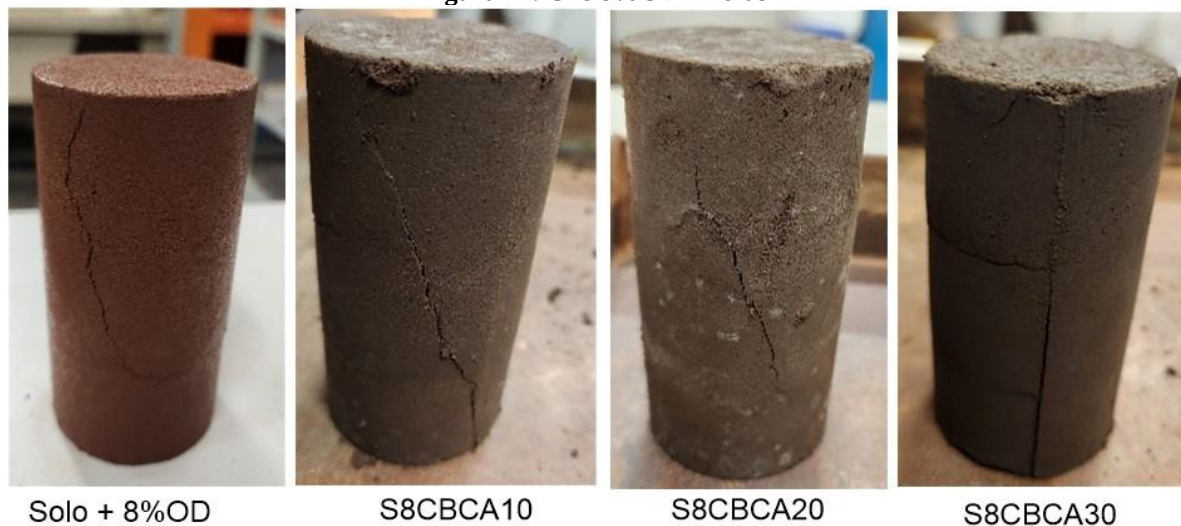
Figura 76: RCS amostras com 8%OD e tratadas com CBCA



Fonte: Autora (2024)

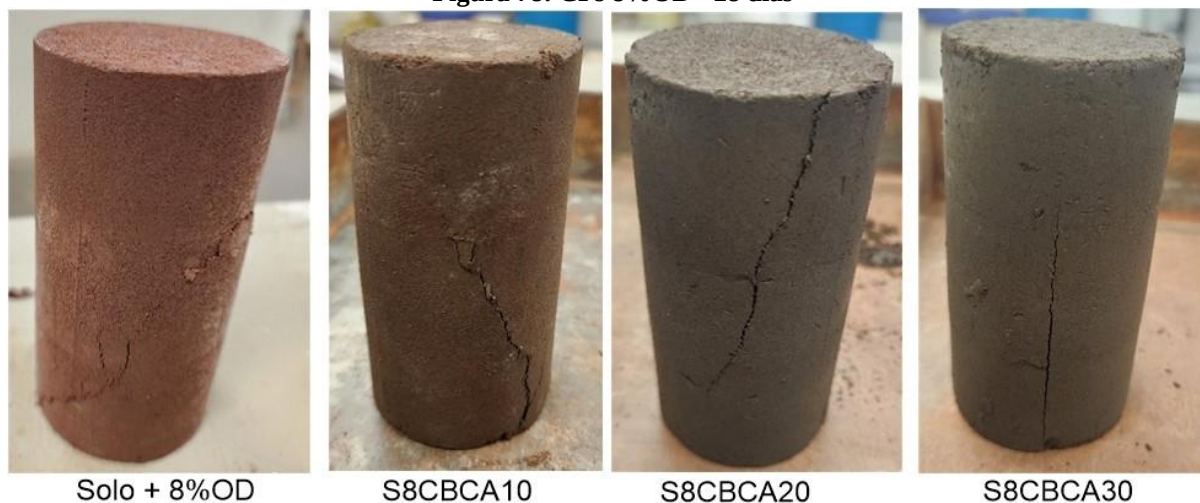
Conforme já constatado nas amostras com 2%OD, as amostras com 8% de diesel e 30% CBCA também passaram a apresentar trincas na vertical, possivelmente devido ao arranjo das partículas. Além do mais, a análise visual demonstrou que aos 56 dias as amostras com 10% CBCA apresentaram reações e passaram a apresentar manchas brancas, que podem ser uma justificativa para o aumento exponencial da RCS (Figura 77, Figura 78 e Figura 79)

Figura 77: CPs 8%OD - 7 dias

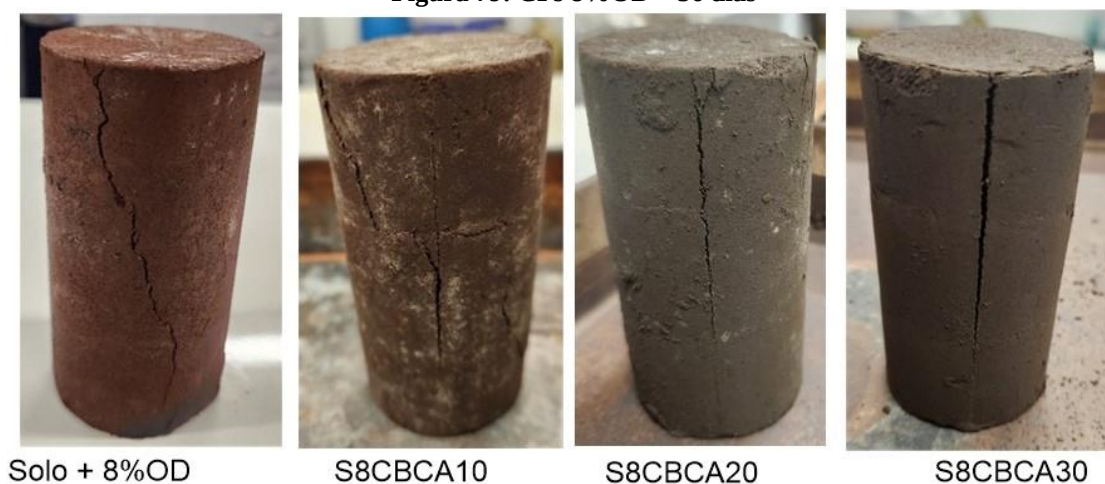


Fonte: Autora (2024)

Figura 78: CPs 8%OD - 28 dias

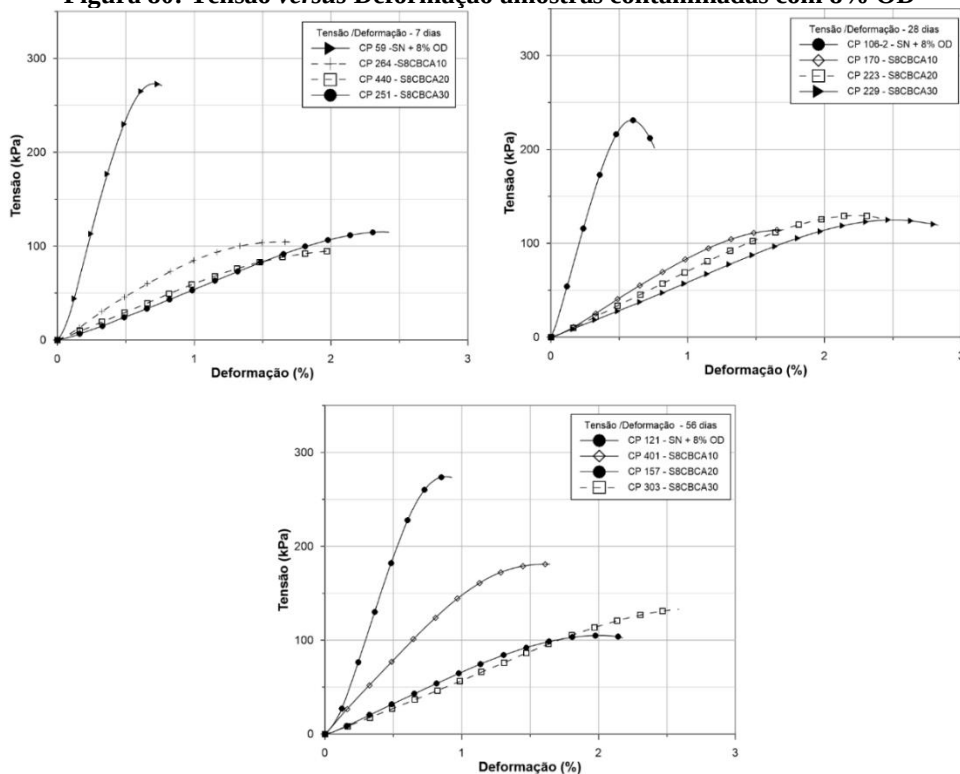


Fonte: Autora (2024)

Figura 79: CPs 8%OD – 56 dias

Fonte: Autora (2024)

A partir da análise dos gráficos de tensão *versus* deformação (Figura 80) observou-se a menor resistência dos corpos tratados com a CBCA, em relação ao solo contaminado, bem como os CPs apresentaram maiores deformações após a adição da cinza, passando de uma deformação na ruptura de aproximada 0,8% até 2,5%. Sendo as maiores deformações apresentadas para as amostras com 30% CBCA. Tal resultado demonstra que a CBCA diminuiu a rigidez das amostras.

Figura 80: Tensão versus Deformação amostras contaminadas com 8% OD

Fonte: Autora (2024)

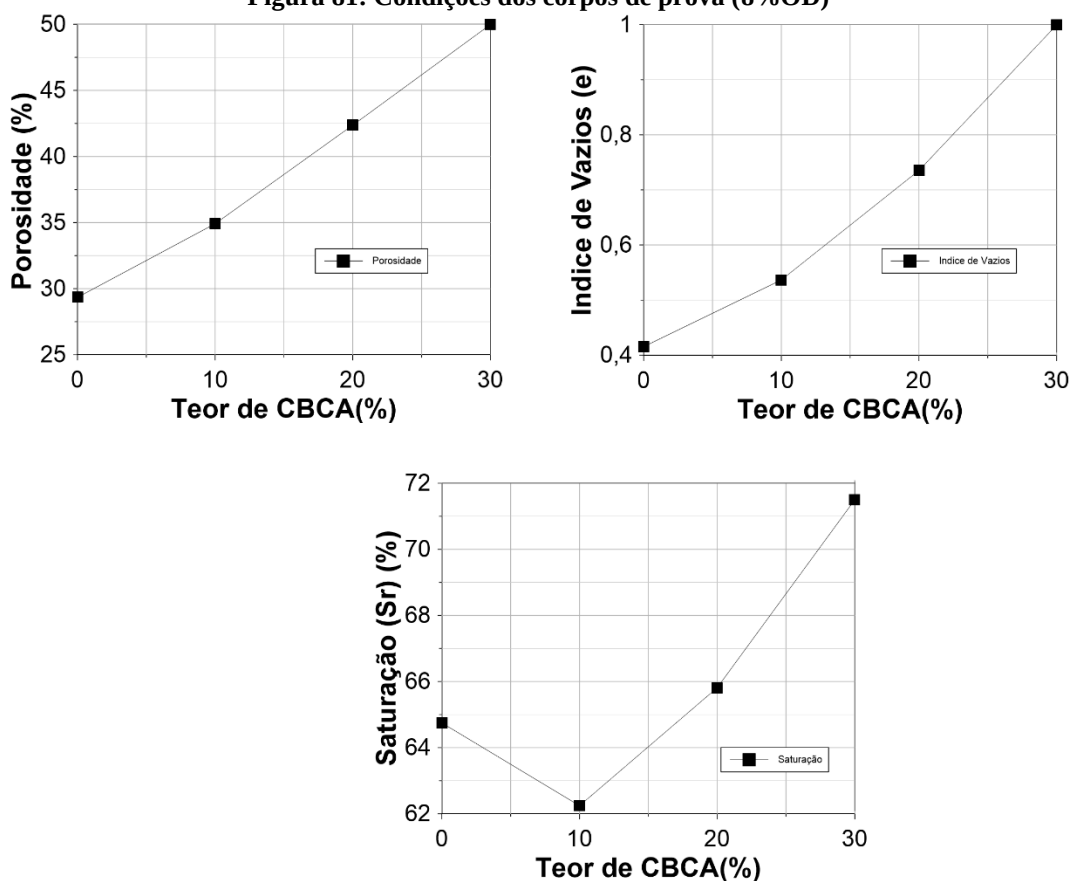
Em relação as amostras contaminadas com 8% de óleo diesel tratadas com 10%, 20% e 30% de CBCA, não foi possível padronizar o mesmo teor de fluidos e peso específico seco devido à grande variação entre suas curvas de compactação, sendo adotado o peso específico seco máximo e o teor de fluidos ótimo de suas respectivas curvas de compactação. Também se padronizou o grau de compactação de 100% aceitando variações de mais ou menos 2%. Foram observados índices de vazios, grau de saturação e porosidade que apresentaram grandes variações entre as amostras, não houve grandes variações para os diversos tempo de cura uma vez que os CPs foram moldados com as mesmas características (Figura 81 e Tabela 30).

Tabela 30: Condições dos corpos de prova (8%OD)

Amostra	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρ_d(g/cm³)	GC	E	Sr	n	RCS (kPA)
SOLO+8% OD	7 dias	10,19%	0,19%	1,848	99,40%	0,42	63,3%	29,7%	279,64
SOLO+8% OD	28 dias	10,28%	0,28%	1,866	100,38%	0,41	66,0%	29,0%	225,11
SOLO+8% OD	56 dias	10,21%	0,21%	1,861	100,09%	0,41	65,0%	29,3%	269,54
S8CBCA10	7 dias	13,34%	-0,16%	1,709	100,26%	0,54	65,2%	35,0%	105,53
S8CBCA10	28 dias	13,41%	-0,09%	1,711	100,40%	0,54	65,8%	34,9%	112,98
S8CBCA10	56 dias	11,38%	-2,12%	1,711	100,38%	0,54	55,8%	34,9%	170,73
S8CBCA20	7 dias	18,47%	0,37%	1,510	99,23%	0,74	65,7%	42,5%	99,17
S8CBCA20	28 dias	18,06%	-0,04%	1,519	99,80%	0,73	65,0%	42,2%	130,31
S8CBCA20	56 dias	18,77%	0,67%	1,511	99,24%	0,74	66,7%	42,5%	104,89
S8CBCA30	7 dias	27,54%	0,84%	1,316	99,66%	0,99	72,7%	49,9%	115,27
S8CBCA30	28 dias	26,90%	0,20%	1,309	99,16%	1,00	70,3%	50,1%	122,13
S8CBCA30	56 dias	27,25%	0,37%	1,312	99,39%	1,00	71,5%	50,0%	131,98

Fonte: Autora (2024)

Nota-se um aumento progressivo da porosidade e do índice de vazios, apresentando um aumento de até 70% e 141% respectivamente, esse aumento está relacionado a porosidade da cinza, conforme já observado na análise por microscopia. A respeito da saturação foi registrado uma tendencia de aumento em geral, apresentando apenas um decréscimo para as amostras com 10% de CBCA que se deve ao fato da variação do teor de umidade desses CPs.

Figura 81: Condições dos corpos de prova (8%OD)

Fonte: Autora (2024)

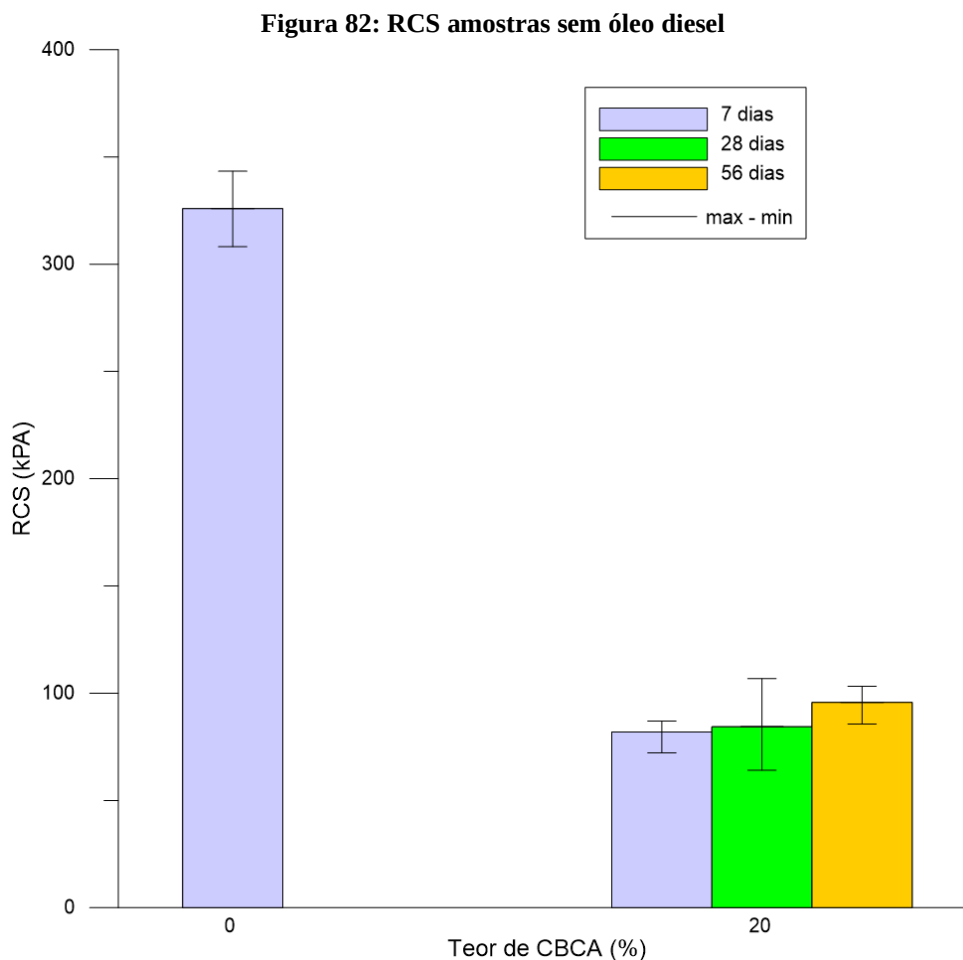
4.6.3. Resistência a compressão simples - SN + 20% CBCA

Uma vez obtidos os efeitos no óleo diesel no solo, optou-se pelo tratamento de amostras contaminadas com 2% e 8% de óleo diesel com os teores de 10%, 20% e 30% de CBCA onde observou-se o decréscimo da resistência, a fim de analisar melhor esse comportamento optou-se pela realização do ensaio de uma amostra de solo natural com 20% CBCA, os resultados são apresentados na Tabela 31 e na Figura 82. Tais resultados apontaram para uma queda de 74% na RCS em comparação com o solo natural, bem como constatou-se que o tempo de cura teve pouca influência nos resultados.

Tabela 31: Resistência a compressão simples de solo + CBCA (kPa)

Amostra	7 Dias	28 Dias	56 Dias
SN	325,88		
SOLO + 20%CBCA	81,90	84,29	95,74

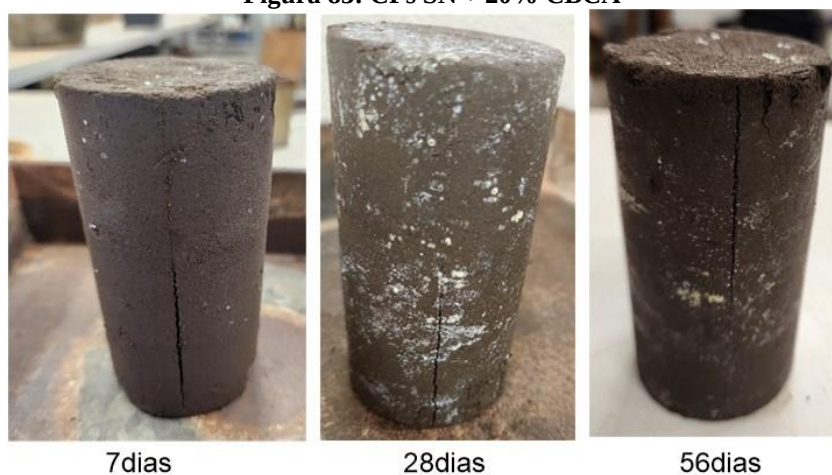
Fonte: Autora (2024)



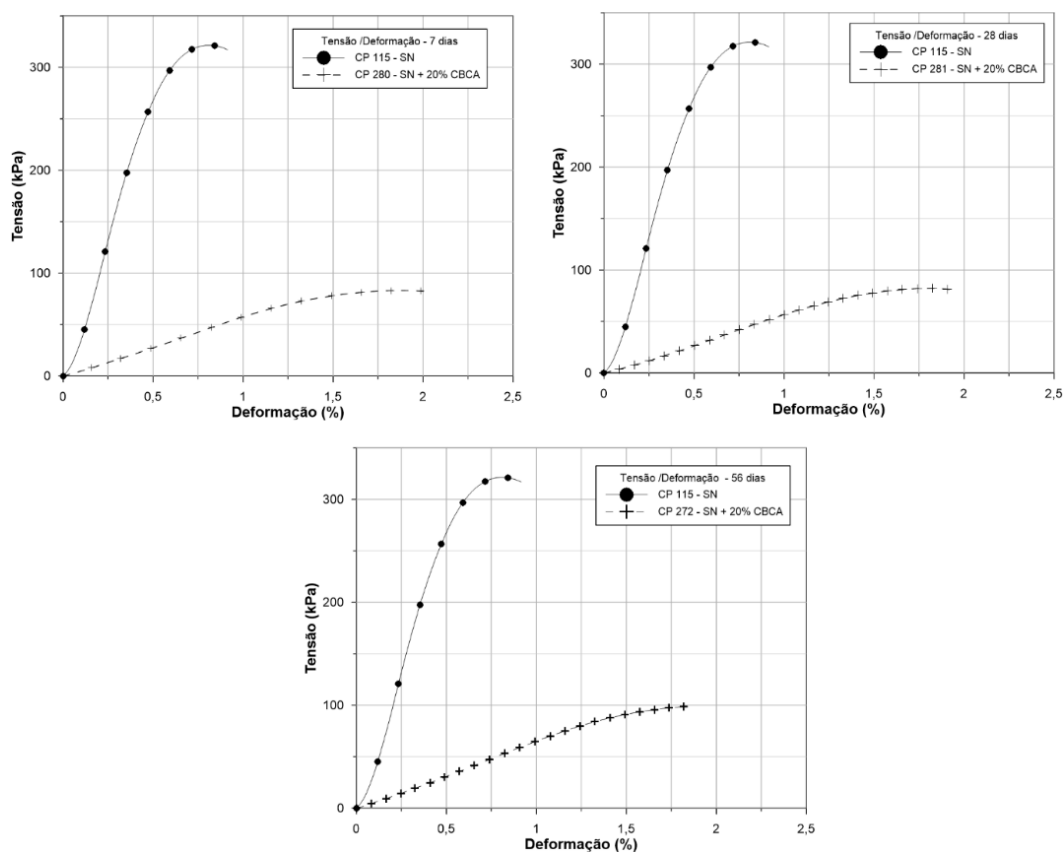
Fonte: Autora (2024)

No presente estudo observou-se a diminuição da RCS ao adicionar CBCA na amostra de solo, esse resultado também pode ser devido ao rearranjo das partículas, uma vez que na Figura 83, pode ser observado que o rompimento dos CPs passou a ocorrer na vertical, na junção de ambas as bandas do CP. Além do mais, a análise visual demonstrou que os CPs apresentaram reações e passaram a apresentar manchas brancas, porém nesse caso, não apontaram para grandes acréscimos na resistência.

A partir da análise dos gráficos de tensão *versus* deformação (Figura 84) observou-se a menor resistência dos corpos tratados com a CBCA, em relação ao solo natural, bem como os CPs apresentaram maiores deformações após a adição da cinza, passando de uma deformação no rompimento de aproximada 0,8% até 1,8%. Tal resultado demonstra que a CBCA diminuiu a rigidez das amostras.

Figura 83: CPs SN + 20% CBCA

Fonte: Autora (2024)

Figura 84: Tensão versus Deformação Amostras SN + 20%CBCA

Fonte: Autora (2024)

Não foi possível padronizar o mesmo teor de fluidos e peso específico seco para ambas as amostras devido à grande variação entre suas curvas de compactação, sendo adotado o ponto da ótima da curva SN + 20% CBCA. Também se padronizou o grau de compactação de 100% aceitando variações de mais ou menos 2%. Foram observados índices de vazios, saturação e

porosidade que apresentaram grandes variações entre as amostras, não houve grandes variações para os diversos tempo de cura uma vez que os CPs foram moldados com as mesmas características (Tabela 32 e Figura 85).

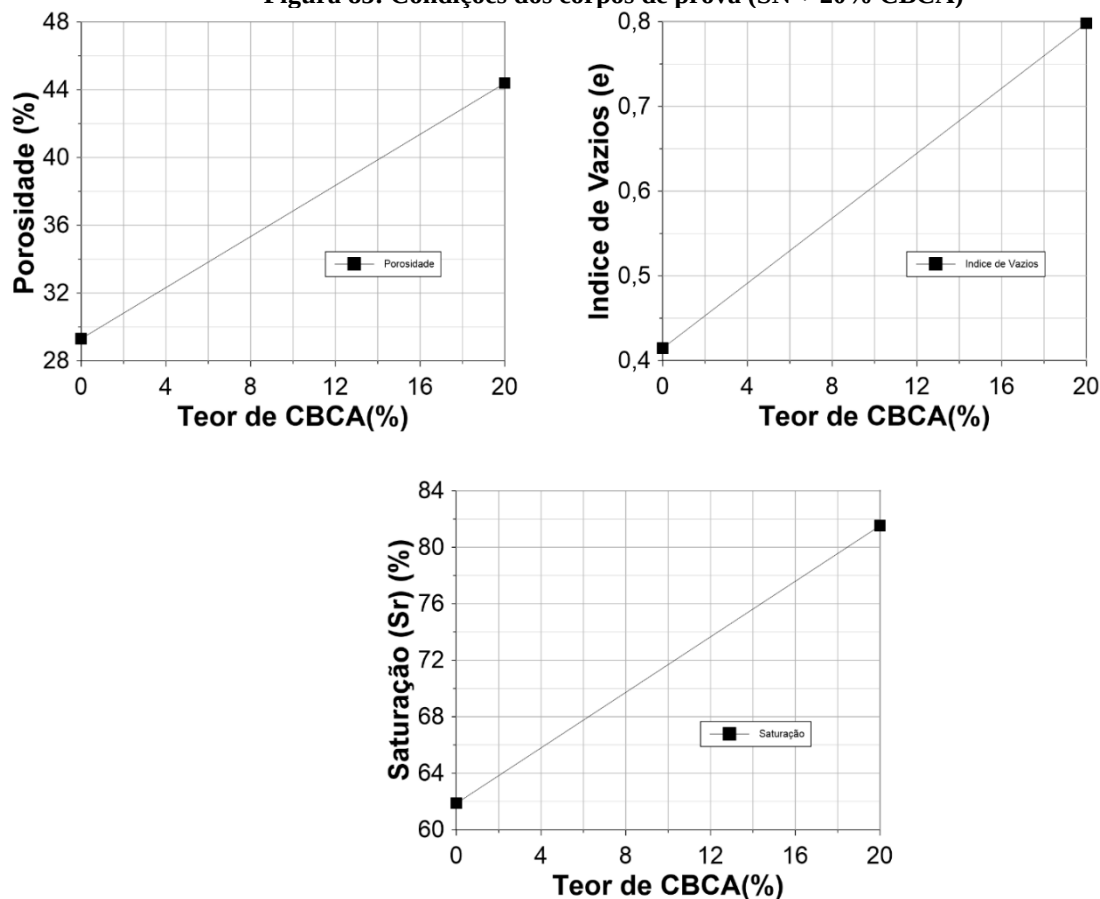
Tabela 32: Condições dos corpos de prova sem OD

Amostra	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPA)
SN	7 dias	9,75%	-0,25%	1,859	100,01%	0,41	61,9%	29,3%	325,88
SN+ 20% CBCA	7 dias	24,77%	0,18%	1,464	100,00%	0,79	82,0%	44,3%	81,90
SN + 20% CBCA	28 dias	24,78%	0,19%	1,465	100,06%	0,79	82,1%	44,2%	84,29
SN + 20% CBCA	56 dias	24,77%	0,18%	1,455	99,37%	0,81	80,5%	44,7%	95,74

Fonte: Autora (2024)

Observa-se um aumento progressivo da porosidade, do índice de vazios, e saturação, apresentando um aumento de até 51%, 92% e 32% respectivamente, esse aumento está relacionado a porosidade da cinza, conforme já observado na análise por microscopia.

Figura 85: Condições dos corpos de prova (SN + 20% CBCA)

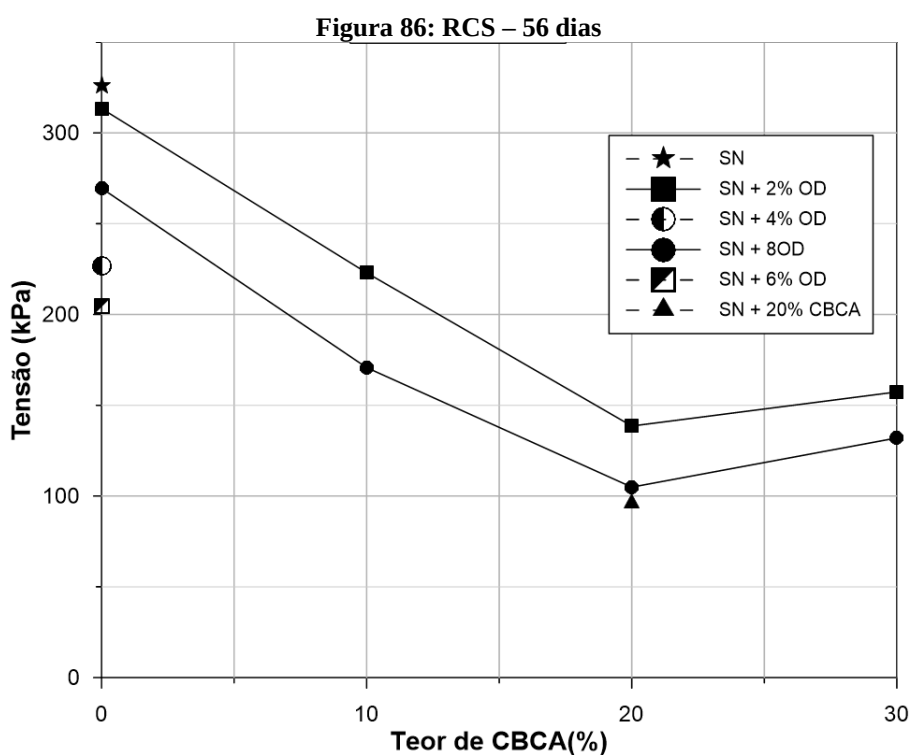


Fonte: Autora (2024)

4.6.4. Conclusão Resistência a compressão simples

Optou-se pela elaboração de um pequeno tópico resumindo os resultados de RCS encontrados para todas as amostras com período de cura de 56 dias, sendo esse período adotado uma vez que foi o maior tempo analisado e que mais se aproximaria da situação caso tal técnica fosse aplicada em campo.

A respeito da contaminação do solo natural com óleo diesel observou-se o decréscimo da resistência para todos os teores de diesel aplicados, apresentando uma queda de 4%, 29%, 36% e 17% para 2% OD, 4% OD, 6% OD e 8% OD respectivamente em relação ao solo não contaminado. Conforme já mencionado os corpos de prova foram moldados com os parâmetros de teor de fluidos ótimo e peso específico seco máximo da curva de 8%, o que pode justificar para uma resistência superior aos CPs de 4% e 6%, uma vez que este foi moldado sob sua melhor condição (Figura 86).



Fonte: Autora (2024)

Após análise dos efeitos do óleo diesel na amostra de solo contaminado, tratou-se as amostras com 2% OD e 8% OD com cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Para as amostras contaminadas com 2% OD, 8% OD e tratadas com 10% CBCA, 20% CBCA e 30% CBCA, não foi possível continuar com padrão de peso específico seco e teor de fluidos que vinha sendo utilizado devido à grande variação entre as curvas de compactação, de

forma que não seria possível a execução da moldagem dos CPs. Dessa forma, optou-se por continuar utilizando os resultados já obtidos para os teores de 2% e 8% OD, e os CPs com CBCA foram moldados com o teor de fluidos ótimo e peso específico seco máximo de suas respectivas curvas.

Sendo assim, para os CPs de 2% OD% tratados com 10% CBCA, 20% CBCA e 30% CBCA constatou-se uma redução da RCS de 29%, 56% e 50% respectivamente em relação ao solo natural contaminado com 2% OD, já para os CPs de 8 % OD% tratados com 10% CBCA, 20% CBCA e 30% CBCA constatou-se uma redução da RCS de 37%, 61% e 51% respectivamente em relação ao solo natural contaminado com 8% OD.

Ou seja, para ambos os teores e tempos de cura, a CBCA levou à redução das RCS das amostras, apresentando a pior situação para as amostras com 20% CBCA e melhores resultados para as amostras com 10% CBCA. Como já abordado, tais resultados podem ser devidos a alta porosidade da CBCA, que levou a um elevado índice de vazios nas amostras, bem como à elevada saturação.

Sendo que as amostras com S_2CBCA_{10} , S_2CBCA_{20} e S_2CBCA_{30} apresentaram um aumento de 24%, 86% e 138% no índice de vazios respectivamente, e as amostras S_8CBCA_{10} , S_8CBCA_{20} e S_8CBCA_{30} apresentaram um aumento de 29%, 77% e 141% no índice de vazios respectivamente.

A literatura apresenta divergência sobre os efeitos da CBCA na RCS do solo, Junior *et al.* (2018) a pontam que em misturas de solo-cimento com 5% de cimento, a substituição de 25% e 50% do cimento por CBCA resultou em uma redução significativa na resistência, quase pela metade. Em misturas com 10% de cimento, a substituição de 25% por CBCA causou uma redução relativamente pequena na resistência, mas ao aumentar a substituição para 50%, a resistência foi reduzida em aproximadamente 50% em relação à substituição de 25%. Isso sugere que em misturas com menor teor de cimento, a substituição por CBCA pode comprometer a resistência, enquanto em misturas com maior teor, a substituição pode ser feita com menos impacto negativo.

Por outro lado, Baracho e Correia (2021), observaram que a adição de 10% de teor de cinza em solo argiloso, foi obtido um aumento de cerca de 32% na resistência à compressão. Jayakrishnan, Gracious e Shaju (2021) constataram um aumento de 29,5% com a adição de 60% de cinza volante da resistência a compressão simples.

Baracho e Correia (2021) também observaram que os melhores resultados foram com 10% de CBCA, apresentando uma queda da resistência para amostras tratadas com 20% CBCA,

ratificando os resultados da presente pesquisa. Possivelmente essa diferença de resultados se deve as características do material utilizado.

4.7. CROMATOGRAFIA GASOSA

A fim de analisar a eficácia da CBCA no tratamento de solo contaminado com diesel, foi realizado ensaio de cromatografia gasosa para as amostras de solo contaminado com 8% de óleo diesel, solo contaminado com 8% de óleo diesel e tratado com 5% e 10% CBCA.

Foram obtidos os resultados em hidrocarbonetos total (TPH) num valor de 601,00ppm para o solo sem tratamento, 478,40ppm para solo tratado com 5% de CBCA e 500,90ppm para solo tratado com 10% de CBCA.

Esses valores indicaram um baixo nível de contaminação, uma vez que os valores de investigação para solo são de 1000ppm (Parana, 2020). Além disso também se observou que a variação de 5% e 10% não apresentou grandes alterações no tratamento, de forma que se optou por utilizar os teores de 10, 20 e 30% de CBCA no presente trabalho.

Salienta-se que as amostras utilizadas no ensaio foram contaminadas em 8% OD em relação a massa de solo (não sendo considerada a massa de cinza), de forma que após a adição da CBCA o solo passou a apresentar um teor de 7% de OD.

Desta forma para comparar os resultados do solo contaminado com o solo tratado com 10% de CBCA, admite-se um TPH de 546,36ppm (calculado proporcionalmente a quantidade de óleo e massa seca da amostra) para o solo contaminado. Desta forma os resultados apontam que o uso de 10% de CBCA para o tratamento de solo contaminado, levou uma redução de aproximadamente 8% dos hidrocarbonetos totais presente no solo.

Recomenda-se que os ensaios sejam realizados novamente em amostras com 8% OD em relação a massa seca total para averiguação da aproximação utilizada, bem como para maiores teores de CBCA a fim de observar se existe uma tendencia de redução dos hidrocarbonetos totais.

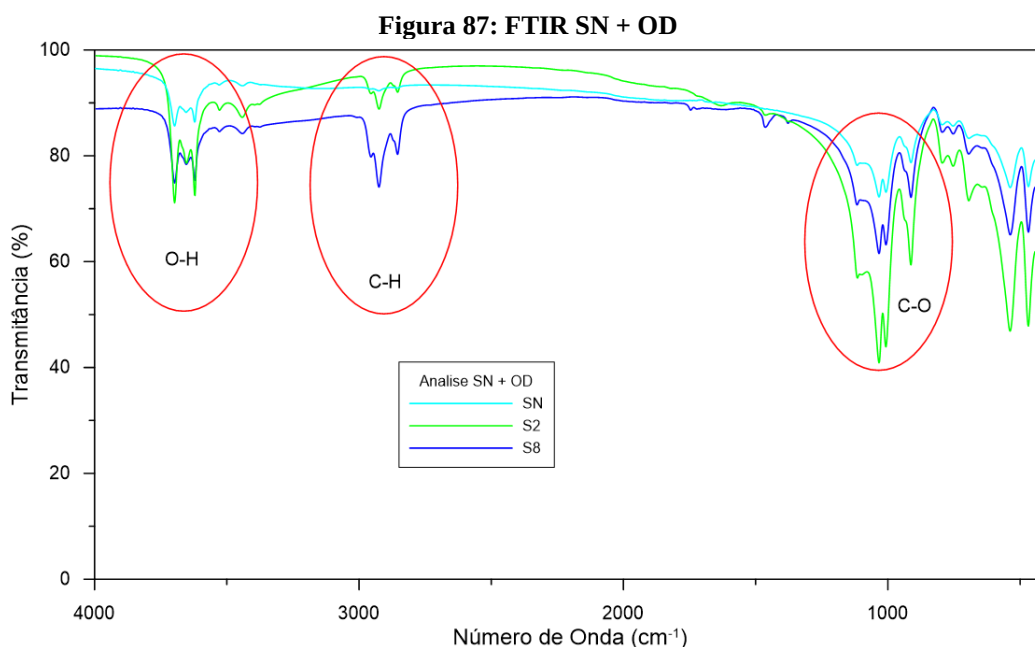
4.8. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Os resultados do ensaio de FTIR com 2% OD, são apresentados na Figura 89, e os com 8%OD na Figura 90. Os espectros de FTIR indicaram o grupo (O–H) variando de 3618,43 a 3734,98 cm^{-1} e 3618,94 a 3691,21 cm^{-1} de número de onda, o grupo (C–H) de 2853,72 a 2922,92 cm^{-1} e 2851,90 a 2952,77 cm^{-1} , já para região de número de onda 1023 cm^{-1} , representa

o grupo (C-O) correspondente ao grupo éster. As ligações C-H e O-H presentes confirmam que o grupo de alcanos de hidrocarbonetos está presente (Devatha; Vishnu Vishal; Purna Chandra Rao, 2019; Salmazo, 2019).

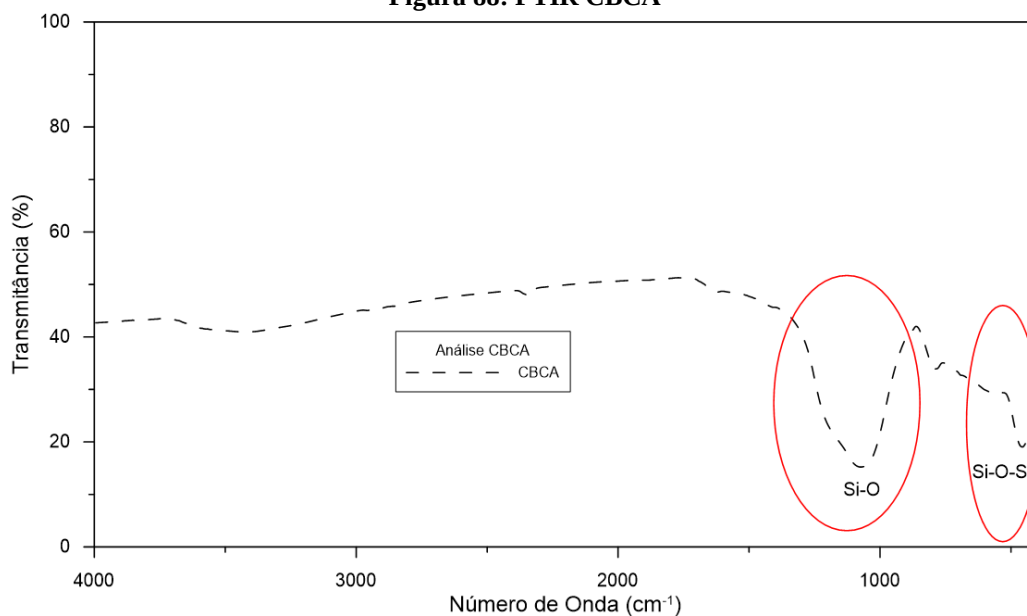
Percebe-se (Figura 87) que ao adicionar óleo diesel em amostras de solo não contaminado formou-se um pico no gráfico próximo ao número de onda 2800, que representa os hidrocarbonetos presente nas amostras, sendo esta a região de maior absorção. Também se observou que a adição de diesel ao solo aumentou o pico na região de 3700 cm^{-1} , correspondente as ligações O-H, que também representam a presença de grupos de hidrocarbonetos, bem como alterações no pico na região de número de onda 1023 cm^{-1} , representa o grupo (C-O) correspondente ao grupo éster (Devatha; Vishnu Vishal; Purna Chandra Rao, 2019; Aliske, 2010; Salmazo, 2019).

A amostra com 2% OD apresentou maiores picos nas regiões de O-H e C-O em comparação com as amostras com 8% OD. Porém na região de maior absorção de hidrocarbonetos (C-H) a amostras de 8% OD se sobressaiu, apontando para a maior presença de diesel (Figura 87).



Fonte: Autora (2024)

Também foram analisados pico de absorção da CBCA (Figura 88), onde observou-se picos na região de próxima ao número de onda 1080 e 460 cm^{-1} , que representa elementos e compostos silício e óxido de silício encontrados nas amostras de CBCA (Anhesine et al., 2022).

Figura 88: FTIR CBCA**Fonte: Autora (2024)**

Observou-se que após a adição da CBCA nas amostras com 2% OD (Figura 89) ocorreram variações nos picos da região de O-H, apontando para uma menor transmitância desse material. As transmitâncias da região correspondente ao C-H também apresentaram pequenas variações. Já para as amostras com 8% OD (Figura 90) a diminuição dos picos foi menos perceptível amontando para menos reações químicas.

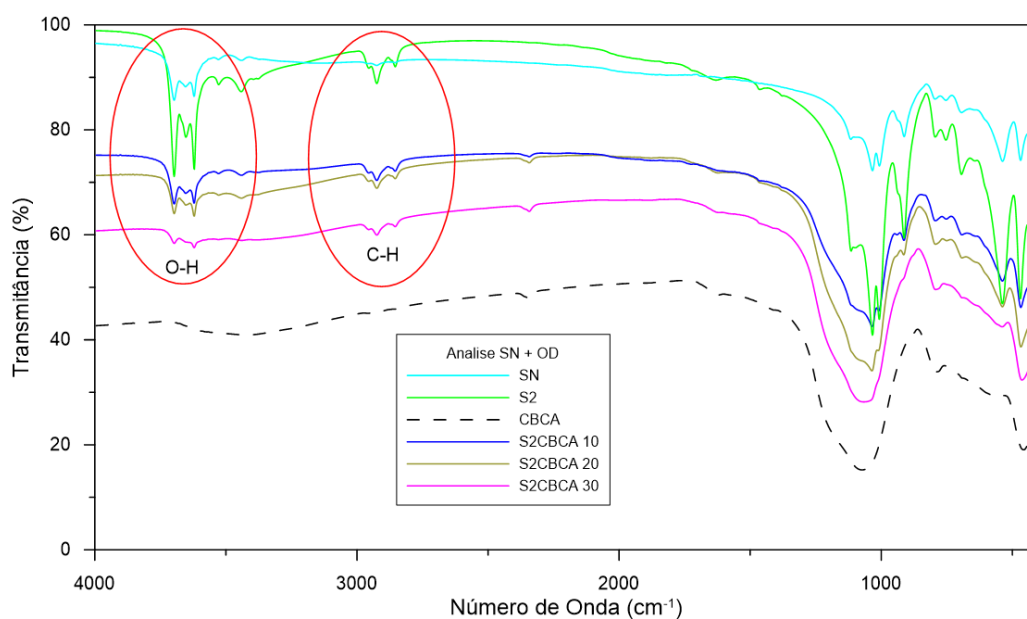
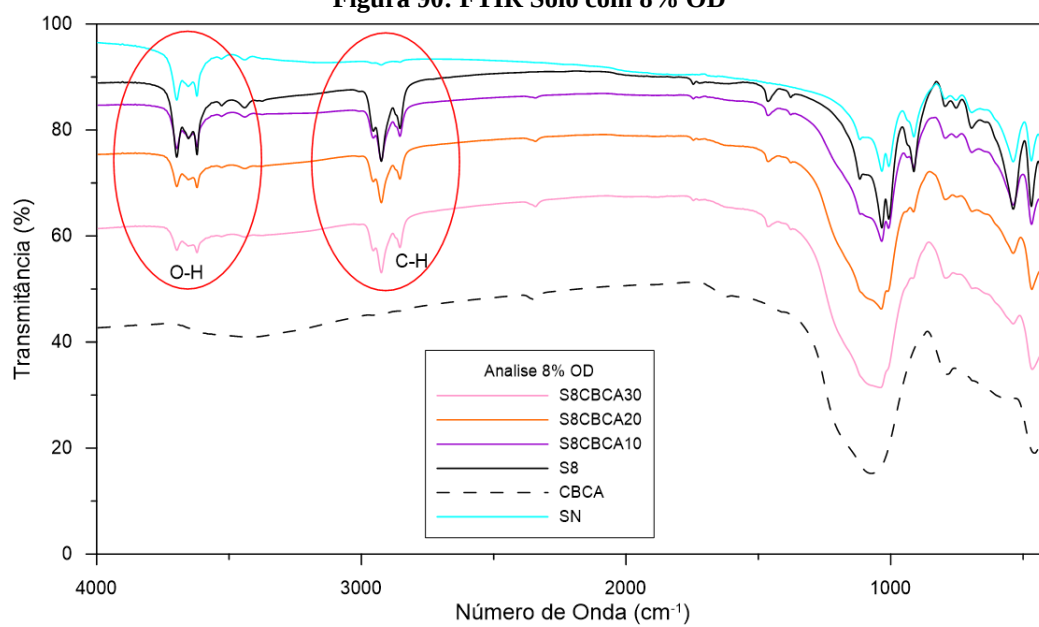
Figura 89: FTIR Solo com 2% OD**Fonte: Autora (2024)**

Figura 90: FTIR Solo com 8% OD**Fonte: Autora (2024)**

5. CONCLUSÃO

O estudo realizado avaliou a viabilidade do uso da CBCA no tratamento de solo tropical contaminado com óleo diesel. Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que:

O solo analisado é um solo laterítico classificado como areia argilosa de acordo com o sistema de classificação unificada, com baixa porcentagem de matéria orgânica, baixo pH e uma elevada concentração de ferro. O elemento mais abundante é o silício, que representa 60% da composição do solo.

O óleo diesel (S500) utilizado possui uma massa específica de 844,3 kg/m³, cor avermelhada, teor de enxofre de 311 ppm e teor de biodiesel de 13,6%. A CBCA por sua vez apresenta a maioria de suas partículas com diâmetro entre 10-100 µm e contém uma elevada quantidade de ferro. É majoritariamente composta por fases cristalinas incluindo Fe₂O₃ (Hematita), SiO₂ (Quartzo e Stishovita) e Al₂O₃ (Corundum). Apresenta baixa atividade pozolânica (498,96 ± 18,48 mg Ca(OH)₂/g) comparado com a sílica ativa, sílica de casca de arroz e metacaulim que apresentam valores de 1542, 1336 e 1193 mg Ca(OH)₂/g amostra respectivamente (Filho *et al.*, 2017). O elemento em maior concentração é o silício que representa 35%, seguido do Alumínio com 28% e Ferro com 25%, que juntos correspondem a 90% da amostra, sendo, portanto, considerada pozolânica segundo a NBR 12653.

Ao adicionar OD no solo, verificou-se uma tendência da diminuição do limite de liquidez a partir da adição do diesel no solo, já o limite da plasticidade não sofreu grande influência. A adição de diesel também resultou em um aumento do pH das amostras e uma significativa diminuição da resistência à compressão simples, com uma redução de até 36% após 56 dias de cura. Além disso, verificou-se a evaporação contínua do diesel quando seco em estufa a 105°C (misturas de solo com diesel), apresentando uma evaporação média de aproximadamente 47% nas primeiras vinte e quatro horas.

Já a adição da cinza nas amostras de solo com 2% de óleo diesel resultou em uma evaporação de 71% para os teores de 10% e 20% de CBCA, enquanto a amostra com 30% apresentou uma evaporação de 59%, sugerindo uma possível retenção do diesel para os maiores teores de CBCA. Para amostras com 8% de óleo diesel, resultou em uma evaporação de 47% para os teores de 10% e 20% de CBCA, enquanto a amostra com 30% apresentou uma evaporação de 40%, sugerindo uma possível retenção do diesel para os maiores teores de CBCA.

Em relação aos limites de Atterberg, a utilização da CBCA demonstrou uma tendência de aumento do limite de liquidez e do limite de plasticidade, com diminuição do índice de plasticidade conforme se aumentava os teores de CBCA, para as amostras com 2% de OD. Já para as amostras com 8% de OD, observou-se o aumento do limite de plasticidade, os demais parâmetros não puderam ser analisados uma vez que não foi possível a realização dos ensaios.

Com relação ao pH para ambos os níveis de contaminação, conforme o aumento do teor de CBCA, ocorreram o aumento do pH das amostras, estando todos os resultados próximos a 7, ou seja, pH neutro, o delta pH continuou sendo negativo, indicando uma maior retenção de cátions do que ânions, porém com uma tendência de diminuição. Tais resultados podem justificar a baixa atividade pozolânica e resistência das amostras com CBCA, uma vez que Blankenagel (2005) argumenta que as reações pozolânicas só podem ocorrer em níveis de pH acima de 10, dessa forma, a fim de se obter melhores resultados recomenda-se a adição de um agente químico a fim de aumentar o pH e as atividades pozolânicas.

Já nos ensaios de compactação observou-se que a adição da CBCA levou ao aumento do teor de fluidos ótimo, e diminuição do peso específico seco máximo, tanto para as amostras com 2% OD e 8% OD.

Os ensaios de resistência à compressão simples das amostras tratadas com CBCA indicaram uma redução da resistência em todos os teores analisados. As amostras com 2% de óleo diesel tratadas com 10%, 20% e 30% de CBCA mostraram uma redução de 29%, 56% e 50%, respectivamente, enquanto as amostras com 8% de óleo diesel apresentaram uma redução de 37%, 61% e 51%, para 56 dias de cura.

A queda da resistência pode ser justificada pelo aumento da porosidade e índice de vazios após a adição da CBCA, uma vez que as amostras SO_2CBCA_{10} , SO_2CBCA_{20} e SO_2CBCA_{30} apresentaram um aumento de 24%, 86% e 138% no índice de vazios respectivamente, e as amostras SO_8CBCA_{10} , SO_8CBCA_{20} e SO_8CBCA_{30} apresentaram um aumento de 29%, 77% e 141% no índice de vazios respectivamente.

Através da análise por microscopia de amostras de CBCA, solo natural, SN+20%CBCA observou-se que a CBCA apresenta uma estrutura porosa e sua adição ao solo dificultou o rearranjo das partículas, apontando para o aumento de vazios e diminuição do contato entre os grãos de solo.

A respeito dos ensaios de FTIR, visualizou-se um pico no gráfico próximo ao número de onda 2800, que representa os hidrocarbonetos presente nas amostras, ao aumentar o teor de diesel verificou-se o aumento do pico, porém ao adicionar a CBCA não houve grandes alterações, mesmo para os maiores teores, demonstrando que não ocorreram reações para

diminuir os teores de óleo, o que condiz com os resultados do ensaio de cromatografia gasosa que apontam uma pequena redução dos hidrocarbonetos totais após a amostra ser tratada com 10% de CBCA.

Por fim, conclui-se que a adição da CBCA levou a diminuição da RCS das amostras conforme se aumentava o teor de cinza, esse comportamento pode ser resultado do rearranjo das partículas, e ao elevado índice de vazios, que foi observado nos parâmetros do corpo de prova e nas análises MEV, bem como devido à baixa atividade pozolânica do material utilizado, que pode ser influenciada pelo tamanho dos grãos e pH.

Visto isso, recomenda-se a moagem da cinza buscando atingir partículas menores, que poderiam ocupar os vazios, e aumentar a atividade pozolânica, também é sugerido a mistura da CBCA com outros materiais, como o cimento ou a cal, uma vez que a utilização da CBCA nessas condições inviabilizou o seu uso para tratamentos de solo contaminado.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULHAMID, S. N; HASAN, A. M; AZIZ, S. Q. Solidification/Stabilization of Contaminated Soil in a South Station of the Khurmala Oil Field in Kurdistan Region, Iraq. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167474>.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770**: Solo – Determinação da resistência a compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro, 2022.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação o limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

AHMAD, S. et al. Stabilization and Solidification of Oil-Contaminated Sandy Soil Using Portland Cement and Supplementary Cementitious Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 32, n. 8, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003169](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003169).

ALISKE, M. A. **Medidas de espectroscopia no infravermelho médio para a determinação do teor de biodiesel em óleo diesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/24912/Dissertacao_Mestrado_Marcelo_Adriano_Aliske.pdf?sequence=1. Acesso em: 10 out 2023.

ALTOÉ, S. P. S. **Estudo da potencialidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de pneus inservíveis na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 179 f. 2012. Disponível em: <http://www.peu.uem.br/SilviaAltoe.pdf>. Acesso em 10 out 2023.

AMORIM, A. F. V. de. **Química: Métodos Cromatográficos**. Fortaleza: EdUECE, 2019. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/559763/2/Livro%20M%C3%A9todos%20Cromatogr%C3%A1ficos.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

ANHESINE, M. W. et al. Use of sugar cane bagasse ash in the purification of biodiesel production from residual oils and fats. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 13720–13745, 21 fev. 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-347>.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural: 2021**. Rio de Janeiro: ANP, 2021 Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural: 2022**. Rio de Janeiro: ANP, 2022 Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/anuario-2022.pdf/view>. Acesso em: 10 out 2023.

API. American Petroleum Institute. **Fate of spilled oil in marine waters: Where does it go? What does it do? How do dispersants affect it?** Washington: API, 1999. 43 p. Disponível em: https://www.api.org/environment-health-and-safety/clean-water/oil-spill-prevention-and-response/~/_media/0c4e212c65de4a3d9c2eee1a9e604a05.ashx. Acesso em 10 out 2023.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D4972-19 - Standard Test Methods for pH of Soils**. West Conshohocken: ASTM International, 2019. Disponível em:

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/103190/eaaf32b7eb4946278c019048916f10d6/ASTM-D4972-19.pdf>. Acesso em: 10 out 2023

AZHAR, A. T. S. et al. Leachability of Arsenic (As) Contaminated Landfill Soil Stabilised by Cement and Bagasse Ash. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Batu Pahat, v. 160, n. 1, p. 012078, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012078>.

BARACHO, G. O; CORREIA, N. de S. Viabilidade de misturas de solo laterítico argiloso com cinza do bagaço da cana para construção de estradas rurais. **Revista Geama**, São Carlos, v. 7, n. 2, 2021. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/4136>. Acesso em 10 out 2023.

BEGA, R. M; Aplicação de Cinza do Bagaço de Cana-De-Açúcar em Latossolo Cultivado com Cana-De-Açúcar. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 68 f. 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/aaa07fd7-82ea-41fa-9298-bc0955900f57/content>. Acesso em: 01 jan 2024.

BERENGUER, R. A. **Estudo da durabilidade e influência da adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar nas propriedades do concreto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 122 f. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/33210/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Romildo%20Alves%20Berenguer.pdf>. Acesso em: 01 jan 2024.

BESSA, S. A. L. **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 181 f. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4184>. Acesso em: 10 out 2023.

BEZERRIL, R. H. et al. Determinação de TPF em solos contaminados por postos de combustíveis utilizando a técnica de radiação por microondas. In: XI Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 6. Florianópolis, 2011. Anais [...] Florianópolis: ABPG, 2011. Disponível em: <https://www.portalabpg.org.br/PDPetro/6/publicacoes/repositorio/trabalhos/52070520052011773.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

BHOI, A. K; MANDAL, J. N; JUNEJA, A. **Feasibility Study of Bagasse Ash as a Filling Material**. In: Hoyos, L., Shehata, H. (ed) *Advancements in Unsaturated Soil Mechanics*.

GeoMEast 2019. SUCI, pp. 81–94, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34206-7_72020

BLANKENAGEL, B. J. **Characterization of Recycled Concrete for Use as Pavement Base Material**. Provo, 2005. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Brigham Young University. Provo, 2005. Disponível em: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/640/>. Acesso em: 08 set 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução CONAMA Nº 420, de 28/12/2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

BRIZZI, R. R. et al. Avaliação macro e microestrutural de solos sob diferentes usos a partir de análises físicas, microscopia eletrônica e espectroscopia por energia dispersiva. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, Rio de Janeiro, v. 46, n. 1, p. 41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v46i1.53023>.

CANUL, J. A; MORENO, E. I; RANGEL, J. M. M. Efeito de cinzas volantes nas propriedades mecânicas de concreto feitos com agregado calcário moído de alta absorção. **Revista ALCONPAT**, Mérida, v. 6, n. 3, p. 235-247, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.150>.

CASTRO, T. R. **Argamassa mista com a cinza pesada e a cinza leve do bagaço de cana-de-açúcar: Propriedades no estado fresco e endurecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2015. Disponível em: <https://peu.uem.br/TainaraRigoti.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**. Disponível em: <https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=28e7bb2238a443819447a8ec3ae4abe5>. Acesso em: 04 de out de 2022.

CHEN, H. et al. Experimental study of the stabilization effect of cement on diesel-contaminated soil. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 50, n. 2, p. 199–205, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1144/qjegh2016-115>.

CHIARANDA, H. S. **Alterações biogeoquímicas em águas subterrâneas impactadas por biodiesel de soja e misturas de diesel/biodiesel (B20)**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 221 f. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95695>. Acesso em 12 out 2023.

CIRINO, M. A. G. et al. Caracterização e avaliação da atividade pozolânica das cinzas provenientes da queima de carvão mineral das termelétricas do Pecém, Ceará, Brasil. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. e13090, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1390>.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro**. Brasília: CNT, 2012. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/bitstream/123456789/161/1/Cartilha%20-%20Os%20impactos%20da%20m%C3%A1%20qualidade%20do%20%C3%B3leo%20diesel%20brasileiro.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

COCKE, D. L. The binding chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. **Journal of Hazardous Materials**, Beaumont, v. 24, n. 2–3, p. 231–253, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(90\)87013-8](https://doi.org/10.1016/0304-3894(90)87013-8).

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, v. 9, n. 2, p. 1-58, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 10 out 2023.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 445 f. 2006. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/150-2006/1077-guilherme-chagas-cordeiro>. Acesso em: 10 out 2023.

CORDEIRO, G. C; FILHO, R. D. T; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, Campos dos Goytacazes, v. 23, n. 10, p. 3301–3303, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>.

CRUZ, M. A. et al. Análise da viabilidade do uso de resíduos de cana-de-açúcar para produção de aglomerantes sustentáveis. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. e13113, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1313>.

DACIOLO, L. V. P; CORREIA, N. S; PORTELINHA, F. H. M. **Efeito da contaminação de óleo diesel nos parâmetros de compressibilidade de um solo laterítico**. In: I Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana, 1. São Carlos, 2017 **Anais [...]** São Carlos: SINGEORB, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325973670_EFEITO_DA_CONTAMINACAO_DE_OLEO_DIESEL_NOS_PARAMETROS_DE_COMPRESSIBILIDADE_DE_UM_SOLO_LATERITICO. Acesso em: 10 out 2023.

DAKA, M. R. **Geotechnical properties of oil contaminated soil**. Tese (MPhil em Engenharia e Ciências Físicas) – Universidade de Manchester, Manchester, 213 f. 2015. Disponível em: https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/54568047/FULL_TEXT.PDF. Acesso em: 10 out 2023.

DEVATHA, C. P; VISHNU VISHAL, A; PURNA CHANDRA RAO, J. Investigation of physical and chemical characteristics on soil due to crude oil contamination and its remediation. **Applied Water Science**, v. 9, n. 4, p. 89, jun. 2019. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0970-4>.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 3 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1087312/1/Pt2Cap1pHdosolo.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

EPA. United States Environmental Protection Agency. **EPA 3550C**. Ultrasonic Extraction. Washington: 2007. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3550c.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

EPA. United States Environmental Protection Agency. **EPA 8015B**. Nonhalogenated organics using GC/FID. Washington: 1996. Disponível em: <https://archive.epa.gov/epawaste/>

<hazard/testmethods/web/pdf/method%208015b,%20revision%202%20-%201996.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

FABBRI, G. T. P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. Tese (Doutorado em Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 176 f, 1994. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-06112012-104943/publico/GTFabbri.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

FARIA, K. C. P; GURGEL, R. F; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**: Campos dos Goytacazes, v. 101, p. 7–12, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.032>.

FERREIRA, J. W. S. et al. **Aplicabilidade de solo arenoso compactado e melhorado com cimento em pavimentos flexíveis**. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. 19. Salvador: COBRAMSEG, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/330686153>. Acesso em: 10 out 2023.

FILHO, J. H. et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DtG). **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3. 2017. DOI: 10.1590/s1517-707620170003.0207.

FILHO, P. F. **Utilização da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar na produção de materiais cimentícios alcalinamente ativados**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13980/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

FILHO, S. T; MARTINS, C. H. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na confecção de blocos de concreto para pavimentação. **RAMA**: Maringá, v. 10, n. 4. P. 1205-1224, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n4p1205-1224>.

FRANÇA, S. C. A; COUTO, H. J. B. Análise microgranulométrica - Malvern e Sedigraph. **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p.

101-122. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/1030/1/Cap%205%20Microgranulom%C3%A9trica_modif..pdf. Acesso em: 10 out 2023.

FREITAS, E. S. **Caracterização de cinza de bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 97 f. 2005. Disponível em: <https://uenf.br/cct/leciv/files/2015/01/10.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

GALLINA, A. L. et al. Obtenção e Caracterização Físico-química do Biodiesel B100 e de Misturas Biodiesel/Diesel. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 13, n. 2. P. 211-226. 2011. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/1441>. Acesso em: 08 set 2024.

GARCÉS, P. et al. The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement–modified fly ash mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 3, p. 204–210. nov. 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.006.

GOBBI, A; GROENWOLD, J. A; MEDEIROS, M. H. F. **Cinza de bagaço de cana-de-açúcar: Contribuição para a sustentabilidade dos materiais de reparo**. In: VI Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 6. Córdoba, 2010. Anais [...] Córdoba: CINPAR, 2010.

GONÇALVES, F. et al. **Caracterização Físico-Química e Mineralógica de Três Solos do Estado do Paraná**. In: XIX COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. 19. Salvador. 2018. Anais [...] Salvador: ABMS, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330686163_Caracterizacao_Fisico-Quimica_e_Mineralogica_de_Tres_Solos_do_Estado_do_Parana. Acesso em: 07 set 2024.

GOYAL, A. et al. **Properties and Reactivity of Sugarcane Bagasse ash**. Disponível em: <http://soil.en.a.utokyo.ac.jp/jsidre/search/PDFs/07/07006-35.pdf>, 2007. Acesso em: 10 out 2023.

GUEDES, P. A. P. **Avaliação dos valores orientadores de investigação para os hidrocarbonetos totais de petróleo em solos e água subterrânea de minas gerais**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020. Disponível em:

https://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2021/01/201422080161_Pedro-Augusto.pdf. Acesso em: 08 set 2024.

GUIDELI, L. C. et al. **Avaliação do Comportamento de Misturas Alternativas de Solo, Cimento e Pó de Pedra para Aplicação em Pavimentação**. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 19. Salvador, 2018. Anais [...] COBRAMSEG: Salvador: 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327405592>. Acesso em: 12 out 2023.

HASAN, H. et al. Remediation of Expansive Soils Using Agricultural Waste Bagasse Ash. **Procedia Engineering**, Sydney, v. 143, p. 1368–1375. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.161>.

HERNÁNDEZ-MENDOZA, C. E; RAMÍREZ, P. G; ALEGRÍA, O. C. Geotechnical Evaluation of Diesel Contaminated Clayey Soil. **Applied Water Sciences**, v. 11, n. 14, jul. 2021. <https://doi.org/10.3390/app11146451>.

IAT. INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Situação Atual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. In: III Seminário Sul-Brasileiro de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. 3. Porto Alegre, 2015. Anais [...]: ABES: Porto Alegre, 2015. Disponível em: https://www.abes-rs.org.br/novo/_materiais/materiais_ujld25njd4w7.pdf. Acesso em: 01 ago 2023.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320-1**: Particle size analysis — Laser diffraction methods. Geneva: 1999. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/425725874/ISO-13320-1-1999-EN-pdf#>. Acesso em: 10 out 2023.

JAMES, J; PANDIAN, P. K. A Short Review on the Valorisation of Sugarcane Bagasse Ash in the Manufacture of Stabilized/Sintered Earth Blocks and Tiles. **ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**, v. 2017, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1706893>.

JAYAKRISHNAN, V., GRACIOUS, A., SHAJU, A.C. Effect of Fly Ash on Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Soil. In: Singh, R. M., Sudheer, K.P., Kurian, B. (eds) **Advances in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering**, vol 83. Singapura: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-5644-9_15.

JÚNIOR, I. A. **Avaliação de atributos químicos em solo contaminado por compostos oriundos do petróleo (gasolina e óleo diesel)**. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Maringá, 75 f. 2012. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1463/dissertacaoilton_15688948234853_1463.pdf. Acesso em 12 out 2023.

JUNIOR, W. R. A. at. **Análise da adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento em misturas de solo-cimento**. In: XXIV CAMSIG - Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. 24. Salta, 2018. Anais [...] CAMSIG: Salta, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342121677_Analise_da_adicao_de_cinza_de_bagaco_de_cana-de-acucar_em_substituicao_parcial_ao_cimento_em_misturas_de_solo-cimento. Acesso em: 10 jun 2024.

KARABASH, Z. et al. Geotechnical Properties of Clay Soil Contaminated with Different Types of Oil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 41, n. 4, p. 2677–2689, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02420-w>.

KETROT, D; WISAWAPIPAT, W. Lead immobilisation in mining contaminated soil using biochar and ash from sugarcane. **PLANT SOIL AND ENVIRONMENT**, v. 67, n. 8, p. 474–481, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17221/57/2021-PSE>.

KHAMEHCHIYAN, M; CHARKHABI, A. H; TAJIK, M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. **Engineering Geology**, v. 89, n.3-4, p. 220–229. 2006. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.10.

KNOP, A. **Encapsulamento de Solos Contaminados por Hidrocarbonetos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_c9cba7c0370cf4e8ff3b5b1c3ab02dac. Acesso em: 10 out 2023.

LADEIRA, A. T. et al. **Caracterização física, química e mineralógica de solos típicos do Noroeste do Paraná para fins de aplicação prática em obras geotécnicas**. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul. 13. Joinville, 2019. Anais [...] Joinville: ABMS, 2019. Disponível em:

<https://conferencias.ufsc.br/index.php/geosul2019/2019geosul/paper/viewFile/435/461>.

Acesso em: 08 set 2024.

LEITE, E. C. P; SHINZATO, M. C; FREITAS, J. G. de. Princípios e aplicações de processos térmicos para remediação de áreas contaminadas. **Revista do Instituto Geológico**: São Paulo, v. 41, n. 2, p. 33–55, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33958/revig.v41i2.683>.

LIMA R. P. de. **Estabilização de solo laterítico utilizando resíduo de cana de açúcar (cinza)**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Pontífica Universidade Católica de Campinas. Campinas, 2019. Disponível em: https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/bitstream/handle/123456789/15106/ceatec_ppgsiu_me_Ricardo_PL.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10 out 2023.

LIU, Z. et al. Electrical resistivity characteristics of diesel oil-contaminated kaolin clay and a resistivity-based detection method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 11, p. 8216–8223, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3964-7>.

LOPERA, J. F. B. **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília. Brasília, 2016. DOI: <http://doi.org/10.26512/2016.06.D.21563>.

MALACARNE, S. M. **Processamento e caracterização do resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar para incorporação em compostos cimentícios**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, 2021. Disponível em: <https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/MESTRADO-DOCTORADO-CIENCIA-TECNOLOGIA-AMBIENTAL/Disserta%C3%A7%C3%B5es%20Defendidas/2021.1%20Disserta%C3%A7%C3%A3o%20mestrado%20CORRIGIDA%20ap%C3%B3s%20defesa.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

MANSANEIRA, E. C. **Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – UEL. Londrina, 2010. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/download/cp145728.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

MARTINS, C. V. M; **Análise Granulométrica e Distribuição dos Parâmetros e Forma e Textura de Areias Através do Processamento de Imagens Digitais**. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Civil) – Universidade do Porto. Porto, 2020. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/130024/2/428583.pdf>. Acesso em: 10 ago 2024.

MATOS, W. E. de C. et al. Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. **Matéria**: Teresina, v. 26, n. 4. 2021, 20 p. DOI: doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1322

MELCHERT, M. B. M. **Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.3.2012.tde-03042013-160220>

MENDES, I. S; CORREIA, N. de S; PORTELINHA, F. H. M. **Efeito do encapsulamento com cal na plasticidade e resistência à compressão uniaxial de um solo areno-argiloso contaminado com óleo diesel**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327272929_Efeito_do_encapsulamento_com_cal_na_plasticidade_e_resistencia_a_compressao_uniaxial_de_um_solo_areno-argiloso_contaminado_com_oleo_diesel. Acesso em: 10 out 2023.

MENDES, I. S; CORREIA, N. de S; PORTELINHA, F. H. M. **Propriedades geotécnicas de um solo laterítico contaminado com óleo**. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. 10. São Carlos: 2019. Anais [...] São Carlos: ABMS, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335277398_Propriedades_geotecnicas_de_um_solo_lateritico_contaminado_com_oleo_diesel_e_estabilizado_com_cal. Acesso em: 10 out 2023.

MENEGHETTI, L. R. R. **Biorremediação na descontaminação de um solo residual de basalto contaminado com óleo diesel e biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2007. 112p. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/246>. Acesso em: 10 out 2023.

MOREIRA, J. R; GOLDEMBERG, J. The alcohol program. **Energy Policy**, v. 27, n. 4, p. 185–245, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(99\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(99)00005-1).

MUSTAFA, Y. M. H. et al. Utilization of Portland cement with limestone powder and cement kiln dust for stabilization/solidification of oil-contaminated marl soil. **Environmental Science**

and Pollution Research, v. 28, n. 3, p. 3196–3216, jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10590-w>.

NASCIMENTO, R. F. do. et al. **Cromatografia gasosa: aspectos teóricos e práticos**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/330689029>. Acesso em: 10 out 2023.

NEW YORK STATE. Department of Environmental Conservation. ***Petroleum-contaminated Soil Guidance Policy***. Albany, 2010. Disponível em: <https://www.dec.ny.gov/regulations/30902.html>. Acesso em: 10 out 2023.

NUNES, I. H. S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2009. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3561/1/000210658.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

OLIVEIRA, D. M. de. **Aplicação da técnica de solidificação/estabilização para resíduos oleosos da indústria petrolífera, utilizando solo argiloso e bentonita**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/86162>. Acesso em: 10 out 2023.

PAPINI, C. J. **Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/teses/22862.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

PARANÁ. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Turismo. **Resolução SEDEST n. 003 de 17 de janeiro de 2020**. Dispõe sobre o Licenciamento Ambiental, estabelece condições e critérios para Posto Revendedor, Posto de Abastecimento, Instalação de Sistema Retalhista de Combustível - TRR, Posto Flutuante, Base de Distribuição de Combustíveis e dá outras providências. Diário Oficial do Estado, 24 jan. 2020.

PEREZ, I. A. **Avaliação do potencial de encapsulamento de um solo contaminado com cloreto de zinco através da adição de cal e cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro, 2017. DOI: 10.17771/PUCRio.acad.31398.

PORTELINHA, F. H. M. et al. Geotechnical Properties and Microstructure of a Diesel Contaminated Lateritic Soil Treated with Lime. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 30, n.7, p. 838–861, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2021.1893648>.

RAHMAN, Z. A. et al. Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil. **American Journal of Applied Sciences**, v. 7, n. 7, p. 954-961, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.954.961>.

REDDY, K. R; ADAMS, J. A; RICHARDSON, C. Potential Technologies for Remediation of Brownfields. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 3, n. 2, p. 61–68, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(1999\)3:2\(61\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(1999)3:2(61)).

RIOS, A. V. do N. G. **Uso potencial da etringita obtida no tratamento de efluentes industriais em aplicações geotécnicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2022. Disponível em: <http://www.pcv.uem.br/documentos/dissertacao-de-mestrado/angelica-vinci-dissertacao.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

ROJAS, J. W. J. **Estudo de remediação de solo contaminado por borra oleosa ácida utilizando a técnica de encapsulamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 150 f. 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10696/000600020.pdf?sequence=1&locale=en>. Acesso em: 10 out 2023

SADEEQ, J; OCHEPO, J; SALAHUDEEN, A. Assessment of Bagasse Ash Effect on the California Bearing Ratio of Used Oil Contaminated Lateritic Soils. **Nigerian Journal of Technology**, v. 34, n. 2, p. 223, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4314/njt.v34i2.2>.

SAFEHIAN, H; RAJABI, A. M; GHASEMZADEH, H. Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. **Engineering Geology**, v. 241, p. 55–63, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.020>.

SALES, A; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v. 30, n. 6, 1114–1122. 2010. DOI: [10.1016/j.wasman.2010.01](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01)

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 161 f. 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9LEFBP>. Acesso em: 08 set 2024.

SALMAZO, P. S. **Biorremediação de solo e água contaminados por solventes aromáticos provenientes de combustíveis**. Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) Universidade de Sorocaba. Sorocaba, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uniso.br/server/api/core/bitstreams/b5b0ee0b-2f91-4e15-99a1-6a4fd6ccb267/content>. Acesso em: 08 set 2024.

SANCHES, V. L. **Remediação de solos da formação São Paulo contaminados por vapores de gasolina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2009.tde-15092009-161203>.

SANTOS, M. C. B. **Avaliação da contaminação por arsênio em solos, sedimentos e águas fluviais na região da Mina De Ouro “Morro Do Ouro”, Paracatu- MG**. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2015. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/1530>. Acesso em: 30 jul 2024.

SGUAREZI, F. F. **Avaliação do efeito da adição de etringita produzida a partir do tratamento de efluente industrial no comportamento expansivo e na microestrutura de misturas de solo cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2022.

SHAH, S. J. et al. Stabilization of fuel oil contaminated soil - A case study. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 21, n. 4, p. 415–427, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.1a>

SHIRAISHI, I. S. Mapeamento da contaminação por postos de combustíveis na cidade de Londrina – PR. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v 12, n. 4, p. 291-305. 2020. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/17013/209209213909>. Acesso em: 08 set 2024.

SILVA, E. J. da. et al. Avaliação por análise de DRX da influência do beneficiamento de moagem na atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **Matéria:** Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p. 12497, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0822>.

SILVA, J. W. B. da; CORREIA, N. de S. **Efeito da contaminação por combustíveis nos parâmetros de compactação de solos tropicais – Uma análise comparativa dos resultados com a Microscopia Eletrônica de Varredura.** In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. 19. Salvador, 2018. Anais [...] Salvador: COBRAMSEG, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327272868_Efeito_da_contaminacao_por_combustiveis_nos_parametros_de_compactacao_de_solos_tropicais__Uma_analise_comparativa_dos_resultados_com_a_Microscopia_Eletronica_de_Varredura#fullTextFileContent. Acesso em: 10 out 2023.

SIQUEIRA, M. de J; MACHADO, D. D. do N. **Estudo da viabilidade da utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de solo cimento para camadas de pavimento.** In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. 32. Gramado, 2018. Anais [...] Gramado: ANPET, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344160663_ESTUDO_DA_VIABILIDADE_DA_UTILIZACAO_DAS_CINZAS_DO_BAGACO_DA_CANA-DE-ACUCAR_EM_MISTURAS_DE_SOLO_CIMENTO_PARA_CAMADAS_DE_PAVIMENTO. Acesso em: 10 out 2023.

SKOOG, D. A; HOLLER, F. J; CROUCH, S. R. *Princípios de análise instrumental*. 6 ed. Cengage Learning: Santa Fe, 2007.

SOBRAL, L. F. et al. **Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo.** Aracaju: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

SPADOTTO, C. A; RIBEIRO, W. C. **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria.** Botucatu: FEPAF, 2006. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/administracao/agroindustria/livros/GESTAO%20DE%20RESIDUOS%20NA%20AGRICULTURA%20E%20AGROINDUSTRIA.pdf>. Acesso em: 10 out 2023.

TAJUDIN, S. A. et al. Utilization of sugarcane bagasse ash for Stabilization / Solidification of lead-contaminated soils. **Jurnal teknologi**, Johor Bahru, v. 77, n. 11, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6430>.

TAVARES, S. R. de L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos**. Joinville: Clube de Autores, 2013. p. 61-90.

USACE. U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS. Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material. **Technical Letter N° 1110-1158**. Washington, 1995. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA403053.pdf>. Acesso em: 08 set 2024.

VICTORIA BRASIL. **Victória Brasil Empreendimentos**. Página Inicial. Disponível em: <https://victoriabrasilemp.com.br>. Acesso em: 10 out 2023.

WILES, C. C. A review of solidification/stabilization technology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 14, n. 1, p. 5–21, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(87\)87002-4](https://doi.org/10.1016/0304-3894(87)87002-4).

ZARDO, A. M. et al. Utilização da cinza de bagaço da cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 10. São Paulo, 2004. Anais [...] São Paulo: ENTAC, 2004. Disponível em: https://www.usp.br/constrambi/producao_arquivos/utilizacao_da_cinza_de_bagaco.pdf. Acesso em: 08 set 2024.

ANEXO A: BOLETIM DE ANÁLISE DO ÓLEO



Universidade Estadual de Maringá
Programa de Ensino, Pesquisa e Desenvolvimento em
Combustíveis
Laboratório de Análise de Combustíveis



BOLETIM DE ANÁLISE
Nº 897/2023
ÓLEO DIESEL- B12 S500
 Resolução ANP Nº 50, de 23.12.2013
 Regulamento Técnico ANP Nº 4/2013

Razão Social: Raizen S.A./ Maringá		CNPJ: 33.453.598/0131-01	
Razão Social: Vibra Energia/ Maringá		CNPJ: 34.274.233/0259-48	
Endereço: Av. Prefeito Sincler Sambati 1007, Jardim Bertioga, CEP 87055-405- Maringá- PR			
Produto: Mistura Óleo Diesel- B12 S500	Data da coleta: 31-08-2023	Local de coleta: Base Maringá Tanque 101 Óleo Diesel S500 Tanque 108 Biodiesel	UF: PR
Classificação do produto: Óleo Diesel- B12 S500		Volume: 1.177,563	Lacre: 1281451

Observações:
 A amostra foi entregue pelo cliente no Laboratório de Análise de Combustíveis da UEM em 01-09-2023.
 Os ensaios foram realizados no dia 01-09-2023.
 Os resultados deste boletim referem-se à amostra conforme recebida, não implicando, portanto, em nenhuma garantia quanto à coleta e procedência do produto que são de total responsabilidade do cliente.
 Recomendamos ao Revendedor varejista, no ato da descarga acompanhada, a análise dos combustíveis recebidos conforme resolução nº 9, de 07 de março de 2007.

Característica (*)	Unidade	Resultado	Especificação (*) B S 500	Método
Aspecto visual	—	L11	L11(1)	Visual
Cor visual	—	Avermelhado	(2)	Visual
Ponto de Fulgor	°C	43,5	38 (mín)	NBR 7974
Massa Específica a 20°C	kg/m³	844,3	815,0 a 865,0	NBR 7148
Condutividade elétrica	pS/m	189	25 (mín)	D2624/D4308
Teor de água (máx.)	mg/kg	171	500	D6304

(1) Limpido e Isento de Impurezas.
 (2) Conforme disposto no art. 11, da Resolução nº 65 de 9.12.2011:
 a- A partir de 1º de julho de 2012, "vermelho" para o óleo diesel S 500.
 b- O corante vermelho deve ser adicionado de forma tal que seu teor na mistura seja de 20 mg/L.

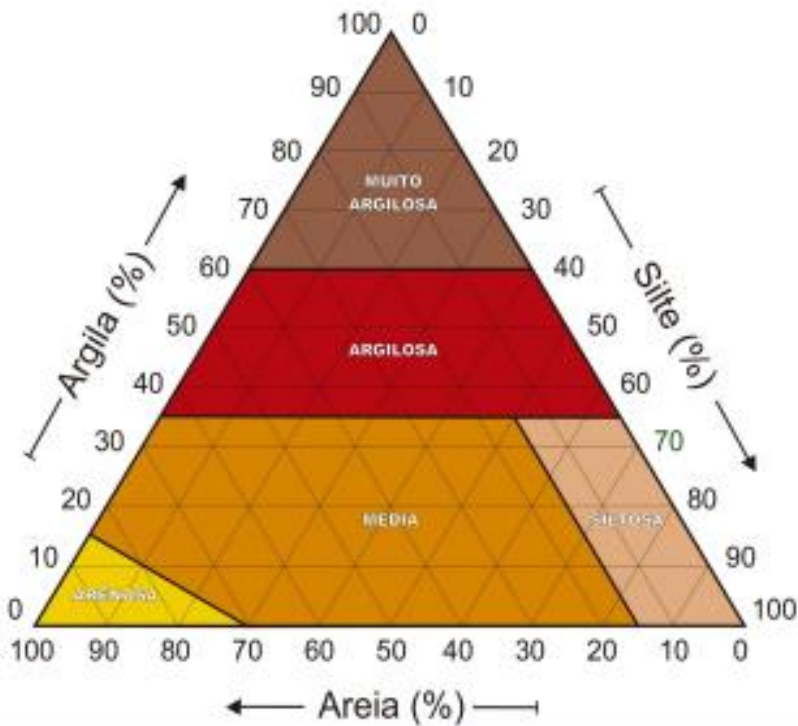
ANEXO B: ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLO

 AgriSolum ANÁLISES AGRONÔMICAS		Avenida Dr. Mário Cláudio Urbanick, 1151 Jardim Canadá CEP 87.080-120 Maringá - PR Tel: (44)3252-9565 E-mail: contato@agrisolum.com.br www.agrisolum.com.br		CHAVE DE ACESSO 16c7925d41	
SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7143	Nº DO LAUDO	2960/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PROPRIEDADE - JULIANA				
MUNICÍPIO / UF	Mandaguapé - PR	DATA ENTRADA	25/08/2023	DATA SAÍDA	30/08/2023
MATRÍCULA				ÁREA	0 ha
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 1			PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLO

%					CLASSIFICAÇÃO	TEXTURA
AREIA GROSSA	AREIA FINA	AREIA TOTAL	SILTE	ARGILA		
22	52	74	2	24	Tipo 1 (MAPA - IN nº02 de 09/10/2006)	Media

TRIÂNGULO DAS CLASSES TEXTURAIS DE SOLO



O triângulo das classes texturais de solo é um diagrama usado para classificar solos com base na porcentagem de areia, silte e argila. O eixo da esquerda representa a porcentagem de argila (0% na base até 100% no topo). O eixo da direita representa a porcentagem de silte (0% na base até 100% no topo). O eixo da base representa a porcentagem de areia (100% à esquerda até 0% à direita). As regiões são classificadas da seguinte forma:

- Muito Argilosa:** Acima de 60% de argila.
- Argilosa:** Entre 40% e 60% de argila.
- Silteosa:** Entre 40% e 60% de silte.
- Média:** Entre 20% e 40% de argila e 20% e 40% de silte.
- Arenosa:** Abaixo de 20% de argila e 20% de silte.

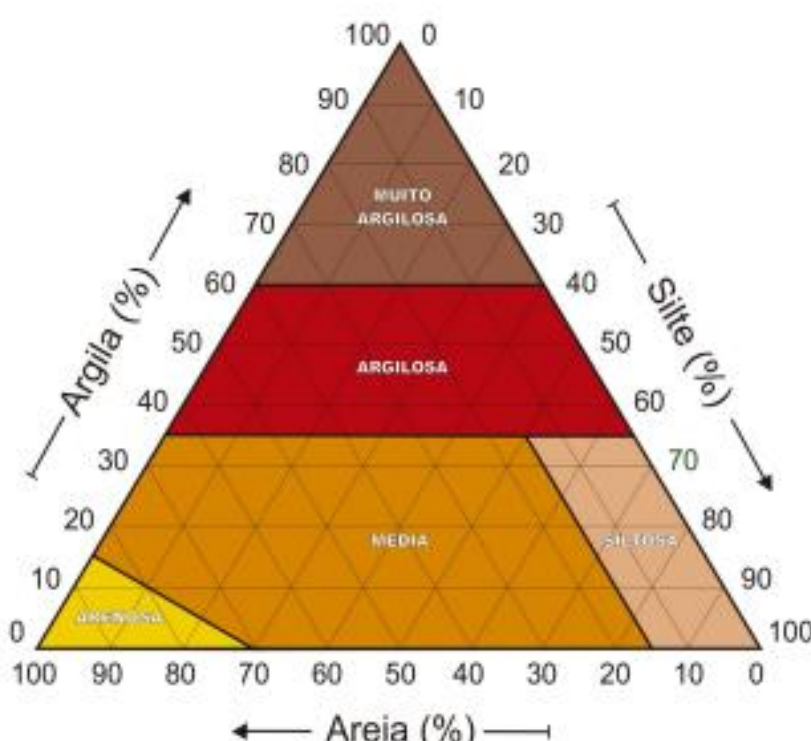
OBSERVAÇÃO 	ASSINATURA  Eng. Agr. Sirlene Lemes de Souza PR-71818/D Responsável Técnico
--	---

 AgriSolum <small>ANÁLISES AGRONÔMICAS</small>		Avenida Dr. Mário Clapier Urbino, 1181 Jardim Canadá CEP 87.080-120 Maringá - PR Tel: (44)3262-9585 E-mail: contato@agrisolum.com.br www.agrisolum.com.br		CHAVE DE ACESSO 16c7925d41	
SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7144	Nº DO LAUDO	2960/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PROPRIEDADE - JULIANA				
MUNICÍPIO / UF	Mandaguapé - PR	DATA ENTRADA	25/08/2023	DATA SAÍDA	30/08/2023
MATRÍCULA				ÁREA	0 ha
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 2			PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLO

%					CLASSIFICAÇÃO	TEXTURA
ÁREA GROSSA	ÁREA FINA	ÁREA TOTAL	SILTE	AREIA		
20	54	74	2	24	Tipo 1 (MAPA - IN nº02 de 09/10/2008)	Media

TRIÂNGULO DAS CLASSES TEXTURAIS DE SOLO



The diagram is a ternary plot with vertices representing 100% of a component. The top vertex is 100% Argila (Clay), the bottom-left is 100% Areia (Sand), and the bottom-right is 100% Silte (Silt). The plot is divided into several regions: 'MUITO ARGILOSA' (Very Clayey) at the top, 'ARGILOSA' (Clayey) below it, 'MEDIA' (Medium) in the center, 'SILTOSA' (Silty) on the right, and 'ARENOSA' (Sandy) on the left. The boundaries are defined by lines representing specific percentage thresholds of each component.

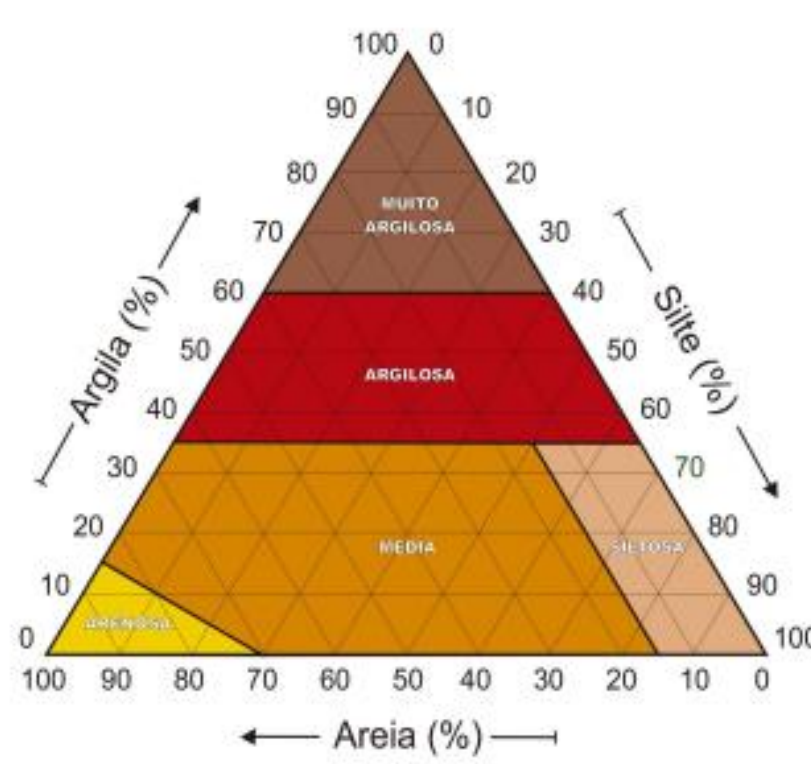
OBSERVAÇÃO		ASSINATURA	
		 Eng. Agr. Simone Lemes de Souza PR-71818/D Responsável Técnico	

 AgriSolum ANÁLISES AGRONÔMICAS		Avenida Dr. Mano Cláudio Urbini, 1181 Jardim Canadá CEP 87.080-120 Maringá - PR Tel: (44)3262-9565 E-mail: contato@agnsolum.com.br www.agnsolum.com.br		CHAVE DE ACESSO 16c7925d41	
SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7145	Nº DO LAUDO	2960/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PROPRIEDADE - JULIANA				
MUNICÍPIO / UF	Mandaguapé - PR	DATA ENTRADA	25/08/2023	DATA SAÍDA	30/08/2023
MATRÍCULA		ÁREA	0 ha		
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 3			PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLO

%					CLASSIFICAÇÃO	TEXTURA
ÁREA GROSSA	ÁREA FINA	ÁREA TOTAL	SILTE	ARGILA		
23	51	74	3	23	Tipo 1 (MAPA - IN nº02 de 09/10/2006)	Media

TRIÂNGULO DAS CLASSES TEXTURAIS DE SOLO



The diagram is a ternary plot with vertices representing 100% of a component: Argila (%) at the top, Silte (%) at the bottom right, and Areia (%) at the bottom left. The plot is divided into several regions: 'MUITO ARGILOSA' (top), 'ARGILOSA' (upper middle), 'ARGILOSA' (middle), 'MEDIA' (lower middle), 'SILTOSA' (lower right), and 'ARENILOSA' (bottom left). The axes are marked from 0 to 100 in increments of 10.

OBSERVAÇÃO		ASSINATURA	
		 Eng. Agr. Simone Lemes de Souza PR-71815/D Responsável Técnico	

 AgriSolum ANÁLISES AGRONÔMICAS		Avenida Dr. Mano Cláudio Urbanini, 1181 Jardim Canadá CEP 87.080-120 Maringá - PR Tel: (44)3262-9580 E-mail: contato@agrisolum.com.br www.agrisolum.com.br		CHAVE DE ACESSO 16c7925d41	
SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7143	Nº DO LAUDO	2960/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PROPRIEDADE - JULIANA				
MUNICÍPIO / UF	Mandaguaçu - PR	DATA ENTRADA	25/08/2023	DATA SAÍDA	30/08/2023
MATRÍCULA		ÁREA	0 ha		
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 1			PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE QUÍMICA DE SOLO

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	RESULTADO	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
pH em CaCl ₂	4,00					
pH em H ₂ O	4,30					
C (g dm ⁻³)	1,42					
MO (%)	0,24					

MACRONUTRIENTES

ELEMENTOS	cmol/dm ³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Cálcio (Ca ²⁺)	0,10					
Magnésio (Mg ²⁺)	0,06					
Potássio (K)	0,02					
	mg dm ⁻³					
Fósforo (P)	0,09					
Enxofre (S)	ns					

MICRONUTRIENTES

ELEMENTOS	mg dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Boro (B)	ns					
Cobalto (Co)	0,78					
Ferro (Fe)	41,64					
Manganês (Mn)	6,42					
Zinco (Zn)	4,56					

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	cmol/dm ³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
SB	0,18					
CTC	3,11					
CTC efetiva	0,99					
Acidez Potencial (H + Al)	2,93					
Acidez Não-Trocável (H ⁺)	2,12					
Acidez Trocável (Al ³⁺)	0,81					

ÍNDICES DE SATURAÇÃO

Ca %	3,22
Mg %	1,93
K %	0,64
H %	68,17
Al %	81,82
S %	5,79



LEGENDA
 FOLGORADO
 LIMITE DE TOLERÂNCIA
 DEFICIÊNCIA
 EXCESSIVO

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO

mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
ns	ns	ns	ns
P-rem	Fósforo	Enxofre	Zinco

ASSINATURA



Eng. Agr. Sérgio Lemes de Souza
 Responsável Técnico

OBSERVAÇÃO

MB= Muito Baixo; B= Baixo; M= Médio; A= Alto e MA= Muito Alto.
 - Determinações Analíticas: Mehlich 1: K, P, Cu, Fe, Mn e Zn; KCl 1 M: Al, Ca e Mg; SMP: H + Al; Água quente: S; Fosfato de Cálcio Monobásico: S; Walkley-Black: C. - Os valores analíticos referem-se a amostra disponibilizada pelo interessado.



AgriSolum
ANÁLISES AGRONÔMICAS

Avenida Dr. Mario Clapier Urbiniari, 1181 | Jardim Canada,
CEP 87.080-120 | Maringá - PR | Tel: (44)3262-9569
E-mail: contato@agrisolum.com.br | www.agrisolum.com.br

CHAVE DE ACESSO
16c7925d41

SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7144	Nº DO LAUDO	2960/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PROPRIEDADE - JULIANA				
MUNICÍPIO / UF	Mandaguapé - PR	DATA ENTRADA	25/08/2023	DATA SAÍDA	30/08/2023
MATRÍCULA		ÁREA	0 ha		
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 2			PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE QUÍMICA DE SOLO

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	RESULTADO	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
pH em CaCl ₂	4,00					
pH em H ₂ O	4,50					
C (g dm ⁻³)	1,71					
MO (%)	0,30					

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	mmol/dm ³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
SB	0,21					
CTC	4,52					
CTC efetiva	1,02					
Acidez Potencial (H + Al)	4,31					
Acidez Não-Trocatel (H ⁺)	3,50					
Acidez Trocatel (Al ³⁺)	0,81					

MACRONUTRIENTES

ELEMENTOS	mmol/dm ³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Cálcio (Ca ²⁺)	0,12					
Magnésio (Mg ²⁺)	0,07					
Potássio (K ⁺)	0,02					
	mg/dm ³					
Fósforo (P)	0,09					
Enxofre (S)	ns					

MICRONUTRIENTES

ELEMENTOS	mg/dm ³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Boro (B)	ns					
Cobalto (Co)	0,84					
Ferro (Fe)	40,32					
Manganês (Mn)	6,60					
Zinco (Zn)	0,42					

ÍNDICES DE SATURAÇÃO

Ca %	2,65
Mg %	1,55
K %	0,44
H %	77,43
Al %	79,41
V %	4,65



LEGENDA

EQUILIBRADO

LIMITE DE TOLERÂNCIA

DESBILITADO

EXCESSIVO

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO

mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
ns	ns	ns	ns
P-rem	Fósforo	Enxofre	Zinco

ASSINATURA



Eng. Agr. Simone Lopes de Souza

Responsável Técnico

OBSERVAÇÃO

MB= Muito Baixo; B= Baixo; M= Médio; A= Alto e MA= Muito Alto.

- Determinações Analíticas: Mehlich 1: K, P, Cu, Fe, Mn e Zn; KCl 1 M: Al, Ca e Mg; SMP: H + Al; Água quente: S; Fosfato de Cálcio Monobásico: S; Walkley-Black: C. - Os valores analíticos referem-se a amostra disponibilizada pelo interessado.



 AgriSolum ANÁLISES AGRONÔMICAS		Avenida Dr. Mano Cagler Urbanelli, 1181 Jardim Canadá CEP: 87.080-120 Maringá - PR Tel: (44)3262-9560 E-mail: contato@agrisolum.com.br www.agrisolum.com.br		CHAVE DE ACESSO 16c7925d41	
SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7145	Nº DO LAUDO	2960/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PROPRIEDADE - JULIANA				
MUNICÍPIO / UF	Mandaguapé - PR	DATA ENTRADA	25/08/2023	DATA SAÍDA	30/08/2023
MATRÍCULA		ÁREA	0 ha		
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 3			PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE QUÍMICA DE SOLO

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	RESULTADO	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
pH em CaCl ₂	4,00					
pH em H ₂ O	4,50					
C (g dm ⁻³)	1,42					
NO (%)	0,24					

MACRONUTRIENTES

ELEMENTOS	cmol/dm ³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Cálcio (Ca ²⁺)	0,12					
Magnésio (Mg ²⁺)	0,08					
Potássio (K ⁺)	0,03					
	mg dm ⁻³					
Fósforo (P)	0,18					
Enxofre (S)	ns					

MICRONUTRIENTES

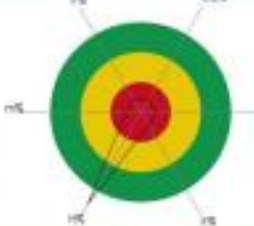
ELEMENTOS	mg dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Boro (B)	ns					
Cobalto (Co)	1,02					
Ferro (Fe)	50,10					
Manganês (Mn)	7,92					
Zinco (Zn)	0,60					

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	cmol/dm ³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
SB	0,23					
CTC	3,48					
CTC efetiva	1,10					
Acidez Potencial (H + Al)	3,25					
Acidez Não-Trocável (H ⁺)	2,38					
Acidez Trocável (Al ³⁺)	0,87					

ÍNDICES DE SATURAÇÃO

Ca %	3,45
Mg %	2,30
K %	0,86
H %	68,39
Na %	79,09
S %	6,61



LEGENDA
 EQUILIBRADO
 LIMITE DE TOLERÂNCIA
 DESDEQUILIBRIO
 EXCESSIVO

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO

mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
ns	ns	ns	ns
P-rem	Fósforo	Enxofre	Zinco

ASSINATURA



Eng. Agr. Sérgio Lemes de Souza
 Responsável Técnico

OBSERVAÇÃO

MB= Muito Baixo; B= Baixo; M= Médio; A= Alto e MA= Muito Alto.
 - Determinações Analíticas: Mehlich 1: K, P, Cu, Fe, Mn e Zn; KCl 1M: Al, Ca e Mg; SMP: H + Al; Água quente: B; Fosfato de Cálcio Monobásico: S; Walkley-Black: C. - Os valores analíticos referem-se a amostra disponibilizada pelo interessado.



ANEXO C: RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO CHAPELLE MODIFICADO,

**RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO
CHAPELLE MODIFICADO**

Prezada Juliana Azoia Lukiantchuki,

Em conformidade com a NBR 15895/2010 Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado, seguem os resultados:

$IAP_1 = 480,48 \text{ mg Ca(OH)}_2/\text{g de pozolana}$

$IAP_2 = 517,44 \text{ mg Ca(OH)}_2/\text{g de pozolana}$

$IAP_{\text{médio}} = 498,96 \pm 18,48 \text{ mg Ca(OH)}_2/\text{g de pozolana}$

Porto Alegre, 06 de setembro de 2023.

Lucas Goldenberg Py
Responsável Técnico

Ana Paula Kirchheim
Coordenadora

ANEXO D: RELATÓRIO CROMATOGRAFIA GASOSA



RELATÓRIO DE ENSAIO - nº 106503

Cliente: JULIANA LUKIANTCHUKI
Endereço: RUA BARROSO, 780
Cidade: MARINGÁ/PR

Dados da Amostra

Identificação: Solo Natural + 8% Óleo Diesel
Recebimento: 20/11/2023 às 16:07 H.

Dados da Coleta

Responsável: Interessada. Dados fornecidos pelo Cliente.

RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS

Parâmetro Método/Norma	Resultado/Unidade	Limites Data do Ensaio
Hidrocarbonetos Totais Cromatografia Gasosa com Detector de Ionização de Chama (CG-FID)	601,0 ppm	1,1 ppm (*LD) 22/11/2023

(*LD) = Limite de Detecção

COMENTÁRIO TÉCNICO

Equipamento: Várian GC 450; Coluna: ZB1 (30m, 0,25mm, 0,25um) ; Temperatura Inicial da coluna: 50 °C; Hold Time: 5,00 min; Temperatura Final da Coluna: 300 °C; Rate in °C/min: 20 °C / min; Time Hold: 22,50 min; Tempo Total: 40,00 min; Temperatura do Injetor: 280°C; Temperatura do Detector: 320°C; Range: 12; Fluxo de Nitrogênio: 1,5 mL.

Porto Alegre, 23 de novembro de 2023.

Marina Chiochetta
CRF-RS 9244

Conferência Eletrônica

Os resultados acima se referem somente a amostra ensaiada.
As análises foram realizadas nas Instalações do Laboratório Pró-Ambiente.
Na declaração da conformidade, o Laboratório não considerou a incerteza de medição.
Este relatório de ensaio só pode ser reproduzido na sua íntegra. A reprodução parcial somente com autorização do emitente.



RELATÓRIO DE ENSAIO - nº 106504

Cliente: JULIANA LUKIANTCHUKI
Endereço: RUA BARROSO, 780
Cidade: MARINGÁ/PR

Dados da Amostra

Identificação: Solo + 8% Óleo + 5% Cinza
Recebimento: 20/11/2023 às 16:07 H.

Dados da Coleta

Responsável: Interessada. Dados fornecidos pelo Cliente.

RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS

Parâmetro Método/Norma	Resultado/Unidade	Limites Data do Ensaio
Hidrocarbonetos Totais Cromatografia Gasosa com Detector de Ionização de Chama (CG-FID)	478,4 ppm	1,1 ppm (*LD) 22/11/2023

(*LD) = Limite de Detecção

COMENTÁRIO TÉCNICO

Equipamento: Várian GC 450; Coluna: ZB1 (30m, 0,25mm, 0,25um) ; Temperatura Inicial da coluna: 50 °C; Hold Time: 5,00 min; Temperatura Final da Coluna: 300 °C; Rate in °C/min: 20 °C / min; Time Hold: 22,50 min; Tempo Total: 40,00 min; Temperatura do Injetor: 280°C; Temperatura do Detector: 320°C; Range: 12; Fluxo de Nitrogênio: 1,5 mL.

Porto Alegre, 23 de novembro de 2023.

Marina Chiochetta
CRF-RS 9244

Conferência Eletrônica

Os resultados acima se referem somente a amostra ensaiada.

As análises foram realizadas nas Instalações do Laboratório Pró-Ambiente.

Na declaração da conformidade, o Laboratório não considerou a incerteza de medição.

Este relatório de ensaio só pode ser reproduzido na sua íntegra. A reprodução parcial somente com autorização do emitente.



RELATÓRIO DE ENSAIO - nº 106505

Cliente: JULIANA LUKIANTCHUKI
Endereço: RUA BARROSO, 780
Cidade: MARINGÁ/PR

Dados da Amostra

Identificação: Solo + 8% Óleo + 10% Cinza
Recebimento: 20/11/2023 às 16:07 H.

Dados da Coleta

Responsável: Interessada. Dados fornecidos pelo Cliente.

RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS

Parâmetro	Resultado/Unidade	Limites
Método/Norma		Data do Ensaio
Hidrocarbonetos Totais	500,9 ppm	1,1 ppm (*LD)
Cromatografia Gasosa com Detector de Ionização de Chama (CG-FID)		22/11/2023

(*LD) = Limite de Detecção

COMENTÁRIO TÉCNICO

Equipamento: Várian GC 450; Coluna: ZB1 (30m, 0,25mm, 0,25µm) ; Temperatura Inicial da coluna: 50 °C; Hold Time: 5,00 min; Temperatura Final da Coluna: 300 °C; Rate in °C/min: 20 °C / min; Time Hold: 22,50 min; Tempo Total: 40,00 min; Temperatura do Injetor: 280°C; Temperatura do Detector: 320°C; Range: 12; Fluxo de Nitrogênio: 1,5 mL.

Porto Alegre, 23 de novembro de 2023.

Marina Chiochetta
CRF-RS 9244

Conferência Eletrônica

Os resultados acima se referem somente a amostra ensaiada.

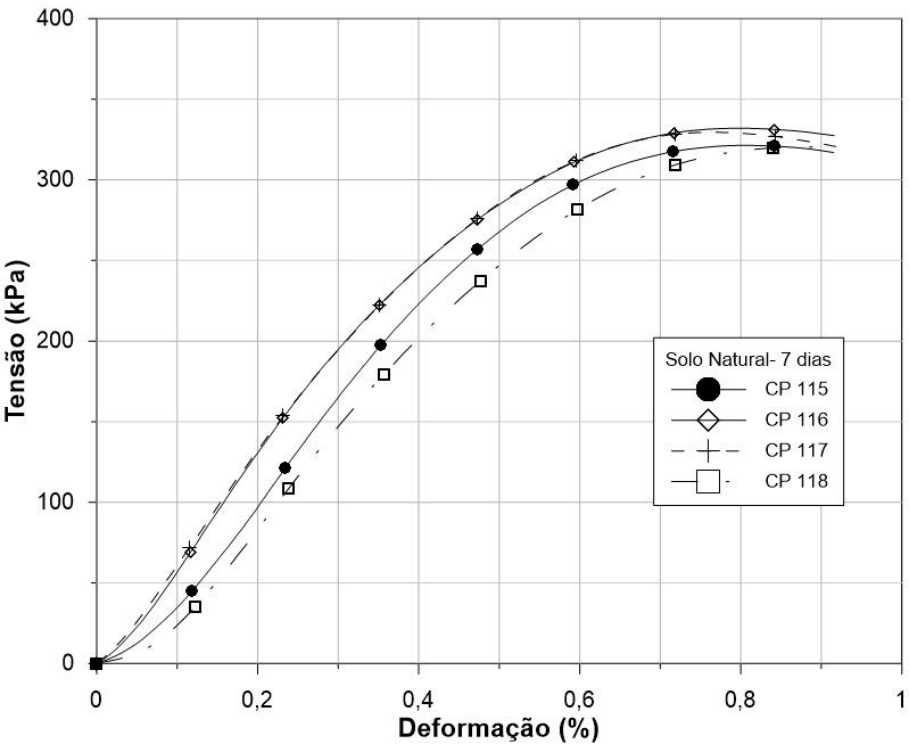
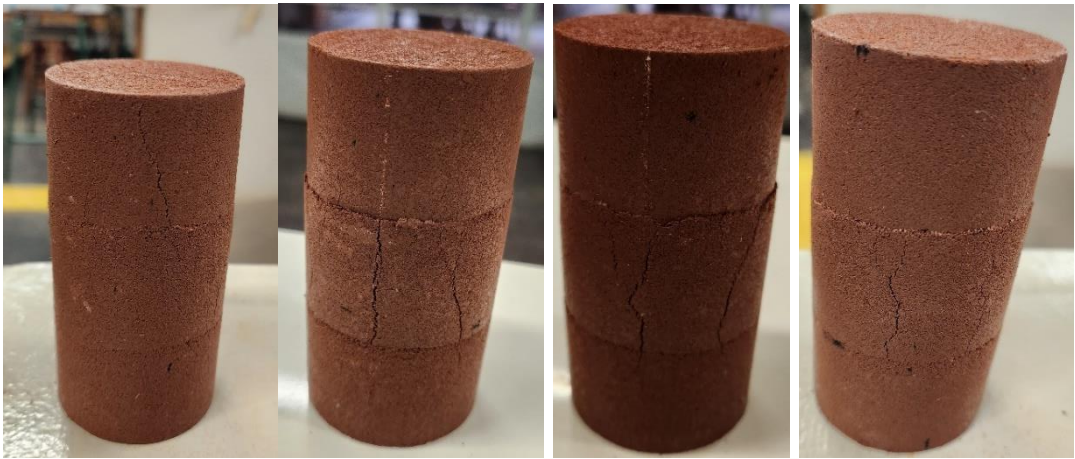
As análises foram realizadas nas Instalações do Laboratório Pró-Ambiente.

Na declaração da conformidade, o Laboratório não considerou a incerteza de medição.

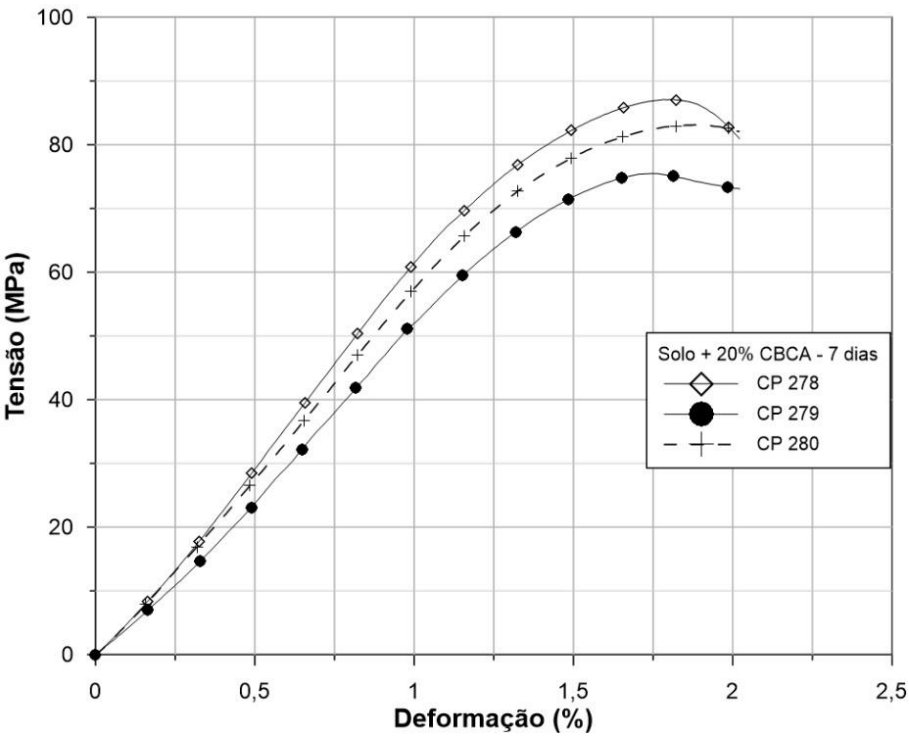
Este relatório de ensaio só pode ser reproduzido na sua íntegra. A reprodução parcial somente com autorização do emitente.

ANEXO E: RESULTADOS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

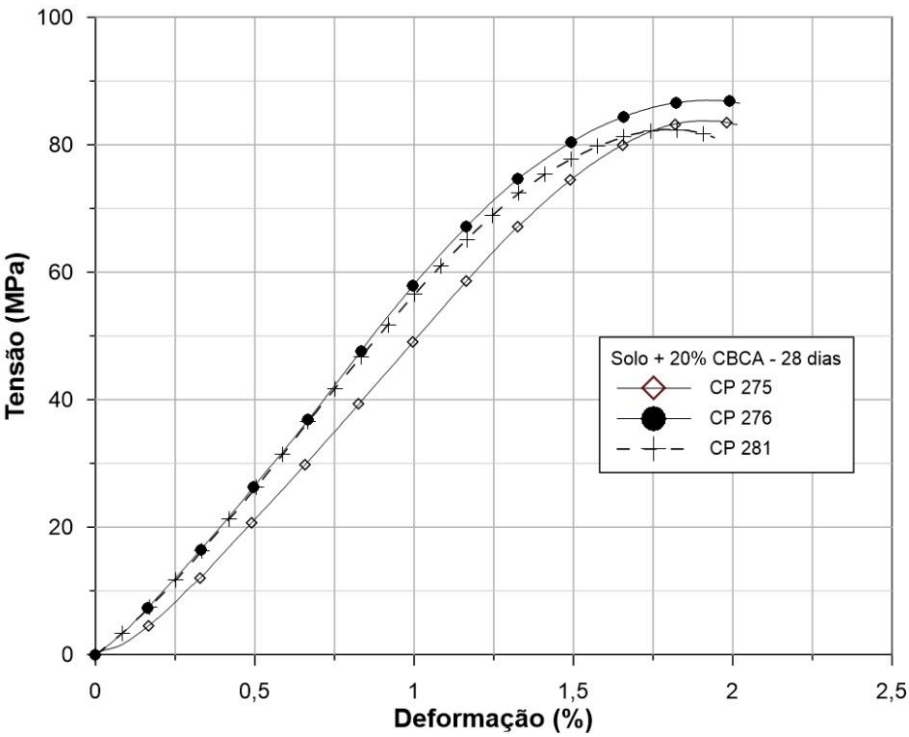
SOLO NATURAL											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
115	7 dias	9,59%	-0,41%	1,837	98,8%	0,43	58,4%	30,15%	321,43	5,79	1,78
116	7 dias	9,63%	-0,37%	1,868	100,5%	0,41	62,2%	28,95%	332,06		
117	7 dias	9,80%	-0,20%	1,869	100,5%	0,41	63,3%	28,95%	329,55		
118	7 dias	9,96%	-0,04%	1,863	100,2%	0,41	63,6%	29,17%	320,47		
Média		9,75 %	-0,25 %	1,859	100,0%	0,41	61,9%	29,31%	325,88		



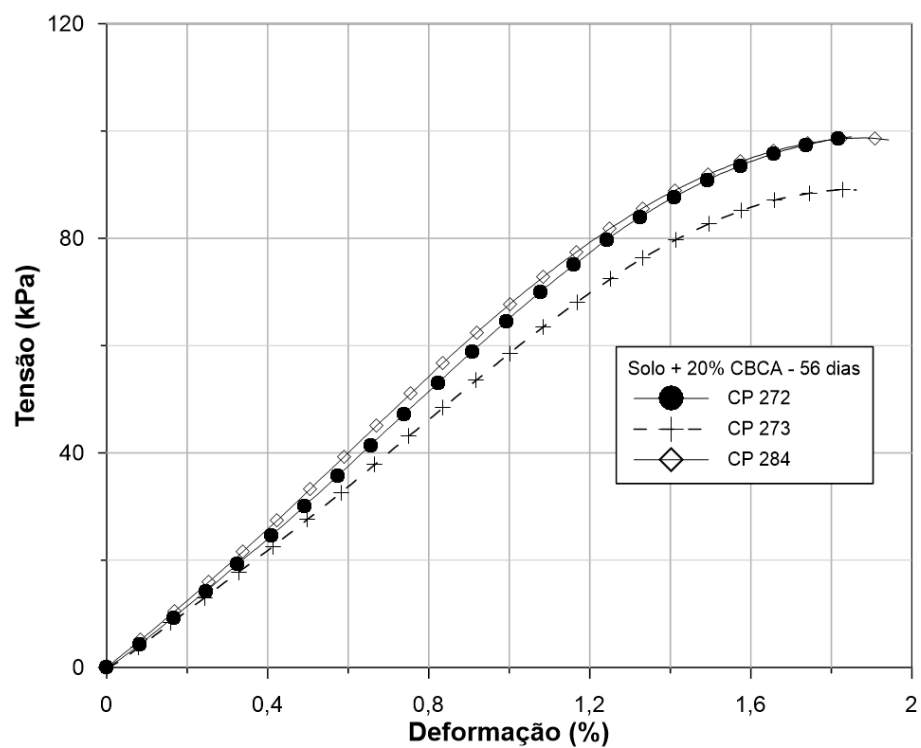
SOLO + 20%CBCA											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
278	7 dias	24,67%	0,08%	1,466	100,11%	0,79	82,0%	44,19%	87,11	5,91	7,22
279	7 dias	24,93%	0,34%	1,456	99,47%	0,80	81,6%	44,55%	75,48		
280	7 dias	24,72%	0,13%	1,470	100,42%	0,79	82,7%	44,02%	83,11		
Média		24,77%	0,18%	1,464	100,00%	0,79	82,0%	44,25%	81,90		



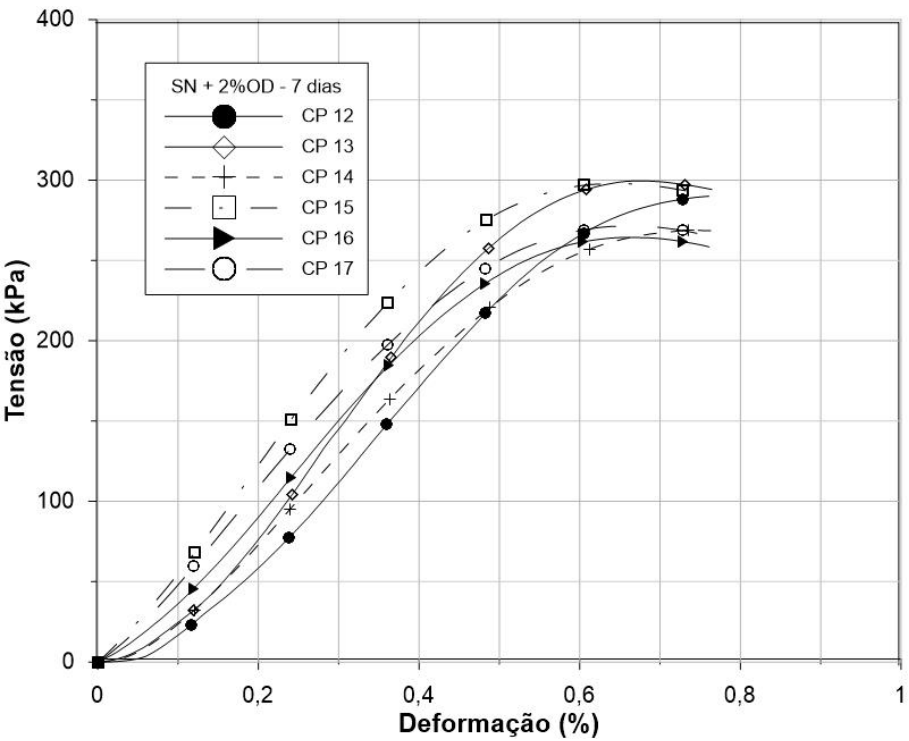
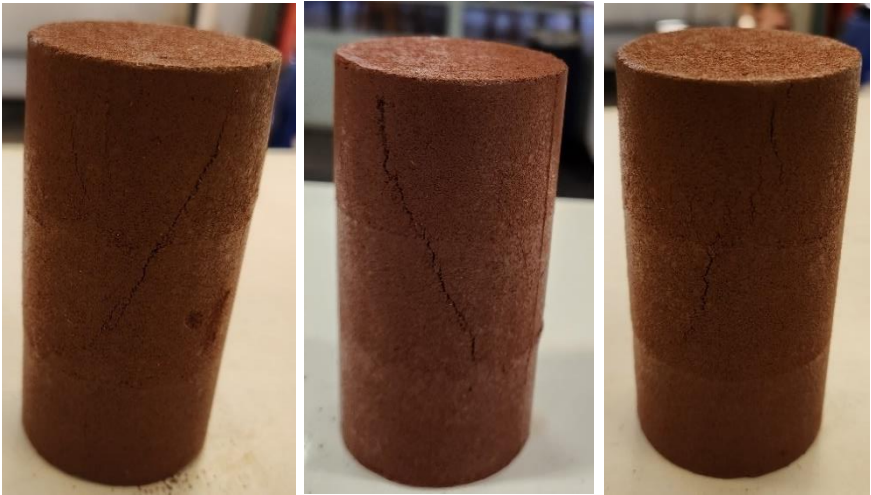
SOLO + 20%CBCA											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
276	28 dias	24,79%	0,20%	1,470	100,40%	0,79	82,9%	44,03%	86,97	2,47	2,93
275	28 dias	24,94%	0,35%	1,456	99,43%	0,80	81,6%	44,57%	83,76		
281	28 dias	24,60%	0,01%	1,469	100,33%	0,79	82,1%	44,06%	82,12		
Média		24,78%	0,19%	1,465	100,06%	0,79	82,1%	44,22%	84,29		



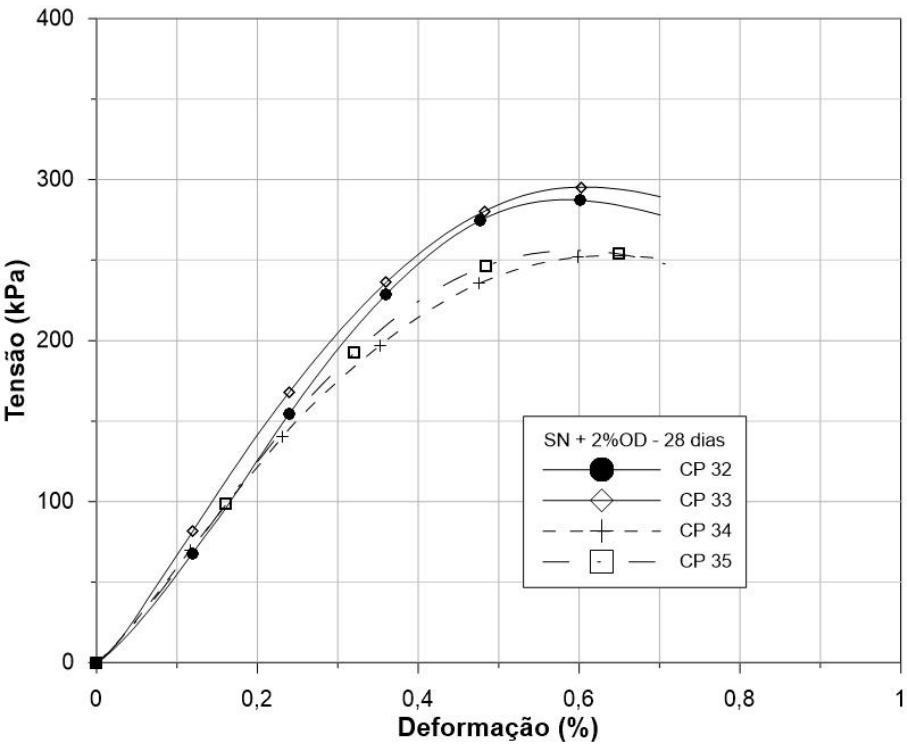
SOLO + 20%CBCA											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
272	56 dias	24,90%	0,31%	1,446	98,75%	0,82	79,9%	45,03%	99,40	5,77	6,02
273	56 dias	24,51%	-0,08%	1,461	99,80%	0,80	80,6%	44,45%	89,09		
284	56 dias	24,90%	0,31%	1,458	99,58%	0,80	81,5%	44,57%	98,72		
Média		24,77%	0,18%	1,455	99,37%	0,81	80,5%	44,68%	95,74		



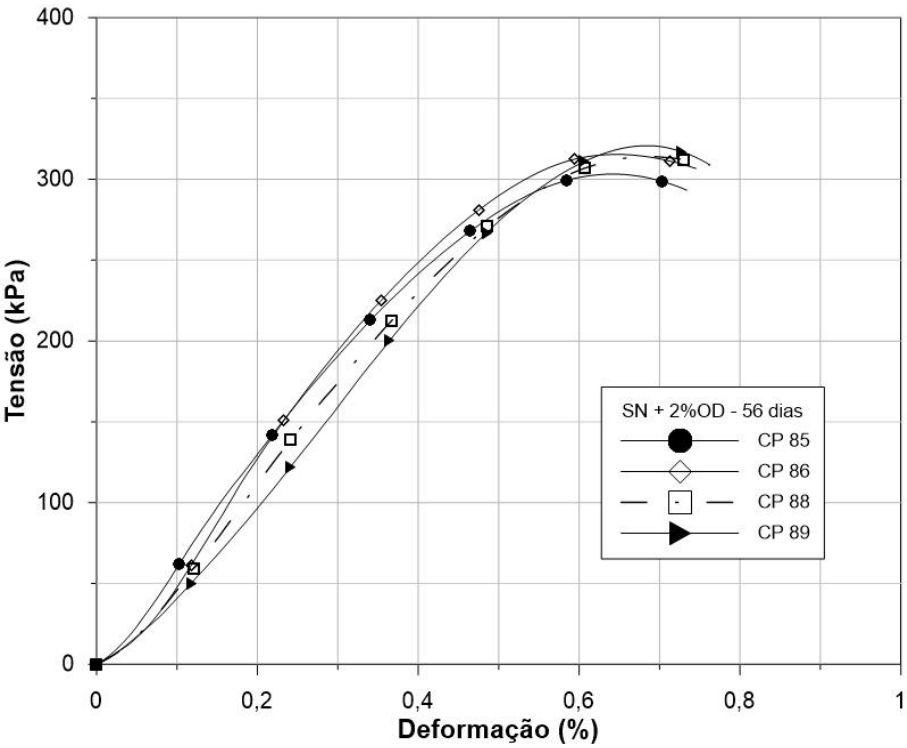
SOLO + 2%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
12	7 dias	9,84%	-0,16%	1,862	100,14%	0,41	62,7%	29,22%	290,45	15,69	5,56
13	7 dias	10,10%	0,10%	1,851	99,59%	0,42	63,2%	29,60%	299,51		
14	7 dias	9,70%	-0,30%	1,860	100,07%	0,41	61,7%	29,26%	268,67		
15	7 dias	9,60%	-0,40%	1,862	100,15%	0,41	61,2%	29,21%	297,93		
16	7 dias	9,62%	-0,38%	1,858	99,93%	0,42	60,9%	29,37%	264,36		
17	7 dias	9,58%	-0,42%	1,861	100,13%	0,41	61,0%	29,22%	271,55		
Média		9,74%	-0,26%	1,859	100,00%	0,41	61,8%	29,31%	282,08		



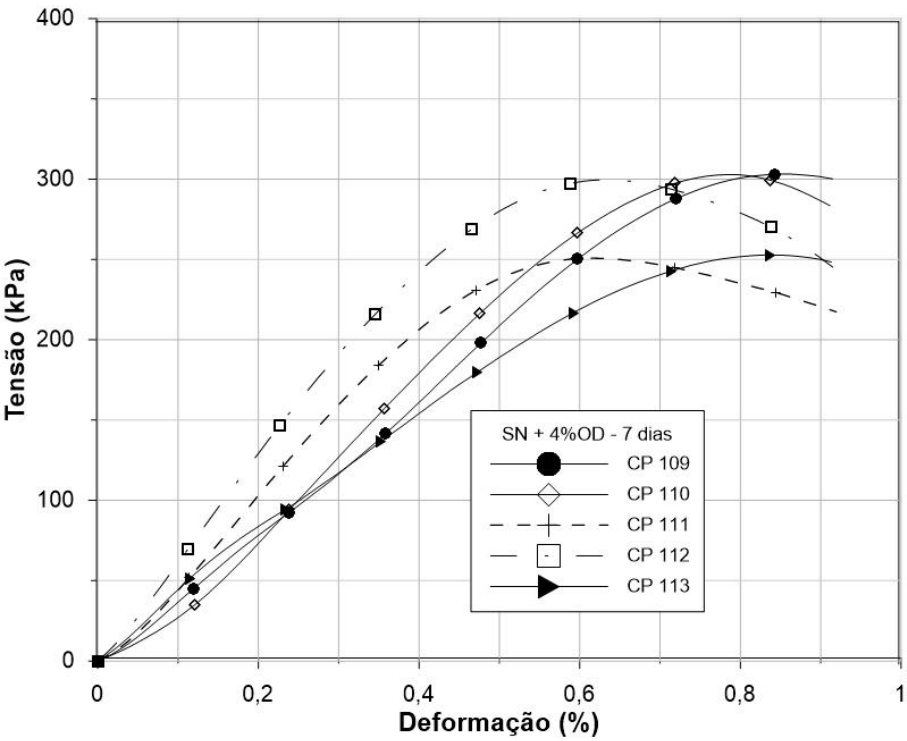
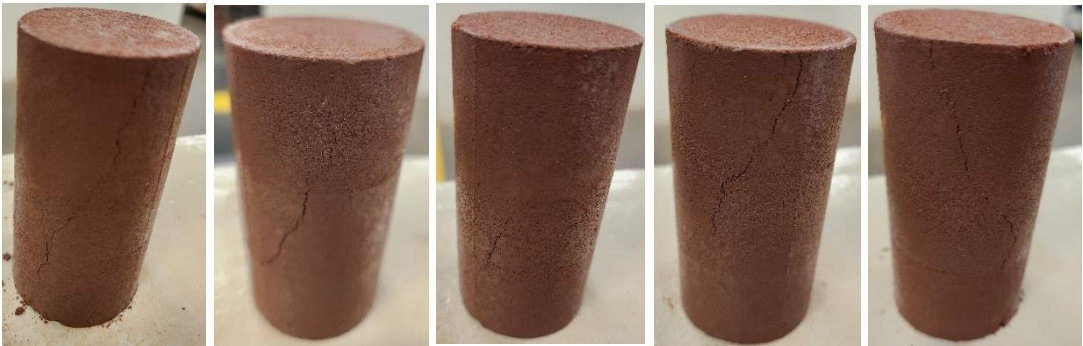
SOLO + 2%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
32	28 dias	9,58%	-0,42%	1,861	100,12%	0,41	61,0%	29,23%	287,60	21,72	7,96
33	28 dias	9,39%	-0,61%	1,862	100,19%	0,41	59,9%	29,18%	295,41		
34	28 dias	9,59%	-0,41%	1,862	100,14%	0,41	61,1%	29,22%	252,73		
35	28 dias	9,52%	-0,48%	1,861	100,08%	0,41	60,5%	29,26%	256,01		
Média		9,52%	-0,48%	1,861	100,13%	0,41	60,6%	29,22%	272,94		



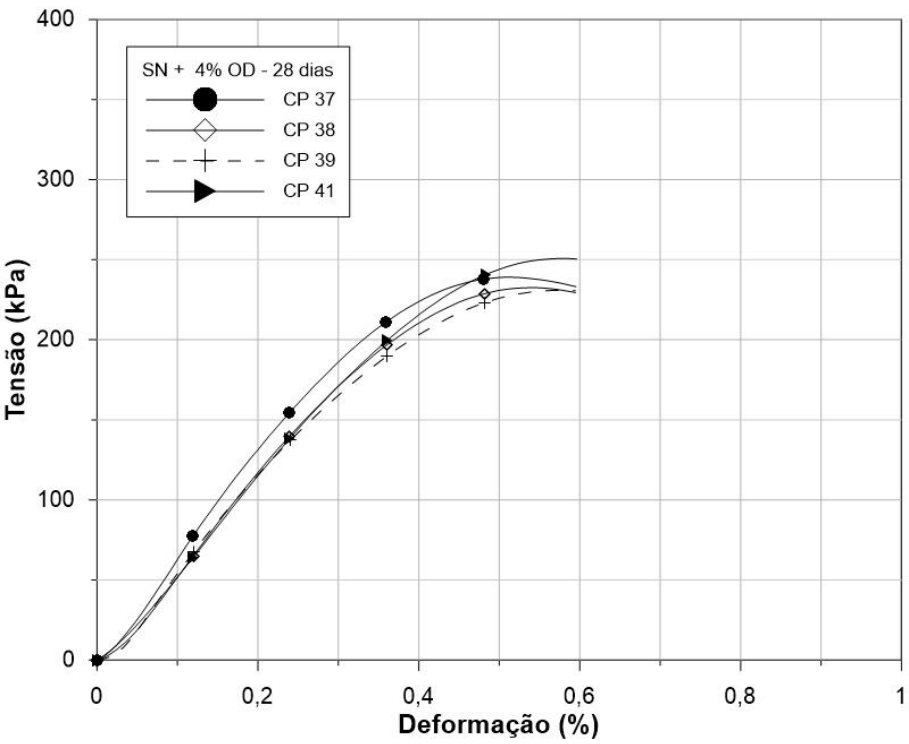
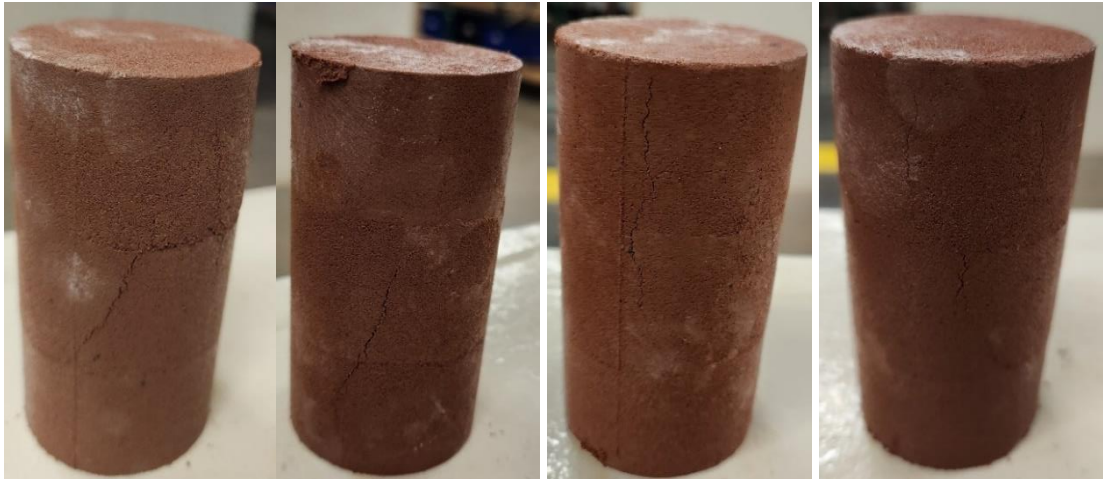
SOLO + 2%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/cm ₃)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
85	56 dias	10,38%	0,38%	1,826	98,23%	0,44	62,0%	30,57%	303,33	7,34	2,34
86	56 dias	10,23%	0,23%	1,846	99,30%	0,42	63,3%	29,81%	315,46		
88	56 dias	10,13%	0,13%	1,863	100,23 %	0,41	64,7%	29,15%	314,09		
89	56 dias	10,42%	0,42%	1,849	99,46%	0,42	64,9%	29,69%	320,85		
Média		10,29%	0,29%	1,846	99,30%	0,42	63,7%	29,81%	313,43		



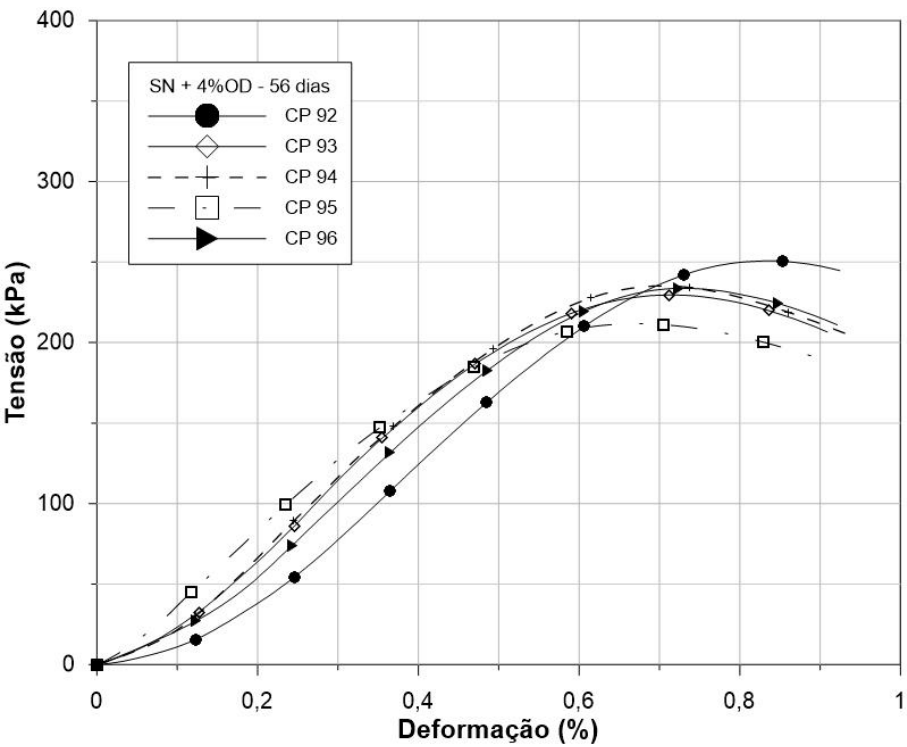
SOLO + 4%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
109	7 dias	9,73%	-0,27%	1,893	101,80%	0,39	65,6%	28,04%	303,20	27,48	9,75
110	7 dias	9,99%	-0,01%	1,888	101,54%	0,39	66,8%	28,22%	302,81		
111	7 dias	10,31%	0,31%	1,852	99,60%	0,42	64,5%	29,60%	250,75		
112	7 dias	9,89%	-0,11%	1,867	100,41%	0,41	63,6%	29,03%	299,51		
113	7 dias	10,07%	0,07%	1,858	99,96%	0,42	63,8%	29,34%	252,78		
Média		10,09%	0,00%	1,871	100,66 %	0,41	64,9%	28,85%	281,81		



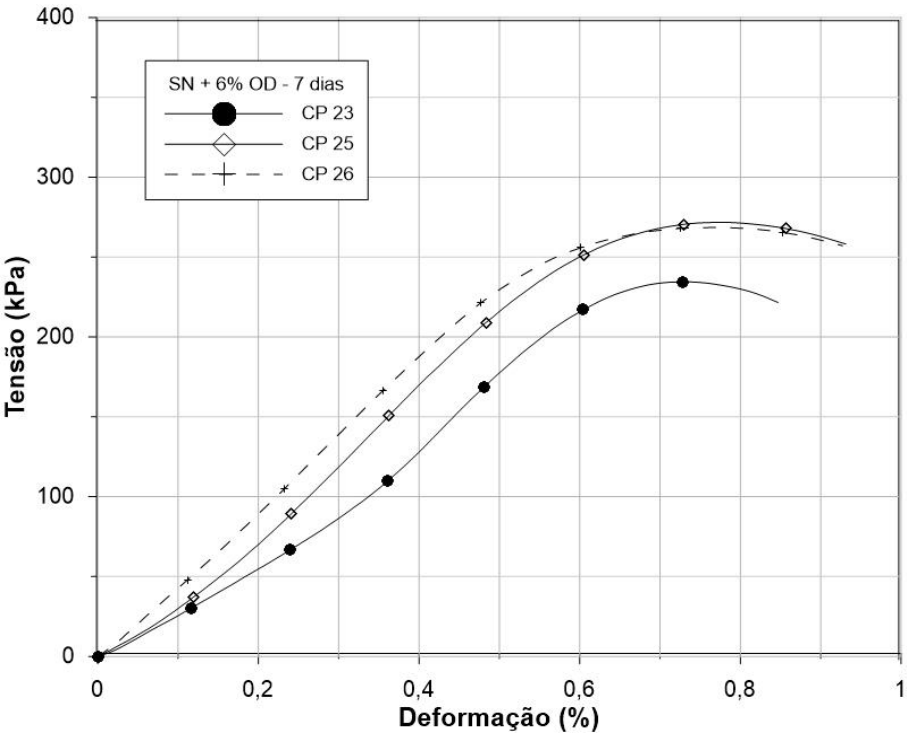
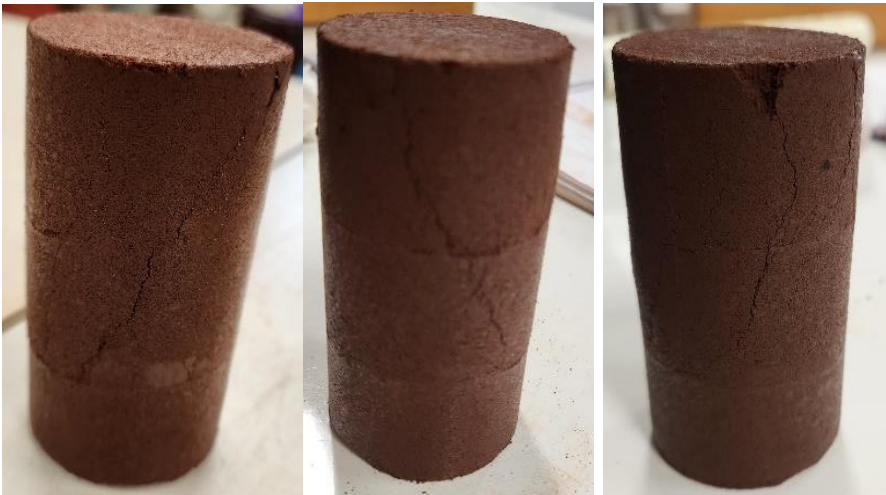
SOLO + 4%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
37	28 dias	9,90%	-0,10%	1,859	99,98%	0,42	62,7%	29,33%	239,06	9,03	3,79
38	28 dias	9,76%	-0,24%	1,857	99,87%	0,42	61,6%	29,41%	232,56		
39	28 dias	9,65%	-0,35%	1,864	100,25%	0,41	61,7%	29,14%	230,86		
41	28 dias	9,89%	-0,11%	1,869	100,53%	0,41	63,9%	28,94%	250,77		
Média		9,80%	-0,20%	1,862	100,16%	0,41	62,5%	29,20%	238,31		



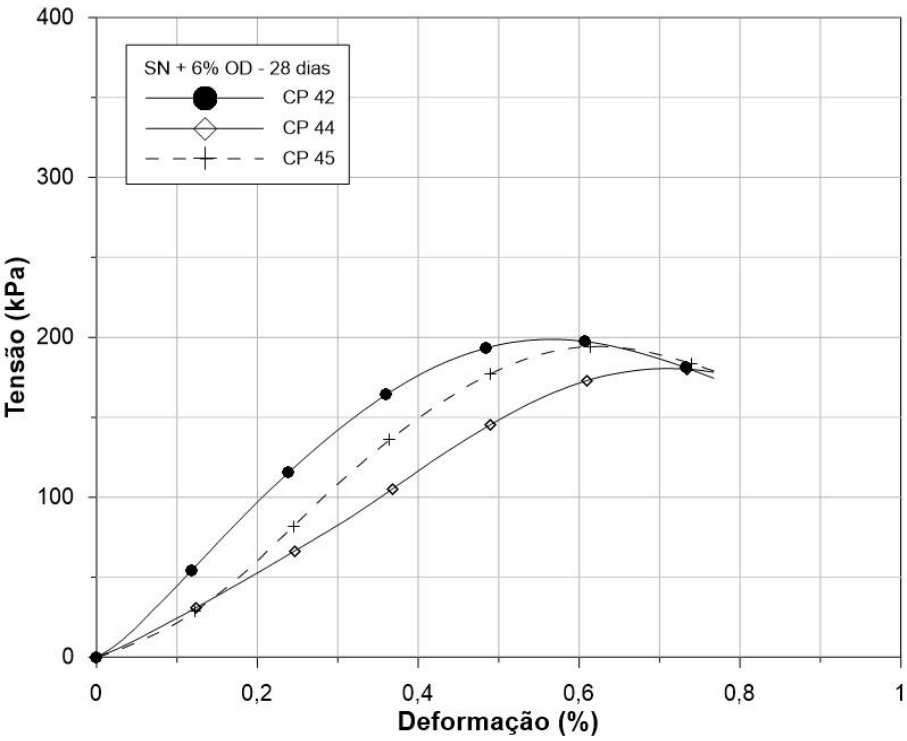
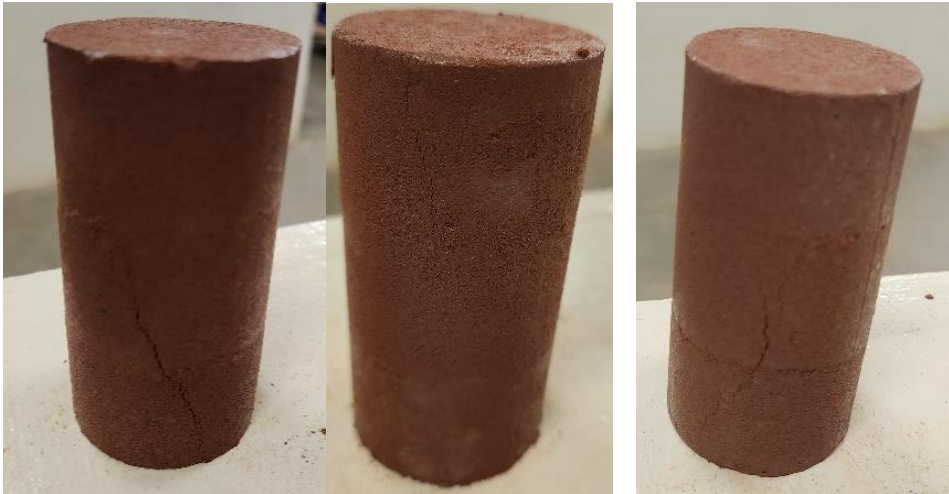
SOLO + 4%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm ₃)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
92	56 dias	9,90%	-0,10%	1,850	99,49%	0,42	61,7%	29,67%	250,77	13,98	6,02
93	56 dias	9,63%	-0,37%	1,871	100,66%	0,41	62,5%	28,85%	229,55		
94	56 dias	10,27%	0,27%	1,860	100,04%	0,41	65,2%	29,29%	235,19		
95	56 dias	10,24%	0,24%	1,846	99,28%	0,43	63,4%	29,82%	211,75		
96	56 dias	9,90%	-0,10%	1,861	100,11%	0,41	63,0%	29,24%	233,75		
Média		9,99%	-0,01%	1,857	99,91%	0,42	63,1%	29,38%	232,2		



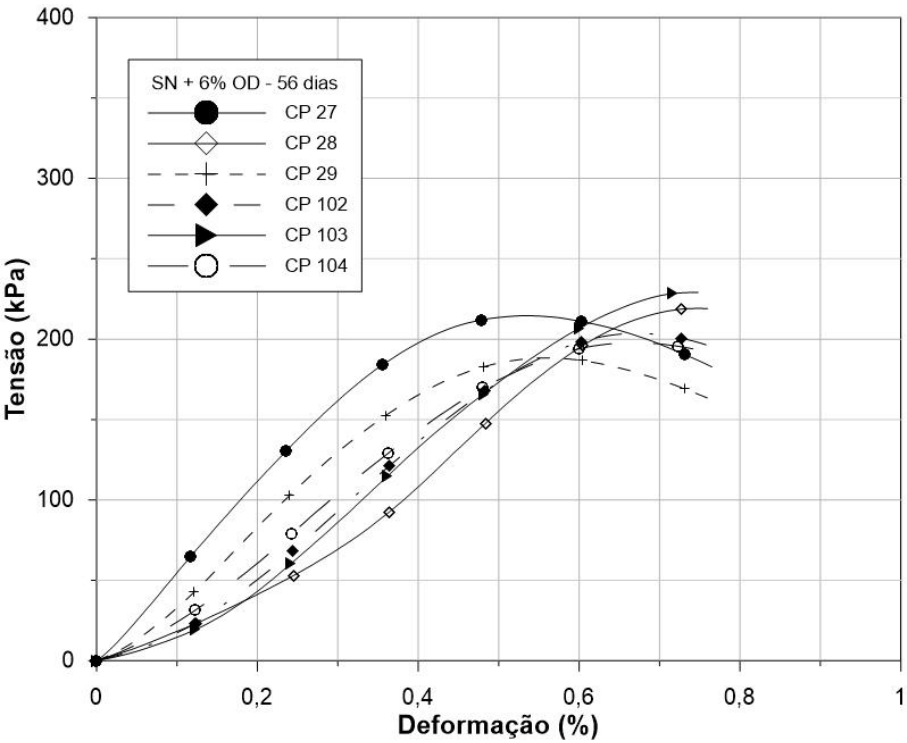
SOLO + 6%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
23	7 dias	9,70%	-0,30%	1,855	99,78%	0,42	61,1%	29,47%	234,49	20,64	7,99
25	7 dias	9,83%	-0,17%	1,871	100,67%	0,41	63,8%	28,84%	271,75		
26	7 dias	9,64%	-0,36%	1,876	100,92%	0,40	63,1%	28,66%	268,52		
Média		9,72%	-0,28%	1,867	100,46%	0,41	62,%	28,99%	258,25		



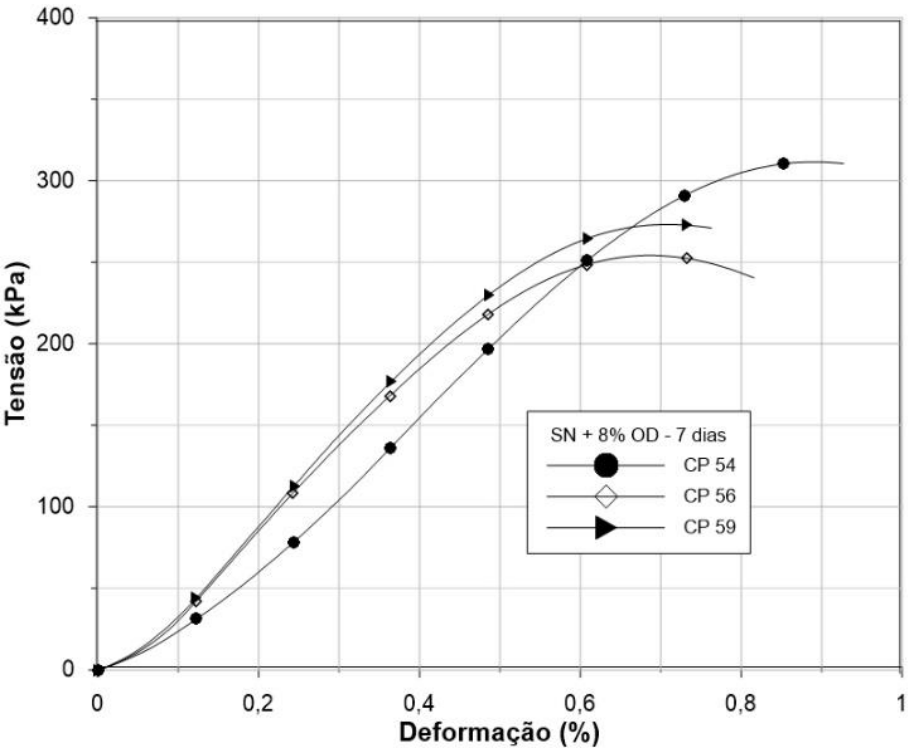
SOLO + 6%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
42	28 dias	10,20%	0,20%	1,859	99,98%	0,42	64,7%	29,33%	198,74	9,53	4,99
44	28 dias	10,15%	0,15%	1,854	99,76%	0,42	63,8%	29,49%	180,46		
45	28 dias	9,81%	-0,19%	1,861	100,13%	0,41	62,5%	29,22%	194,32		
Média		10,05%	0,05%	1,858	99,95%	0,42	63,7%	29,35%	191,17		



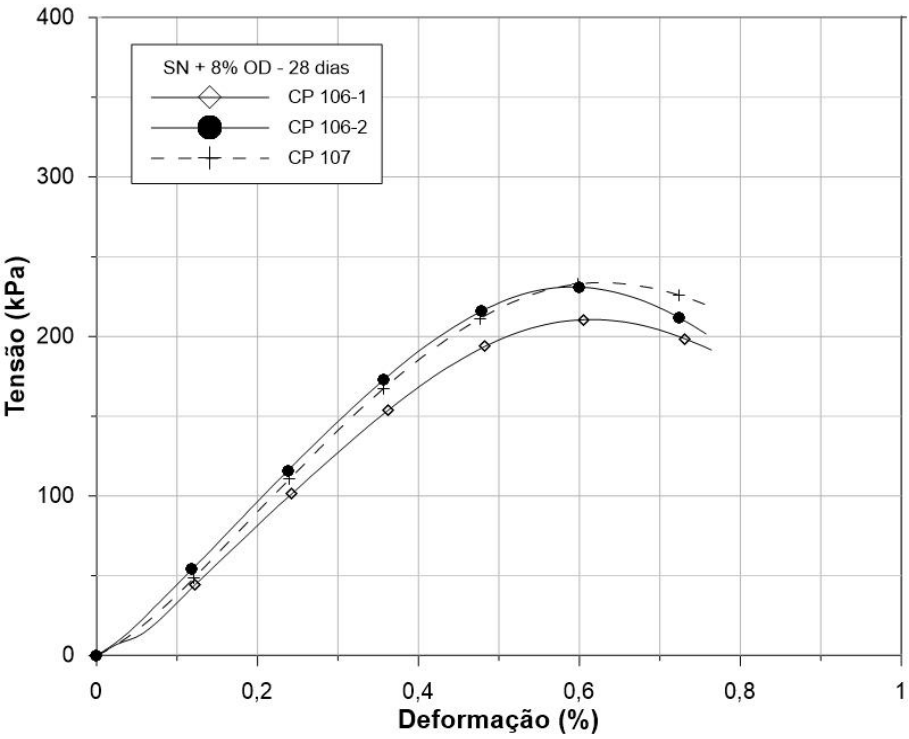
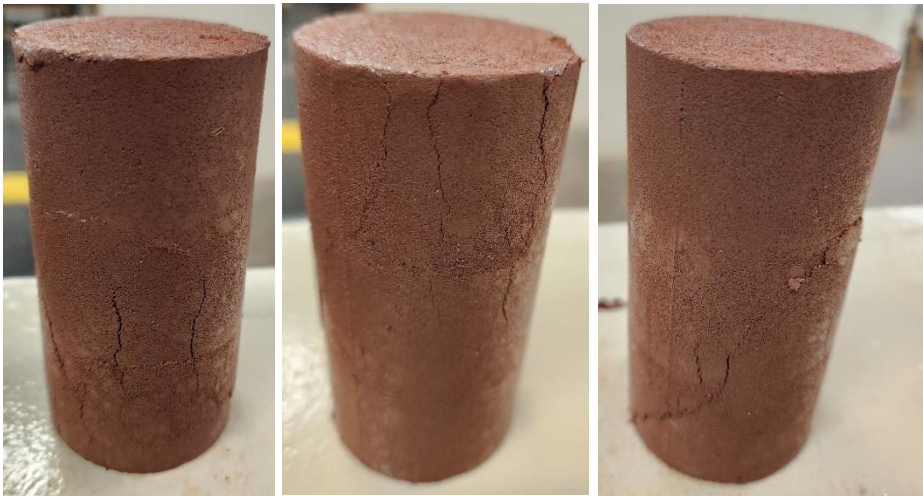
SOLO +6%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
27	56 dias	9,88%	-0,12%	1,877	100,98%	0,40	64,8%	28,62%	214,58	14,99	7,18
28	56 dias	9,58%	-0,42%	1,875	100,85%	0,40	62,6%	28,71%	219,16		
29	56 dias	9,65%	-0,35%	1,872	100,71%	0,40	62,7%	28,81%	188,31		
102	56 dias	10,06%	0,06%	1,830	98,45%	0,44	60,6%	30,41%	203,57		
103	56 dias	10,20%	0,20%	1,851	99,57%	0,42	63,7%	29,62%	229,15		
104	56 dias	10,09%	0,09%	1,849	99,47%	0,42	62,8%	29,69%	197,80		
Média		9,91%	-0,09%	1,859	100,01%	0,41	62,9%	29,31%	208,76		



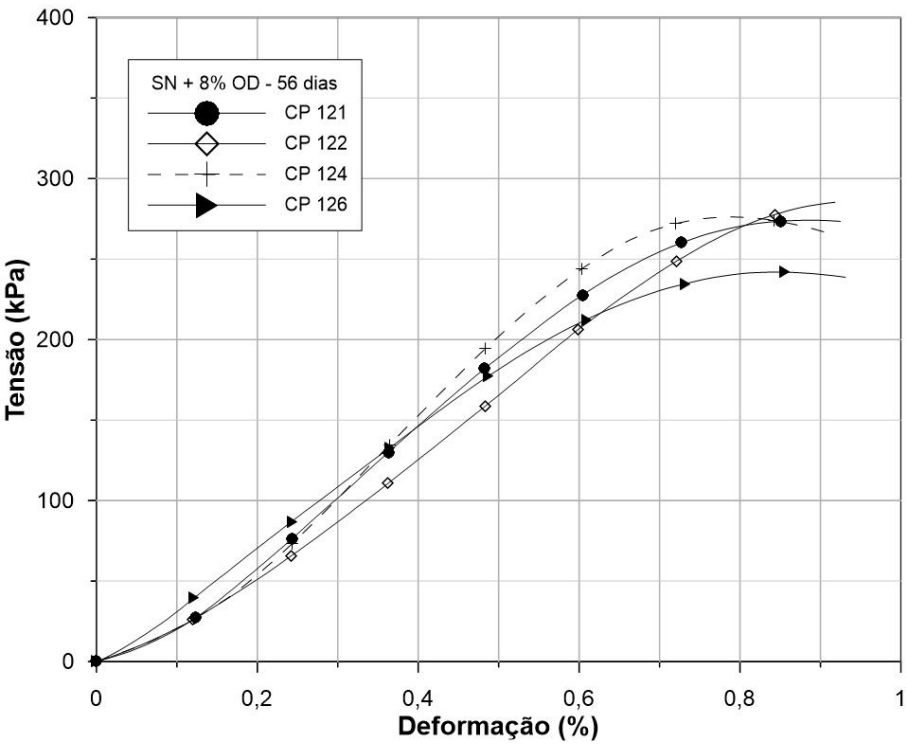
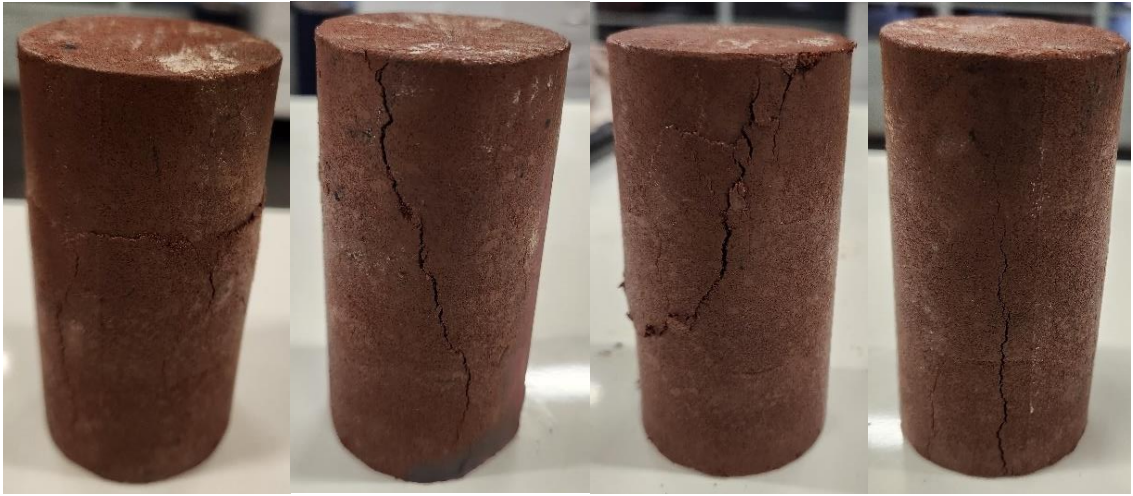
SOLO + 8%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
54	7 dias	10,13%	0,13%	1,850	99,52%	0,42	63,2%	29,66%	311,50	29,19	10,44
56	7 dias	10,28%	0,28%	1,847	99,36%	0,42	63,8%	29,77%	254,21		
59	7 dias	10,15%	0,15%	1,846	99,31%	0,42	62,9%	29,80%	273,20		
Média		10,19%	0,19%	1,848	99,40%	0,42	63,3%	29,74%	279,64		



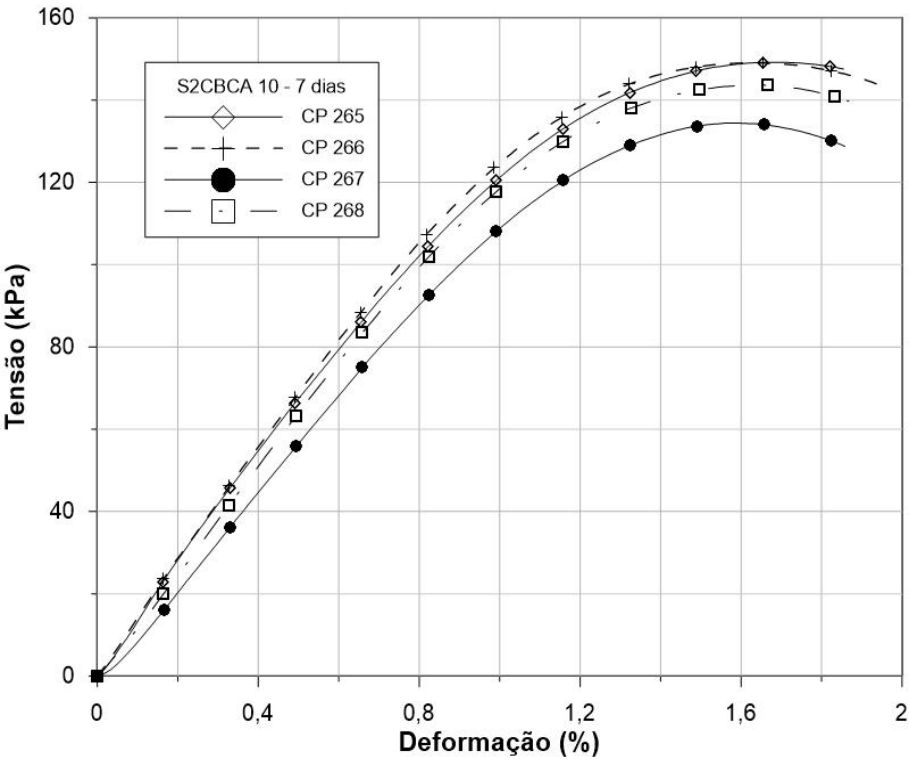
SOLO + 8%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
106-2	28 dias	10,39%	0,39%	1,868	100,47%	0,41	67,0%	28,98%	231,04	12,65	5,62
106-1	28 dias	10,34%	0,34%	1,865	100,33%	0,41	66,3%	29,08%	210,59		
107	28 dias	10,10%	0,10%	1,865	100,33%	0,41	64,8%	29,08%	233,70		
Média		10,28%	0,28%	1,866	100,38%	0,41	66,0%	29,05%	225,11		



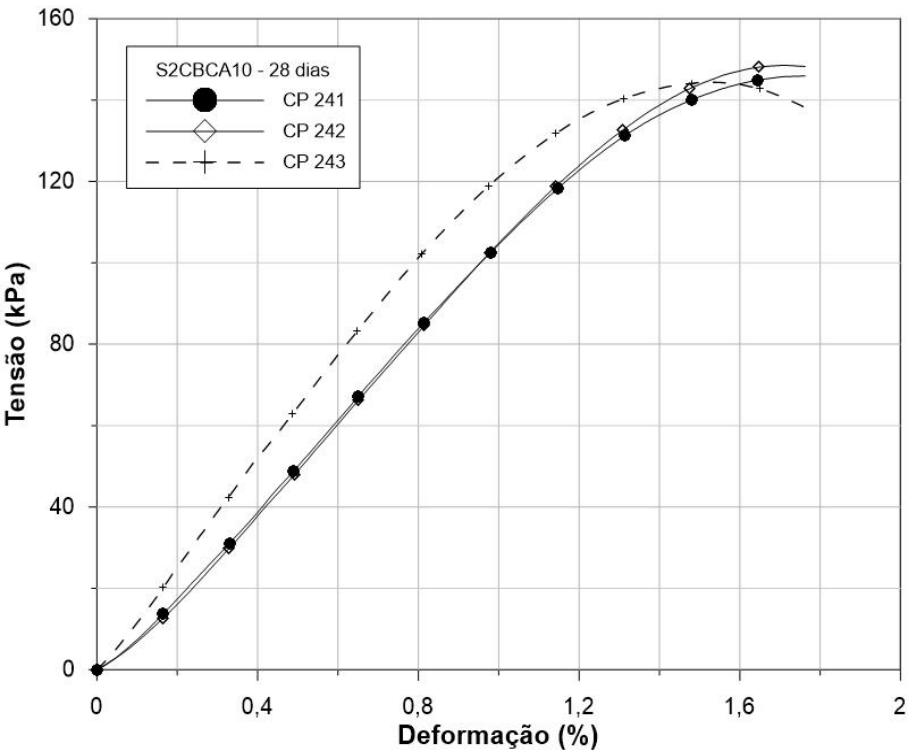
SOLO + 8%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
121	56 dias	10,47%	0,47%	1,857	99,92%	0,42	66,2%	29,38%	274,15	19,10	7,09
122	56 dias	10,35%	0,35%	1,858	99,97%	0,42	65,6%	29,34%	285,92		
124	56 dias	9,78%	-0,22%	1,867	100,41%	0,41	62,9%	29,03%	276,16		
126	56 dias	10,25%	0,25%	1,860	100,05%	0,41	65,1%	29,28%	241,95		
Média		10,21%	0,21%	1,861	100,09%	0,41	65,0%	29,26%	269,54		



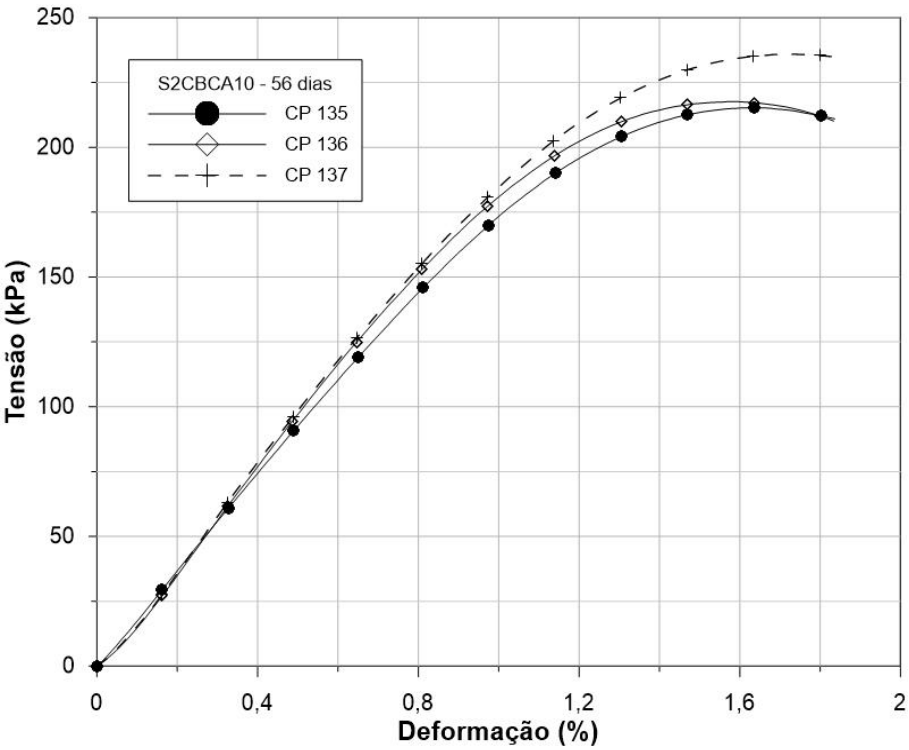
S2CBCA10											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/c m³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
265	7 dias	14,19%	0,29%	1,728	99,73%	0,52	71,6%	34,26%	149,19	6,95	4,82
266	7 dias	13,86%	-0,04%	1,738	100,33%	0,51	71,2%	33,86%	149,13		
267	7 dias	14,14%	0,24%	1,731	99,89%	0,52	71,7%	34,15%	134,44		
268	7 dias	13,76%	-0,14%	1,733	100,06%	0,52	70,1%	34,04%	143,66		
Média		13,99%	0,09%	1,733	100,00%	0,52	71,1%	34,08%	144,11		



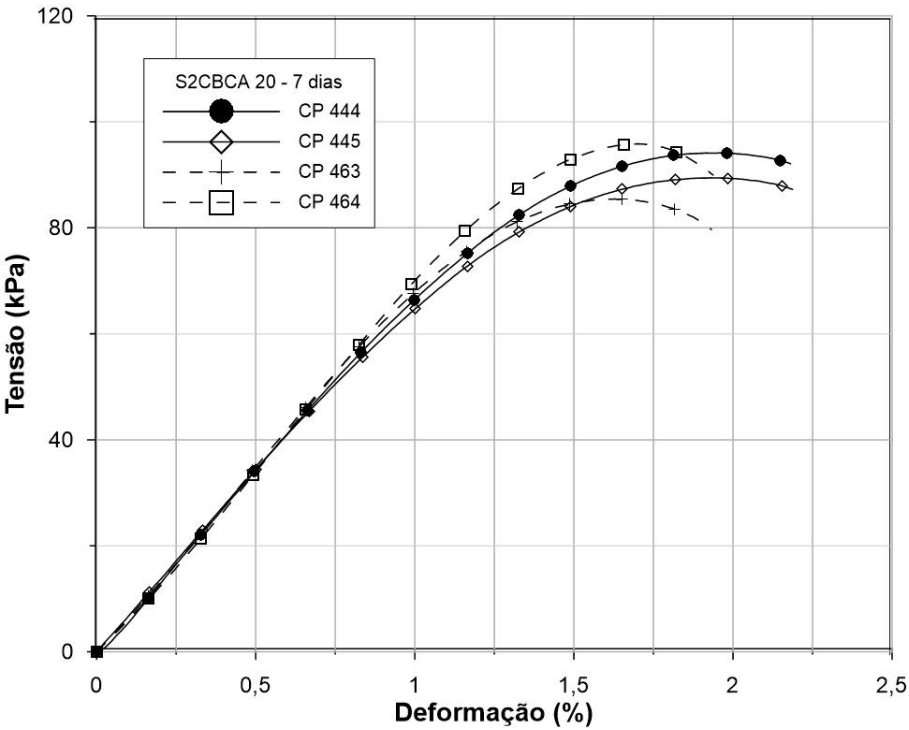
S2BCA10											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
241	28 dias	13,99%	0,09%	1,726	99,60%	0,52	70,3%	34,34%	145,94	2,09	1,43
242	28 dias	13,71%	-0,19%	1,738	100,31%	0,51	70,4%	33,87%	148,53		
243	28 dias	13,93%	0,03%	1,725	99,58%	0,52	70,0%	34,35%	144,39		
Média		13,88%	-0,02%	1,730	99,83%	0,52	70,2%	34,19%	146,29		



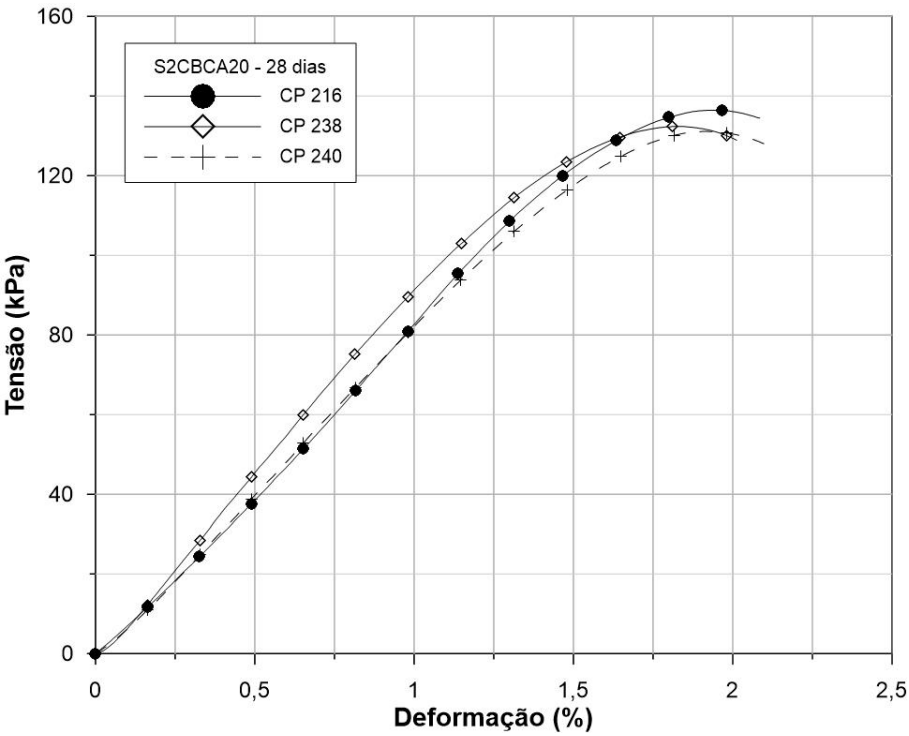
S2BCA10											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
135	56 dias	13,54%	-0,36%	1,734	99,60%	0,52	69,1%	34,01%	215,30	11,27	5,06
136	56 dias	13,35%	-0,55%	1,732	99,97%	0,52	67,8%	34,09%	217,66		
137	56 dias	13,10%	-0,80%	1,745	100,71%	0,51	68,0%	33,60%	235,90		
Média		13,33%	-0,57%	1,737	100,10%	0,51	68,3%	33,90%	222,95		



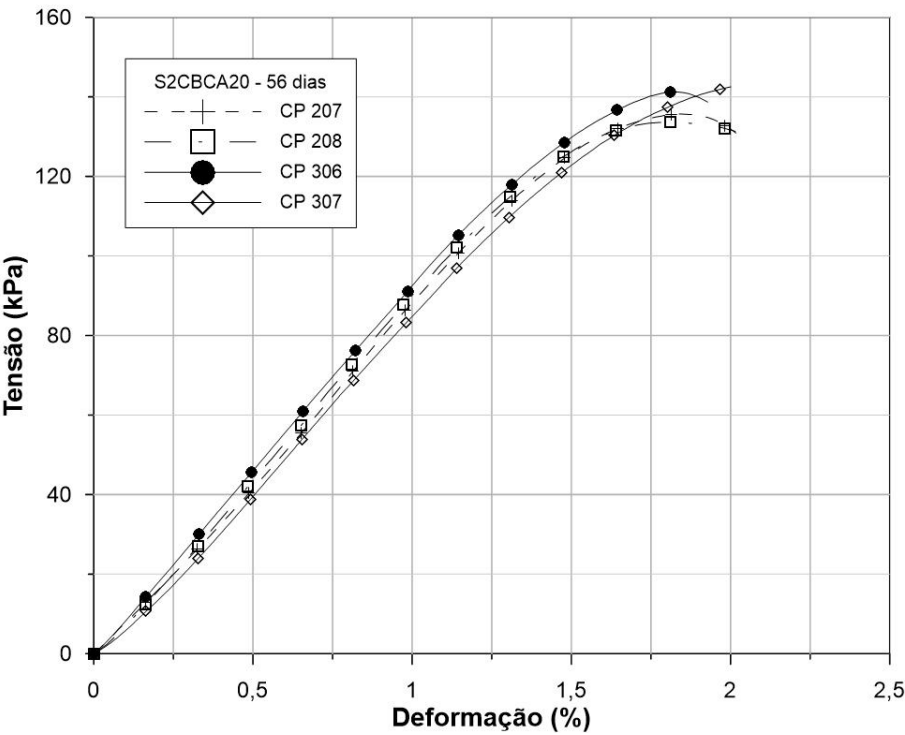
S2CBCA20											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm ₃)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
444	7 dias	19,54%	-0,16%	1,470	99,12%	0,79	65,3%	44,02%	92,67	2,68	2,84
445	7 dias	19,43%	-0,27%	1,471	99,16%	0,79	64,9%	43,99%	92,71		
463	7 dias	20,13%	0,43%	1,463	98,65%	0,79	66,5%	44,28%	94,54		
464	7 dias	20,05%	0,35%	1,462	98,58%	0,80	66,2%	44,32%	98,38		
Média		19,79%	0,09%	1,467	98,88%	0,79	65,7%	44,15%	94,58		



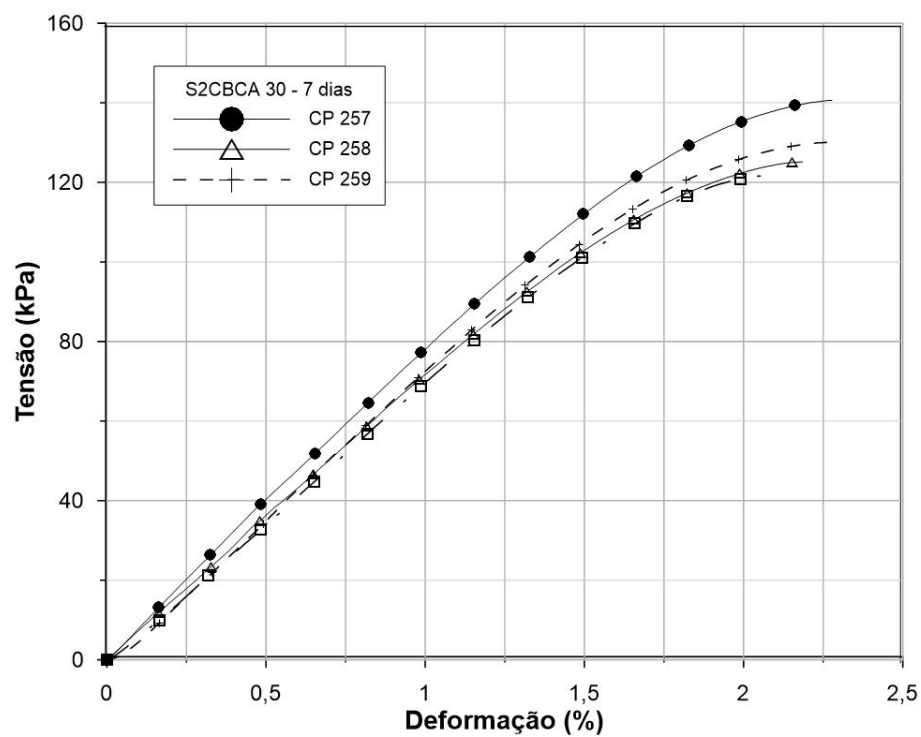
S2BCA20											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
216	28 dias	19,22%	-0,48%	1,493	100,67%	0,76	66,5%	43,14%	136,42	2,78	2,09
238	28 dias	18,84%	-0,86%	1,480	99,81%	0,77	63,9%	43,62%	132,37		
240	28 dias	19,28%	-0,42%	1,480	99,81%	0,77	65,4%	43,63%	131,10		
Média		19,11%	-0,59%	1,485	100,10%	0,77	65,3%	43,46%	133,30		



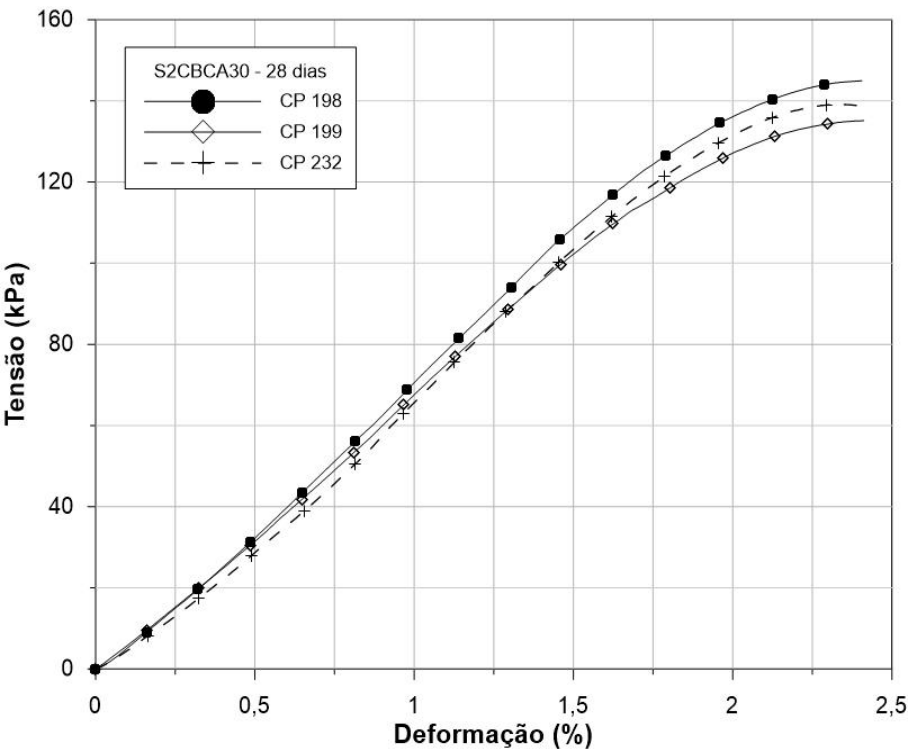
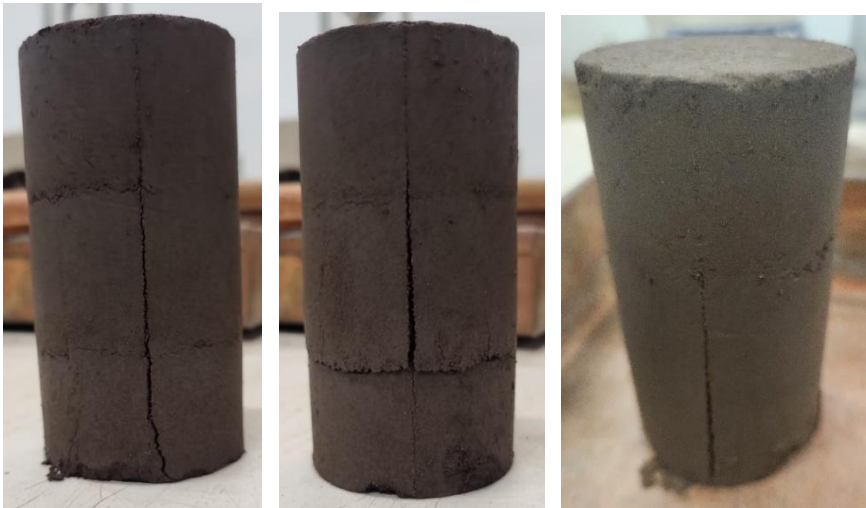
S2BCBA20											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm ₃)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
207	56 dias	19,67%	-0,03%	1,488	100,34%	0,76	67,6%	43,32%	135,70	4,67	3,37
208	56 dias	19,12%	-0,58%	1,486	100,17%	0,77	65,4%	43,42%	133,65		
306	56 dias	19,27%	-0,43%	1,489	100,40%	0,76	66,3%	43,29%	141,23		
307	56 dias	19,50%	-0,20%	1,483	99,98%	0,77	66,4%	43,53%	143,66		
Média		19,39%	-0,31%	1,487	100,23%	0,77	66,4%	43,39%	138,56		



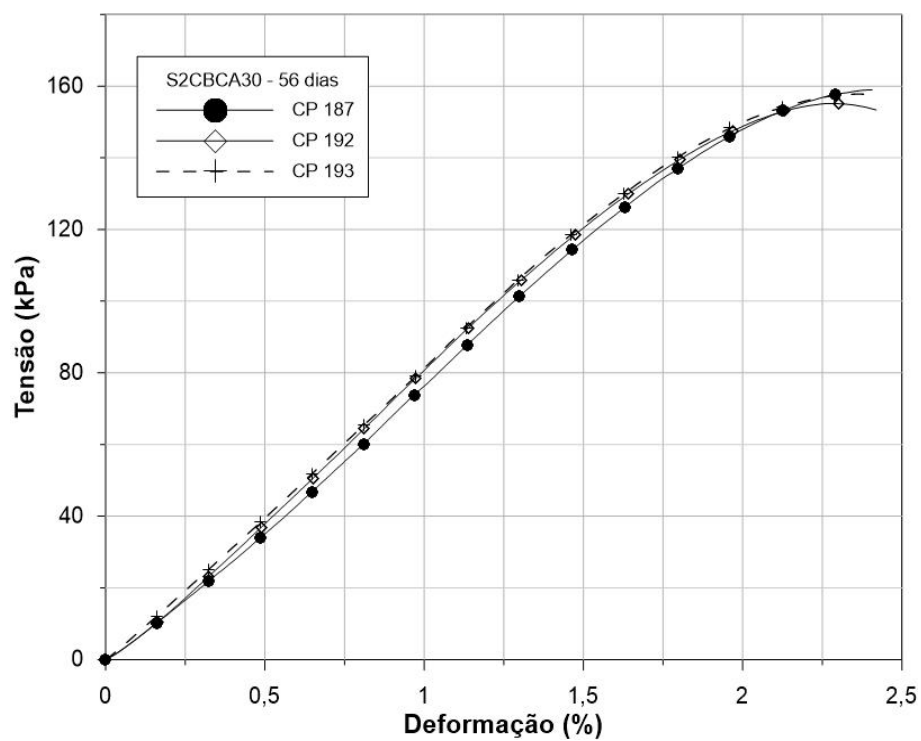
S2BCA30											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/c\ m^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
257	7 dias	28,72%	0,72%	1,323	100,16%	0,98	76,6%	49,60%	140,93	8,05	6,10
258	7 dias	28,79%	0,79%	1,316	99,64%	0,99	76,0%	49,86%	125,17		
259	7 dias	27,97%	-0,03%	1,315	99,56%	1,00	73,7%	49,90%	130,17		
Média		28,49%	0,49%	1,318	99,78%	0,99	75,4%	49,79%	132,09		



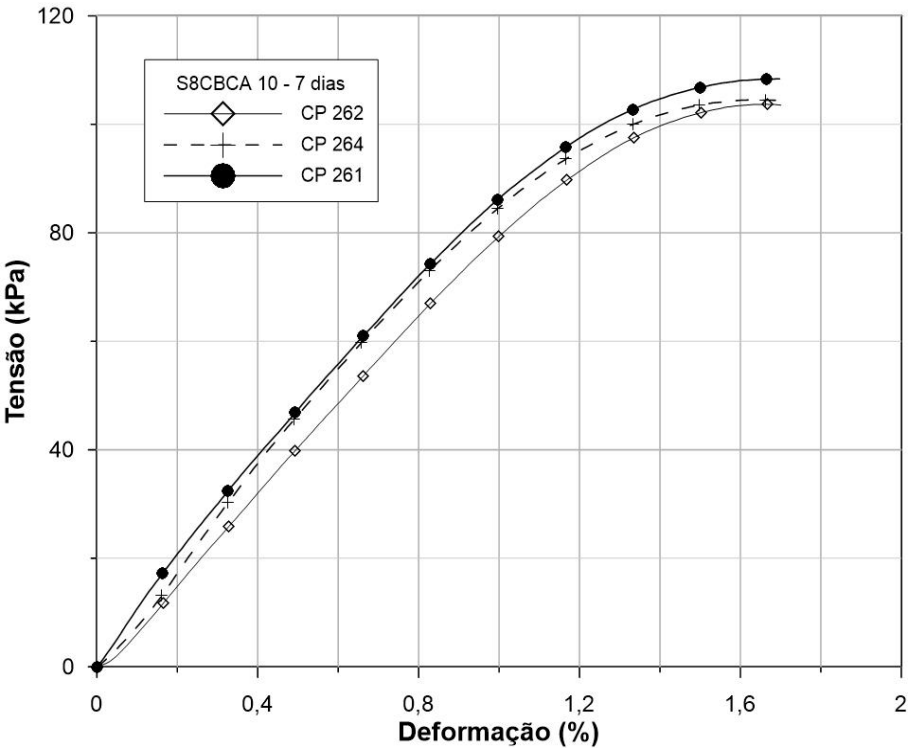
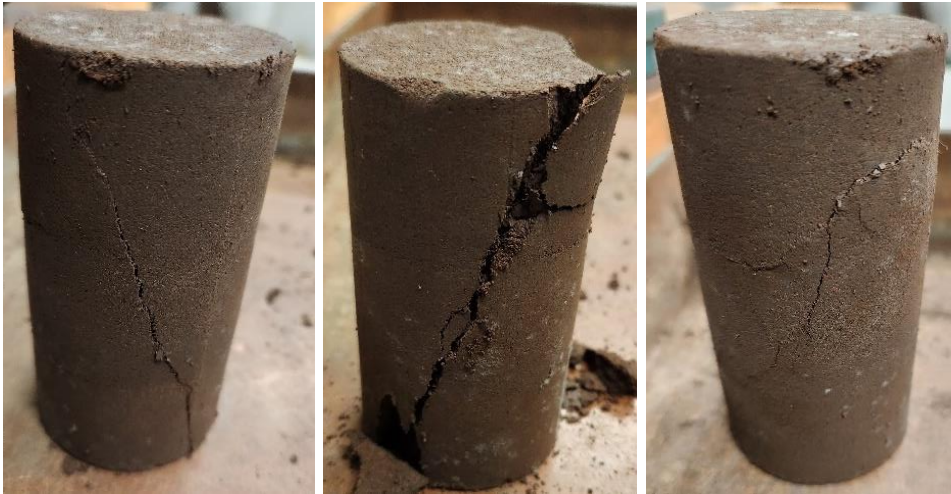
S2CBCA30											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
198	28 dias	27,94%	-0,06%	1,319	99,90%	0,99	74,1%	49,72%	144,97	4,91	3,51
199	28 dias	28,45%	0,45%	1,315	99,60%	1,00	75,0%	49,88%	135,22		
232	28 dias	28,52%	0,52%	1,307	98,97%	1,01	74,3%	50,19%	139,14		
Média		28,30%	0,30%	1,314	99,49%	1,00	74,5%	49,93%	139,78		



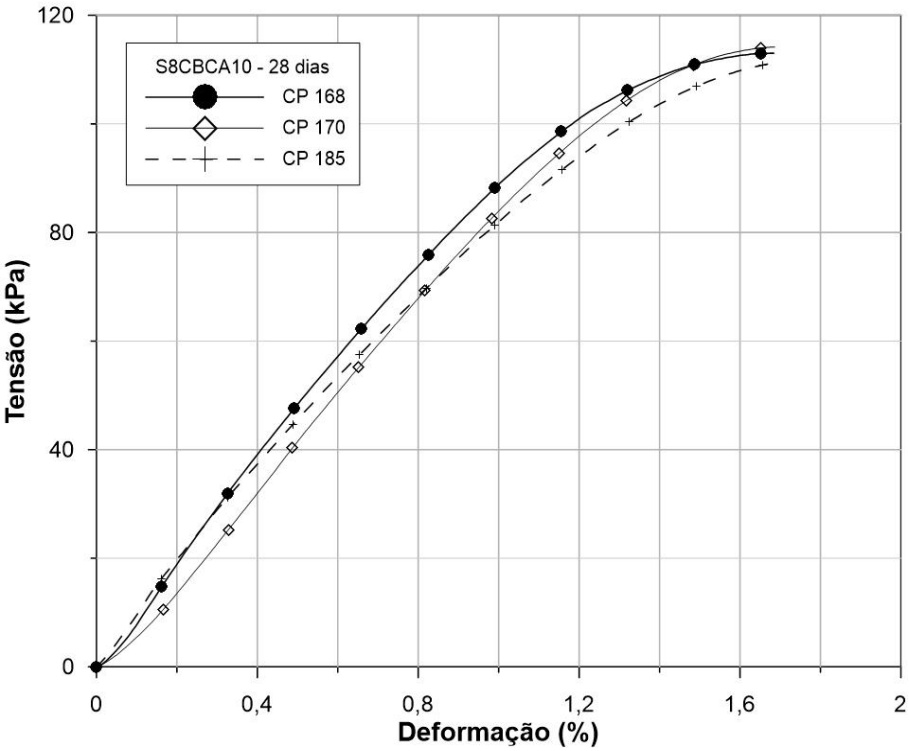
S2BCA30											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
187	56 dias	28,24%	0,24%	1,324	100,25%	0,98	75,5%	49,55%	159,09	2,02	1,28
192	56 dias	28,25%	0,25%	1,315	99,61%	0,99	74,5%	49,87%	155,13		
193	56 dias	29,00%	1,00%	1,310	99,20%	1,00	75,8%	50,08%	157,79		
Média		28,50%	0,50%	1,316	99,69%	0,99	75,3%	49,83%	157,34		



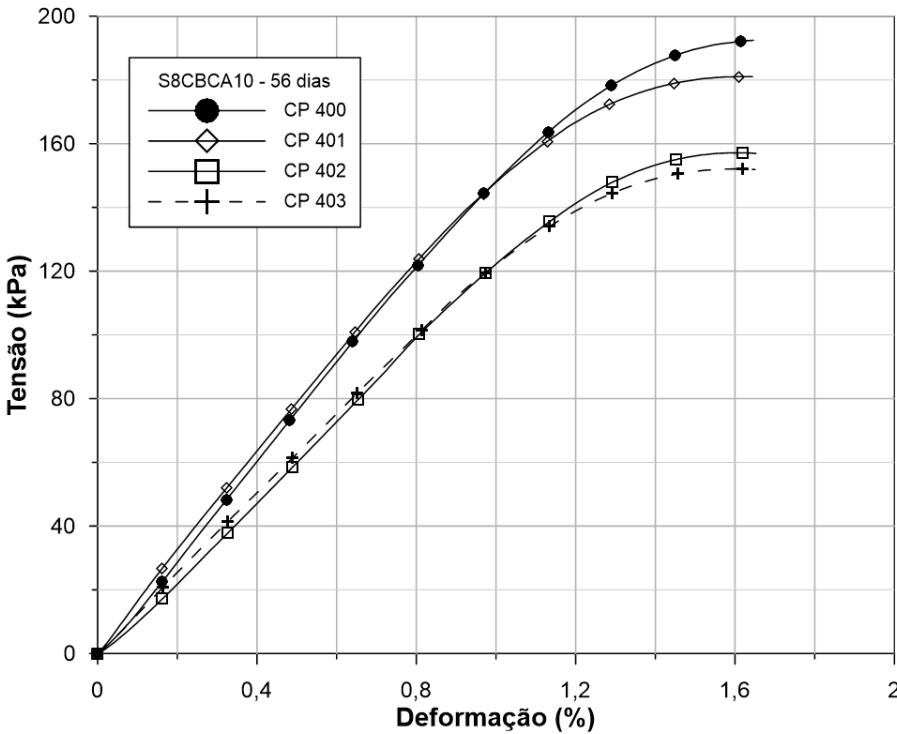
S8BCA10											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/cm ₃)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
261	7 dias	13,09%	-0,41%	1,717	100,73%	0,53	64,8%	34,67%	108,38	2,50	2,37
262	7 dias	13,13%	-0,37%	1,714	100,56%	0,53	64,7%	34,78%	103,70		
264	7 dias	13,80%	0,30%	1,696	99,50%	0,55	66,0%	35,47%	104,51		
Média		13,34%	-0,16%	1,709	100,26%	0,54	65,2%	34,97%	105,53		



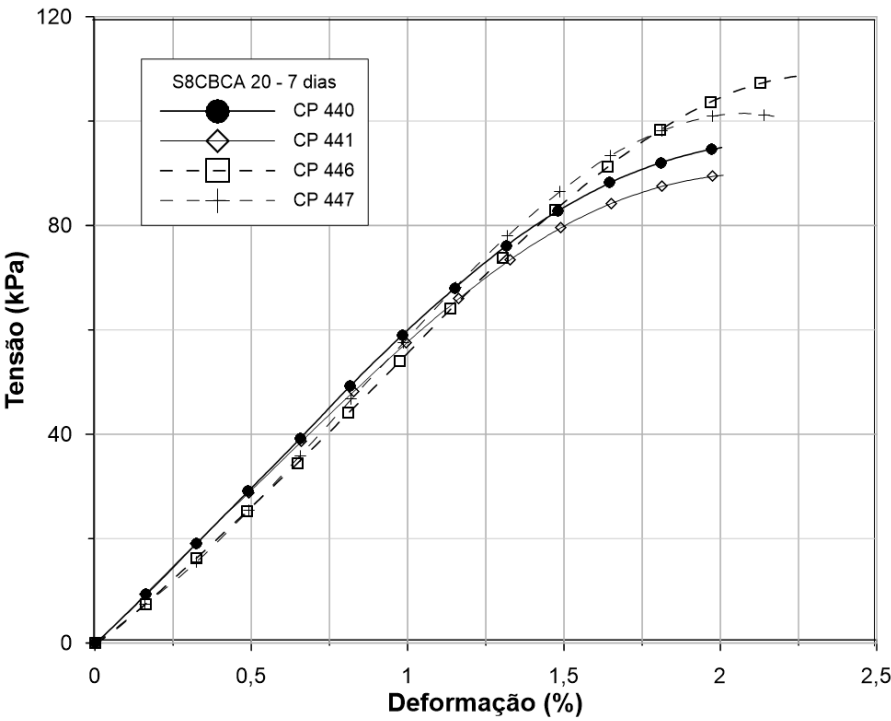
S8BCA10											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
168	28 dias	13,71%	0,21%	1,708	100,22%	0,54	66,9%	35,00%	113,09	1,32	1,17
170	28 dias	13,33%	-0,17%	1,712	100,43%	0,54	65,4%	34,86%	114,24		
185	28 dias	13,19%	-0,31%	1,714	100,54%	0,53	65,0%	34,79%	111,60		
Média		13,41%	-0,09%	1,711	100,40%	0,54	65,8%	34,88%	112,98		



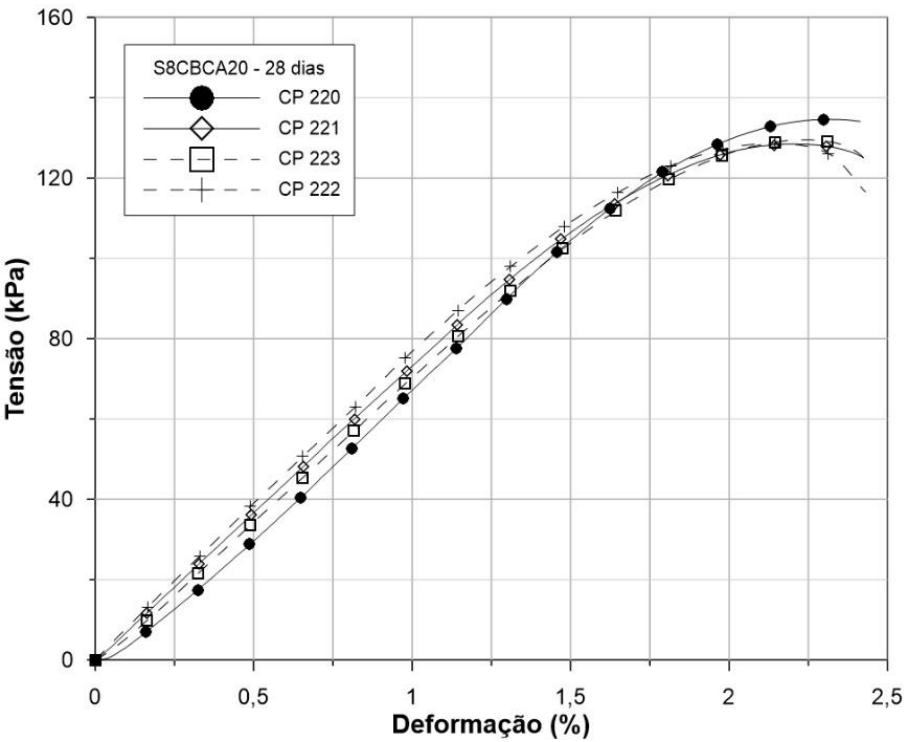
S8BCBA10											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm ₃)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variancia
400	56 dias	11,58%	-1,92%	1,706	100,09%	0,54	56,29%	35,08%	192,63	19,30	11,31
401	56 dias	11,42%	-2,08%	1,713	100,49%	0,53	56,15%	34,82%	181,05		
402	56 dias	11,23%	-2,27%	1,714	100,56%	0,53	55,35%	34,78%	157,13		
403	56 dias	11,30%	-2,20%	1,711	100,36%	0,54	55,36%	34,90%	152,12		
Média		11,38%	-2,12%	1,711	100,38%	0,54	55,79%	34,90%	170,73		



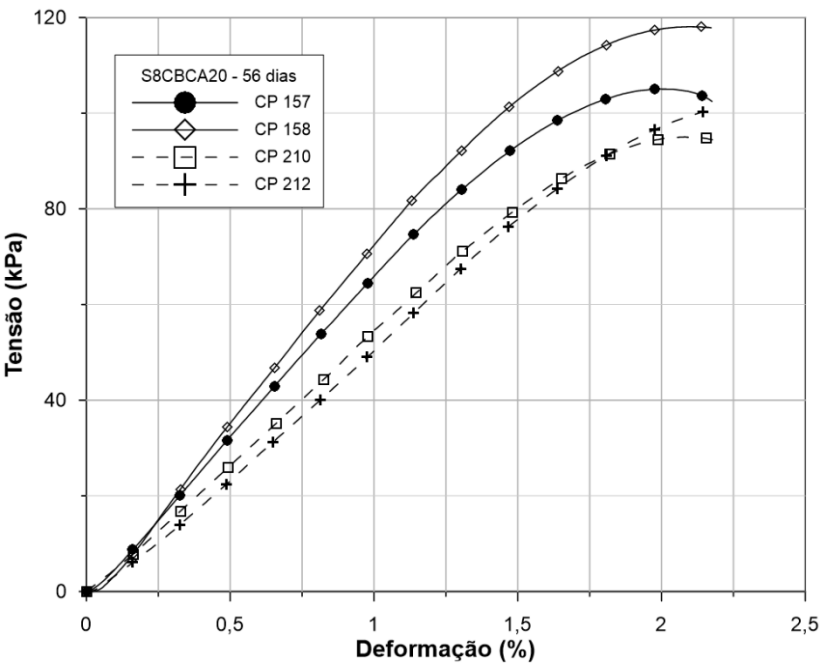
S8BCA20											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/cm ³)	GC	e	Sr	N	RCS (kPa)	DP	Variância
440	7 dias	19,41%	1,31%	1,502	98,67%	0,75	68,1%	42,81%	96,13	8,05	8,11
441	7 dias	18,44%	0,34%	1,508	99,07%	0,74	65,3%	42,58%	90,06		
446	7 dias	18,32%	0,22%	1,511	99,27%	0,74	65,2%	42,46%	109,00		
447	7 dias	17,72%	-0,38%	1,521	99,91%	0,73	64,0%	42,09%	101,51		
Média		18,47%	0,37%	1,510	99,23%	0,74	65,7%	42,48%	99,17		



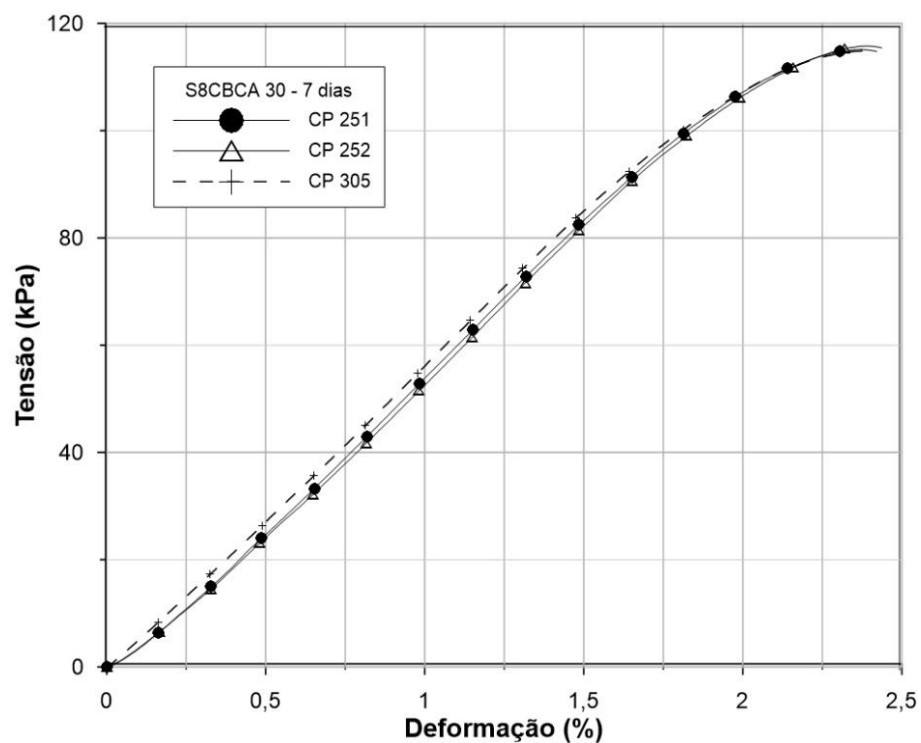
S8BCA20											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/cm ₃)	GC	e	Sr	N	RCS (kPa)	DP	Variância
220	28 dias	17,19%	-0,91%	1,536	100,92%	0,71	63,6%	41,50%	134,63	2,92	2,24
221	28 dias	17,47%	-0,63%	1,523	100,09%	0,72	63,4%	41,99%	128,47		
222	28 dias	18,76%	0,66%	1,506	98,96%	0,74	66,3%	42,64%	128,60		
223	28 dias	18,81%	0,71%	1,510	99,23%	0,74	66,9%	42,48%	129,52		
Média		18,06%	-0,04%	1,519	99,80%	0,73	65,0%	42,15%	130,31		



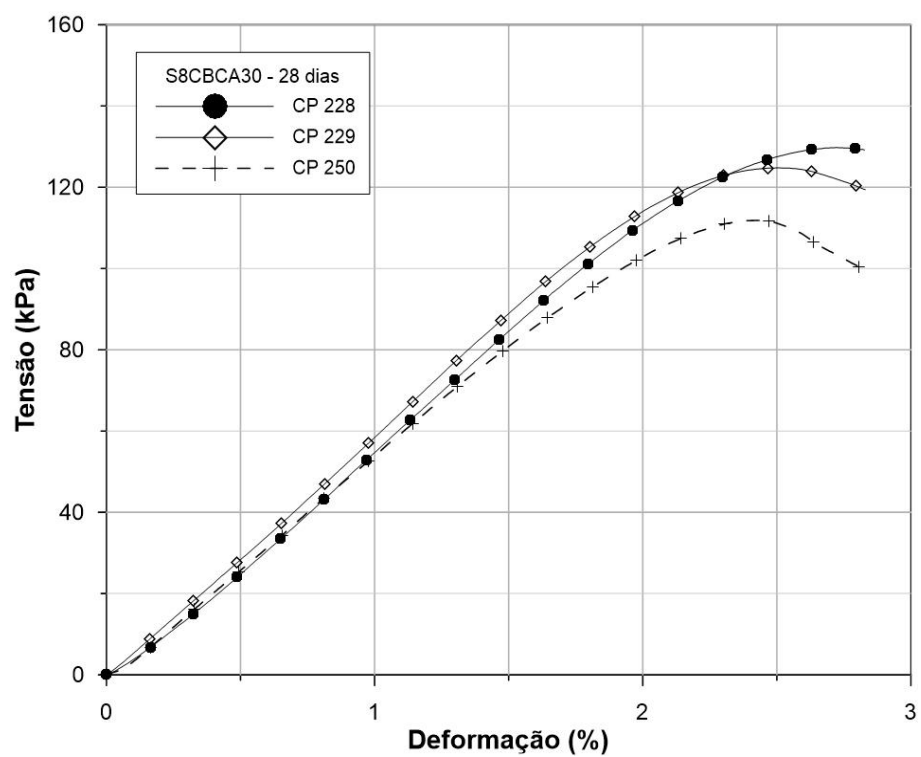
S8CBCA20											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	ρd(g/c m³)	GC	e	Sr	N	RCS (kPa)	DP	Variancia
157	56 dias	18,35%	0,25%	1,517	99,67%	0,73	65,9%	42,23%	105,05	9,72	9,27
158	56 dias	18,21%	0,11%	1,513	99,41%	0,74	65,0%	42,38%	118,08		
210	56 dias	19,62%	1,52%	1,509	99,13%	0,74	69,6%	42,54%	95,03		
212	56 dias	18,91%	0,81%	1,503	98,75%	0,75	66,5%	42,76%	101,41		
Media		18,77%	0,67%	1,511	99,24%	0,74	66,7%	42,48%	104,89		



S8BCA30											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
251	7 dias	28,46%	1,76%	1,303	98,71%	1,01	73,7%	50,33%	115,17	0,47	0,41
252	7 dias	28,08%	1,38%	1,315	99,62%	0,99	74,1%	49,87%	115,79		
305	7 dias	26,09%	-0,61%	1,329	100,65%	0,97	70,2%	49,36%	114,85		
Média		27,54%	0,84%	1,316	99,66%	0,99	72,7%	49,85%	115,27		



S8BCA30											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
228	28 dias	26,37%	-0,33%	1,312	99,36%	1,00	69,2%	50,00%	129,76	9,25	7,57
229	28 dias	26,91%	0,21%	1,306	98,93%	1,01	70,0%	50,22%	124,78		
250	28 dias	27,44%	0,74%	1,310	99,19%	1,00	71,7%	50,09%	111,85		
Média		26,90%	0,20%	1,309	99,16%	1,00	70,3%	50,11%	122,13		



S8BCBA30											
CP	Tempo de Cura	W mold	Δ W	pd(g/cm³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variancia
225	56 dias	27,59%	0,89%	1,307	99,03%	1,01	71,9%	50,17%	129,40	3,73	2,83
226	56 dias	27,16%	0,46%	1,307	99,03%	1,01	70,8%	50,17%	128,38		
301	56 dias	26,75%	0,05%	1,318	99,84%	0,99	70,9%	49,76%	136,31		
303	56 dias	27,50%	0,05%	1,316	99,66%	0,99	72,6%	49,85%	133,84		
Media		27,25%	0,37%	1,312	99,39%	1,00	71,5%	49,99%	131,98		

