

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

GABRIELA BENTO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UM
SOLO TROPICAL CONTAMINADO COM ÓLEO DIESEL E
TRATADO COM RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO (PDV)

MARINGÁ
2025

GABRIELA BENTO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UM
SOLO TROPICAL CONTAMINADO COM ÓLEO DIESEL E
TRATADO COM RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO (PDV)

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 Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki

Aprovada em 29/01/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki
Universidade Estadual de Maringá- UEM
Professora Orientadora

Prof(a). Dra. Karla Maria Wingler Rebelo
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Prof(a). Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis
Universidade Estadual de Maringá -UEM

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela vida, pelas incontáveis bênçãos e por ter me capacitado e guiado meu caminho até este momento, tornando possível a realização do meu sonho.

Aos meus pais, Sérgio e Conceição Bento, e ao meu irmão, Arthur Benjamim, por acreditarem em mim e por todas as oportunidades que me proporcionaram ao longo da minha vida. Amo muito vocês.

Ao meu amado marido, Lucas Oliveira, pela paciência, pelo apoio incondicional e por me ajudar em todas as etapas desta jornada.

À Universidade Estadual de Maringá, pelo ambiente acadêmico estimulante e pelas oportunidades no desenvolvimento desta pesquisa.

À minha orientadora, professora Juliana Azoia Lukiantchuki, por acreditar no meu trabalho, por sua paciência e por todo o auxílio, permitindo-me concluir esta fase tão significativa da minha vida.

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 e científico, bem como pela disponibilização dos equipamentos e da infraestrutura necessários para a realização dos ensaios experimentais.

Aos técnicos do laboratório de mecânica dos sólidos, Cipriano e Cido, pelo auxílio essencial durante os ensaios.

À minha colega de grupo de pesquisa, Gleicy Cardoso, por todo o apoio e colaboração.

À minha querida tia, em memória, professora Fátima Bento Nunes, por ter investido e apoiado meus estudos. Obrigada por ter passado em nossa vida e por ter plantado muitas sementes. Hoje, estamos colhendo os frutos, e tenho certeza de que você se orgulharia de mim neste momento.

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

RESUMO

A contaminação do solo por óleo diesel é um problema ambiental significativo, especialmente na indústria petroquímica, onde o óleo diesel se destaca como uma das principais fontes de poluição, alterando a qualidade da água e a estrutura do solo. O encapsulamento, consiste em uma técnica eficaz para remediar solos contaminados, neutralizando e retendo poluentes. Entre os métodos de estabilização, a imobilização química se destaca por ser economicamente viável, melhorar o comportamento mecânico do solo e favorecer reações pozolânicas. Convencionalmente tem-se utilizado o cimento Portland e a cal para o tratamento de solos contaminado. Este estudo avaliou os efeitos da contaminação por óleo diesel em um solo laterítico da região de Mandaguaçu-PR (com teores de 2%, 4%, 6% e 8%) e investigou a eficácia do pó de vidro no seu tratamento. Os resultados indicaram que a contaminação reduziu o peso específico seco máximo, a umidade ótima e os limites de Atterberg. A resistência à compressão simples (RCS) diminuiu até 28 dias, mas aumentou após 56 dias nas amostras com 2% e 8% de óleo diesel, possivelmente devido à evaporação do contaminante. A caracterização mineralógica por MEV e DRX indicou que o pó de vidro possui estrutura amorfa, sugerindo atividade pozolânica. O ensaio de pH demonstrou um aumento da alcalinidade, comportamento típico de materiais pozolânicos. Devido à granulometria utilizada neste trabalho, a análise pelo método de Chapelle Modificado não identificou atividade pozolânica no pó de vidro. No entanto, ensaios da composição química do material indicam que ele possui potencial para essa atividade. No ensaio de resistência à compressão simples, amostras com 2% e 8% de óleo diesel foram tratadas com 10%, 20% e 30% de pó de vidro. Observou-se um aumento progressivo da resistência com o tempo de cura, sendo que a amostra com 2% de óleo diesel e 30% de pó de vidro apresentou o maior ganho. Além disso, verificou-se que, para um mesmo tempo de cura e teor de resíduo, a resistência diminuiu com o aumento do teor de óleo diesel. A eficiência do pó de vidro na remediação química foi avaliada por cromatografia gasosa em amostras com 8% de óleo diesel tratadas com 10% e 30% de pó de vidro. Houve redução progressiva dos hidrocarbonetos alifáticos, com destaque para hexacosano e dodecano, sendo a maior eficiência observada com 30% de pó de vidro, sugerindo mecanismos de adsorção e encapsulamento. Os resultados evidenciam o potencial do pó de vidro para a estabilização de solos contaminados, especialmente com ajustes na granulometria para melhorar sua reatividade pozolânica. No entanto, são necessários estudos adicionais para otimizar sua aplicação e avaliar sua viabilidade técnica e econômica em larga escala.

Palavras-chave: Óleo diesel. Solo tropical. Solo contaminado. Resíduo de Pó de vidro.

ABSTRACT

Soil contamination by diesel oil is a significant environmental issue, especially in the petrochemical industry, where diesel stands out as a major source of pollution, impacting water quality and soil structure. Encapsulation is an effective technique for remediating contaminated soils, neutralizing and retaining pollutants. Among stabilization methods, chemical immobilization is notable for being economically viable, improving soil mechanical behavior, and promoting pozzolanic reactions. Conventionally, Portland cement and lime have been used for treating contaminated soils.

This study evaluated the effects of diesel oil contamination on lateritic soil from Mandaguaçu-PR (at levels of 2%, 4%, 6%, and 8%) and investigated the effectiveness of glass powder in its treatment. The results indicated that contamination reduced maximum dry unit weight, optimal moisture content, and Atterberg limits. Simple compression strength (SCS) decreased up to 28 days but increased after 56 days in samples with 2% and 8% diesel oil, possibly due to contaminant evaporation. SEM and XRD mineralogical characterization indicated that glass powder has an amorphous structure, suggesting pozzolanic activity. pH testing showed increased alkalinity, typical of pozzolanic materials. Due to the particle size used in this study, the Modified Chapelle method did not identify pozzolanic activity in glass powder. However, chemical composition tests indicate its potential for such activity.

In the SCS test, samples with 2% and 8% diesel oil were treated with 10%, 20%, and 30% glass powder. Progressive strength increases were observed over curing time, with the 2% diesel oil and 30% glass powder sample showing the highest gain. Moreover, for the same curing time and residue content, strength decreased with increasing diesel oil content. The efficiency of glass powder in chemical remediation was evaluated by gas chromatography in samples with 8% diesel oil treated with 10% and 30% glass powder. There was a progressive reduction in aliphatic hydrocarbons, notably hexacosane and dodecane, with the highest efficiency observed at 30% glass powder, suggesting adsorption and encapsulation mechanisms.

These results highlight the potential of glass powder for stabilizing contaminated soils, particularly with adjustments in particle size to enhance its pozzolanic reactivity. However, further studies are needed to optimize its application and assess its technical and economic feasibility on a large scale.

Keywords: Diesel Oil, Tropical Soil, Contaminated soil, Glass powder residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Áreas cadastradas quanto a classificação da fonte contaminadora.....	18
Figura 2: Fonte da Contaminação das Áreas Contaminadas em Minas Gerais.	19
Figura 3: Origem das Áreas Contaminadas no Estado do Rio de Janeiro	19
Figura 4: Fonte da Contaminação das Áreas Contaminadas no Brasil	19
Figura 5: Constatações de grupos de contaminantes - dezembro de 2020.....	20
Figura 6: Cadeia Produtiva do Vidro	25
Figura 7: Fluxograma da Primeira Etapa da fase Experimental	33
Figura 8: Fluxograma da Segunda Etapa da fase Experimental	34
Figura 9: Coleta das Amostras	35
Figura 10: Secagem do Solo em temperatura ambiente.....	36
Figura 11: Empresa Cristal Sete – Apucarana PR.....	39
Figura 12: Resíduo obtido no processo final da lapidação do vidro	39
Figura 13: Moinho de Barras	40
Figura 14: Estágios do Resíduo de Pó de Vidro.....	40
Figura 23: Curvas Granulométrica.....	42
Figura 15: Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	44
Figura 16: Difratoograma de raios-X do pó de vidro.....	45
Figura 17: Fases da amostra de pó de vidro – Literatura	45
Figura 18: Fases das amostras de PDV	46
Figura 19: DRX Solo Natural	46
Figura 20: Solo seco em estufa	50
Figura 21: Solo contaminado armazenado em sacos Plásticos	50
Figura 22: Amostras de solo contaminado com óleo diesel e tratado com pó de vidro	52
Figura 24: Identificação do ponto de viragem	57
Figura 25: Classificação Mini-MCV.....	57
Figura 26: Ensaio de Resistência a Compressão Simples.....	58
Figura 27: Ensaio de Limite de Liquidez- SN + 6% OD	61
Figura 28: Influência do teor de óleo nos limites de Atterberg	61
Figura 29: Curva de Compactação- Solo Natural	64
Figura 30: Acúmulo de óleo na superfície dos corpos de prova	65
Figura 31: Adição de água ao solo contaminado para o ensaio de Compactação.....	66
Figura 32: Curva de Compactação Solo.....	67
Figura 33: Variação da massa específica seca máxima e da umidade ótima.....	67

Figura 34: Curvas de Compactação do SOD2% Tratado com PDV	68
Figura 35: Influencia do teor de PDV na umidade ótima - 2%OD	68
Figura 36: Influencia do teor de PDV na massa específico - 2%OD	68
Figura 37:Curvas de Compactação do SOD8% Tratado com PDV	69
Figura 38: Influência do teor de PDV na umidade ótima- 8%OD	69
Figura 39:Influencia do teor de PDV na massa específica solo - 8%OD	69
Figura 40: RCS amostras Contaminadas com OD	71
Figura 41:Ensaio de Resistencia a Compressão Simples – SOD2%+30%PDV	73
Figura 42:Condições dos Corpos de prova - 2%OD	75
Figura 43: Condições dos Corpos de prova -8%OD	76
Figura 44: Condições dos Corpos de Prova-2%OD	78
Figura 45: Condições dos Corpos de Prova-8%OD	78
Figura 46: Normalização das Resistências com relação ao Solo Natural	79
Figura 47: Cromatografia Gasosa Solo contaminado com diesel e tratado com PDV .	80
Figura 48 : Normalização da Cromatografia.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise de Combustível - UEM.....	37
Tabela 2: Análise do combustível - LACAUT	38
Tabela 6: Análise granulométrica.....	42
Tabela 7: Caracterização Geotécnica do Solo	42
Tabela 8 : Granulometria do PDV.....	43
Tabela 3: Componentes químicos do PDV	47
Tabela 4: Componentes químicos do Solo	48
Tabela 5: Misturas utilizadas na pesquisa	51
Tabela 9: Caracterização Química do Solo	54
Tabela 10: Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno.....	56
Tabela 11: CTC de determinados coloides do solo em ambientes tropicais	56
Tabela 12: Limites de Attemberg - Solo Contaminado	61
Tabela 13: Limites de Attemberg - Solo Contaminado tratado com PDV	62
Tabela 14: pH das amostras de Solo Natural e das Misturas	64
Tabela 15: Resistência a Compressão Simples – Solo contaminado com OD (kPa)	70
Tabela 16: Resistência a Compressão simples de solo contaminado tratado com PDV	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVIDROS	Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
CaO	Óxido de cálcio
CBR	California Bearing Ratio - Índice de Suporte Califórnia
Cl	Cloro
COMCAP	Complexo Central de Apoio a Pesquisa
CP	Corpo de Prova
Cr_2O_3	Óxido de cromo
CTC	Capacidade de Troca Cationica
EPA	Environmental Protection Agency
Fe_2O_3	Óxido de ferro
HPAs	Hidrocarboneto Policíclicos aromáticos
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IP	Índice de Plasticidade
K_2O	Óxido de potássio
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
Meq/100g	Miliequivalentes por 100 gramas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MnO	Óxido de manganês
MO	Matéria Orgânica
NiO	Óxido de níquel
NCG	Normalização da Cromatografia Gasosa
NRSC	Normalização da Resistência a Compressão Simples
OD	Óleo Diesel
ph	Potencial Hidrogeniônico
PDV	Pó de vidro
RCS	Resistencia a Compressão Simples
ρ_d	Massa específica seca
$\rho_{dm\acute{a}x}$	Massa específica seca máxima
SE	Área Específica
SETCESP	Sindicato das Empresas de Transportes de São Paulo SP- São Paulo

SN	Solo Natural
SOD2%+10%PDV	Solo contaminado com 2% de óleo diesel e tratado com 10% de pó de vidro
SOD2%+20%PDV	Solo contaminado com 2% de óleo diesel e tratado com 20% de pó de vidro
SOD2%+30%PDV	Solo contaminado com 2% de óleo diesel e tratado com 30% de pó de vidro
SOD8%+10%PDV	Solo contaminado com 8% de óleo diesel e tratado com 10% de pó de vidro
SOD8%+20%PDV	Solo contaminado com 8% de óleo diesel e tratado com 20% de pó de vidro
SOD8%+30%PDV	Solo contaminado com 8% de óleo diesel e tratado com 30% de pó de vidro
SO ₃	Trióxido de enxofre
TiO ₂	Dióxido de titânio
UEM	Universidade Estadual de Maringá
V ₂ O ₅	Pentóxido de vanádio
V _b	Valor de Coloração do Solo
W _{ot}	Umidade Ótima
γ _d	Peso Específico Seco
γ _{dmax}	Peso Específico Seco Máximo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR ÓLEO DIESEL	17
3.1.1 Efeito da contaminação por óleo diesel nas propriedades geotécnicas e resistência do solo	21
3.2 ESTABILIZAÇÃO E ENCAPSULAMENTO	23
3.3 VIDRO	24
3.4 RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO	26
3.4.1 Atividade pozolânica do PDV	27
3.4.2 Estudos sobre as Aplicações do Resíduo de PDV.....	29
3.5 SOLO COMPACTADO	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1 MATERIAIS	35
4.1.1 Solo	35
4.1.2 Óleo diesel.....	36
4.1.3 Pó de vidro (PDV).....	39
4.1.4 Análise granulométrica – Solo Natural e Pó de Vidro	41
4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	43
4.3 DRX - Difração de Raios-X.....	44
4.4 FRX- - Fluorescência de raio-x.....	46
4.5 pH.....	48
4.6 ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	48
4.7 MISTURA DE SOLO E ÓLEO DIESEL	49

4.8 MISTURA - SOLO ÓLEO DIESEL E ADIÇÃO DE PDV	51
4.9 ENSAIOS GEOTÉCNICOS	52
4.9.1 Ensaios de Caracterização Química	52
4.9.2 Ensaio para avaliação do comportamento laterítico do solo	54
4.9.3 Ensaio de Compactação - (Proctor Normal)	57
4.9.4 Determinação da resistência à compressão simples (RCS)	58
4.10 CROMATOGRAFIA GASOSA.....	59
5. RESULTADOS	60
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	60
5.2 pH.....	62
5.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	64
5.3.1 Solo Natural	64
5.3.2 Solo contaminado com diferentes teores de Óleo Diesel.....	65
5.3.3 Solo contaminado com óleo diesel e tratado com PDV	67
5.4 RESISTENCIA A COMPRESSÃO SIMPLES.....	69
5.4.1 Solo contaminado com diferentes teores de Óleo Diesel.....	70
5.4.2 Solo contaminado óleo diesel e tratado com PDV	71
5.5 CROMATOGRAFIA	79
6. CONCLUSÃO	82
7. BIBLIOGRAFIA	84

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O mundo contemporâneo depende cada vez mais do petróleo e de seus derivados para sustentar suas atividades industriais. No entanto, durante os processos de exploração, refino, transporte e armazenamento do petróleo e seus derivados, há o risco de derramamentos acidentais, que resultam na contaminação de solos, rios e outros ecossistemas. A contaminação do solo por óleo diesel é um dos maiores desafios ambientais decorrentes da expansão da indústria petroquímica. No Brasil, essa questão é particularmente grave devido à alta incidência de vazamentos em postos de combustíveis e instalações de armazenamento.

De acordo com o Sindicato das Empresas de Transporte de São Paulo (SETCESP, 2021), combustíveis como etanol, óleo diesel e gasolina estão entre as principais causas de acidentes nas estradas. Tais incidentes podem ocorrer durante o transporte por caminhões e embarcações, nas etapas de armazenamento em terminais petroquímicos, nos distribuidores e nos postos de combustíveis. Além disso, a vasta rede de dutos utilizada para abastecer regiões sem transporte ferroviário ou rodoviário constitui uma fonte significativa de acidentes. Quebras nessas tubulações, que transportam grandes volumes de petróleo diariamente, resultam em vazamentos, provocando a contaminação do ar, da água e do solo, ampliando assim os impactos ambientais.

Al-Hamaiedh e Maaitah (2011) apontam que a contaminação do solo por petróleo não afeta apenas o meio ambiente, mas também gera impactos negativos na segurança das estruturas de engenharia civil. A contaminação por produtos petroquímicos tem se tornado uma preocupação crescente. Bonna et al. (2011) explicam que, quando o óleo diesel entra em contato com o solo, ele provoca uma série de efeitos físicos, químicos e biológicos.

Autores como Portelinha et al. (2021) enfatizam os riscos ambientais associados aos derramamentos acidentais de óleo e vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo de combustível, identificando-os como fontes potenciais de contaminação. Frequentemente, o solo é o receptor desses derramamentos, sendo responsável pela capacidade de percolar, reter ou liberar os hidrocarbonetos. As consequências dessa contaminação abrangem diversos aspectos, como desequilíbrios e perdas na cadeia alimentar, poluição das águas subterrâneas, redução da produtividade agrícola, contaminação de fontes de água e a perda da capacidade de resistência do solo, comprometendo sua estrutura e funcionalidade.

Daka (2015) destaca a relevância de estudar as mudanças nas propriedades de resistência mecânica do solo em decorrência da contaminação. Pandey e Bind (2012) ressaltam a importância de avaliar os impactos da contaminação por óleo nas propriedades do solo para uma aplicação específica, uma vez que mudanças adversas podem comprometer as características necessárias para suportar estruturas de engenharia.

A crescente demanda por métodos eficazes para a recuperação de solos contaminados tem impulsionado pesquisas e aplicações tanto no âmbito nacional quanto internacional. De acordo com Knop (2009), o encapsulamento, também referido na literatura como estabilização e solidificação de solos contaminados, é uma abordagem amplamente estudada. Conforme descrito pela Environmental Protection Agency (EPA) em um documento de 1982, essas técnicas têm como objetivo reduzir a transferência e lixiviação de poluentes, além de minimizar a solubilidade de substâncias perigosas. Esse efeito é obtido por meio da adição de agentes cimentantes, como cimento ou cal, que promovem o completo envolvimento das partículas contaminadas, restringindo sua mobilidade no solo.

Rojas et al. (2007) focaram no encapsulamento de solos contaminados com óleo ácido, utilizando cimento Portland. Esse processo resulta na cimentação das partículas, diminuindo a mobilidade do contaminante no solo, e esse efeito pode ser ampliado tanto pela alcalinização do ambiente quanto pela cimentação das partículas. Fugaro et al. (2004) destacaram que métodos como imobilização *in situ* e estabilização química são economicamente viáveis, pois não afetam negativamente a hidrologia, a paisagem ou os ecossistemas naturais, ao contrário das técnicas convencionais que requerem escavação e remoção do solo contaminado.

Em um estudo realizado por Cordeiro (2007), foi analisada a estabilização de solos contaminados com óleo, utilizando cal como aglomerante. Os resultados mostraram que o aumento do teor de cal no solo levou a um aumento da umidade, redução da massa específica e ganhos de resistência (CBR), além de uma diminuição significativa nos valores de expansão, com esses efeitos se intensificando conforme o teor de cal aumentava.

Esses estudos evidenciam a importância de técnicas como biorremediação e encapsulamento, além de ressaltar a viabilidade econômica de métodos como imobilização *in situ* e estabilização química para a recuperação de solos contaminados, sem causar impactos adversos nos ecossistemas.

Considerando o crescente desafio da gestão de resíduos industriais, que têm se mostrado uma ameaça significativa ao meio ambiente devido à sua natureza não biodegradável e à disposição inadequada, é crucial buscar alternativas que revertam esse quadro. A reciclagem e reutilização desses materiais na produção de itens úteis à sociedade, como na construção civil, surge como uma solução promissora. A Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro (ABRAVIDRO) reportou que, em 2021, a produção de vidro alcançou cerca de 59 milhões de metros quadrados, com quase 80% dessa produção destinada à construção civil. No entanto, a produção em larga escala gera uma quantidade considerável de resíduos, o que exige processos de reciclagem e destinação ambiental para atender às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Segundo Barros (2016), quando o vidro é finamente moído, ele contém a quantidade adequada de sílica amorfa (SiO_2) e, ao reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido em água, forma compostos hidratados semelhantes aos gerados pelos materiais pozolânicos. O resíduo de pó de vidro (PDV), conforme apontado por Shi et al. (2005), apresenta atividade pozolânica, a qual se intensifica com a redução da granulometria. Em uma pesquisa de Olufowobi et al. (2014), que analisaram a adição de pó de vidro a solos tropicais, foi observado que, quando misturado ao solo, o vidro atua como uma pozolâna, reagindo com o hidróxido de cálcio na presença de água e a temperatura ambiente, formando compostos insolúveis, como silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado, os quais contribuem para o aumento da resistência do solo.

Estudos de Benny et al. (2017), Castro et al. (2019) e Javed e Chakraborty (2020) mostram que a adição de resíduo vítreo, como vidro moído, melhora a resistência mecânica do solo, tornando-o adequado para especificações geotécnicas em obras civis. Além disso, essa prática reduz os danos ambientais e oferece uma solução econômica, pois o material é de baixo custo e facilmente disponível. Porto Junior (2024) estudou o uso do pó de vidro BLINDEX® como substituto parcial do cimento em misturas solo-cimento para pavimentação. Devido à sua granulometria fina, o pó de vidro melhora as propriedades mecânicas das misturas, mostrando um grande potencial para substituir o cimento por resíduo de vidro industrial, conforme os resultados dos ensaios realizados.

Este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da contaminação por óleo diesel nas propriedades físicas, químicas e geotécnicas de um solo tropical. A pesquisa investigará a viabilidade do tratamento com adição de pó de vidro, realizando ensaios em solos naturais e contaminados. Serão analisadas as propriedades físicas, químicas e mineralógicas utilizando técnicas como ensaios geotécnicos, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (FRX), cromatografia gasosa e resistência à compressão simples, incluindo as misturas tratadas com pó de vidro.

Também serão avaliados os efeitos dos períodos de cura com a adição do pó de vidro. A eficácia do tratamento será monitorada, com ênfase na análise do comportamento químico por cromatografia gasosa, visando comprovar o potencial do pó de vidro como uma solução sustentável para o tratamento de solos contaminados.

Este estudo é relevante frente à crescente demanda por práticas sustentáveis na gestão de resíduos sólidos, alinhando-se aos rigorosos padrões ambientais. A proposta oferece uma abordagem inovadora para mitigar os impactos da contaminação do solo por óleo diesel, com benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a indústria, avançando em soluções ambientalmente adequadas na gestão de resíduos industriais.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo tropical contaminado com óleo diesel e tratado com resíduo de pó de vidro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar os efeitos dos diferentes teores de óleo diesel e PDV nas propriedades de compactação do solo e das misturas. Analisar a influência do óleo diesel e do PDV na resistência à compressão simples (RCS) ao longo de diferentes períodos de cura. Estudar a eficácia do tratamento com o PDV por meio de cromatografia gasosa e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Avaliar análises qualitativas utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) para interpretar os resultados experimentais obtidos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR ÓLEO DIESEL

A contaminação do solo por combustíveis à base de hidrocarbonetos, em especial o óleo diesel, constitui um grave problema ambiental no Brasil, reflexo do amplo uso e da importância desse derivado do petróleo em diversas atividades econômicas. Segundo Agostini (2012), o contato direto de efluentes líquidos com o solo configura uma das principais causas de poluição das águas subterrâneas, sendo os vazamentos em postos de combustíveis, tubulações, tanques de armazenamento e instalações de abastecimento fontes frequentes dessa contaminação, como também destacado por Chiaranda (2011).

O óleo diesel é o combustível mais utilizado no país, indispensável para o transporte rodoviário de passageiros e cargas, além de aplicações em máquinas pesadas, embarcações, locomotivas e geradores estacionários como indicado pela CNT (Companhia Nacional do transporte) (2012). Sua composição química, que inclui hidrocarbonetos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno), parafinas, aromáticos e compostos contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio, bem como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, confere-lhe alta toxicidade e persistência no ambiente (Schwab et al., 1987; Sousa, 2012). Essa complexidade química agrava os riscos de contaminação e os impactos negativos à saúde humana e ao ecossistema, conforme observado por Margesin et al. (2004).

Souza et al. (2008) ressaltam que a contaminação do solo com óleo diesel pode ocorrer devido à composição química do combustível e às falhas nos processos de transporte e armazenamento. Dados da ANP indicam que em dezembro de 2022, o Brasil vendeu 5,04 milhões de m³ de diesel e importou cerca de 15,9 milhões de m³, evidenciando o crescimento do consumo alinhado ao avanço da sociedade. No entanto, conforme Maciel et al. (2015) destacam, acidentes envolvendo o vazamento de produtos derivados do petróleo podem contaminar o solo e aquíferos, comprometendo fontes de abastecimento de água e gerando sérias consequências ambientais. Portelinha et al. (2021) complementam que os vazamentos também provocam alterações nas propriedades físicas e geotécnicas do solo, ampliando os riscos ambientais.

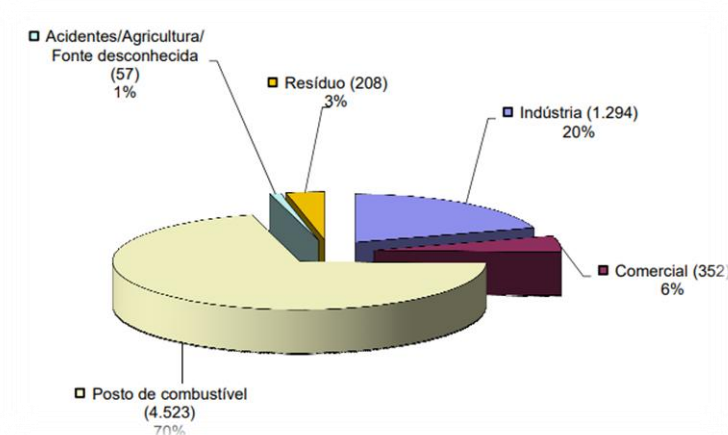
A distribuição de áreas registradas pela CETESB (2020) revela que postos de combustíveis são responsáveis por 70% dos casos de potencial contaminação, seguidos de atividades industriais (20%) e comerciais (3%). Essas estatísticas reforçam a necessidade de monitoramento constante e adoção de medidas preventivas.

Diante desse cenário, a realização de estudos sobre a contaminação do solo é de suma importância para compreender os mecanismos de poluição, desenvolver tecnologias de remediação e promover práticas sustentáveis. O avanço científico e tecnológico é crucial para

mitigar os impactos adversos do uso intensivo de óleo diesel e preservar os recursos naturais, garantindo a qualidade ambiental e a saúde pública.

A Figura 1 publicada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo CETESB (2020), exibe a distribuição das áreas registradas conforme o tipo de atividade que pode potencialmente gerar contaminação, os postos de combustíveis ocupam a posição predominante, totalizando 4.523 (70%), seguido das atividades industriais que somam 1294 (20%), atividades comerciais compreendem 208 (3%) das instalações destinadas à gestão de resíduo. Por fim, os casos de acidentes, agricultura e fontes de contaminação de origem desconhecida correspondem a 57 (1%).

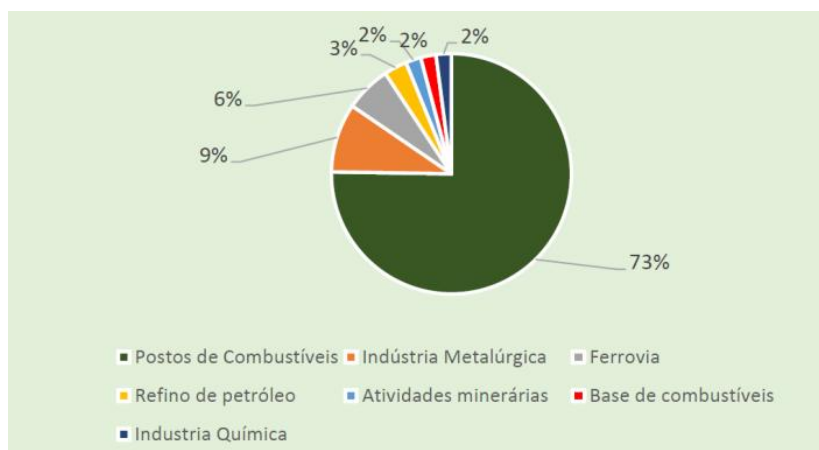
Figura 1: Áreas cadastradas quanto a classificação da fonte contaminadora



Fonte: CETESB (2020)

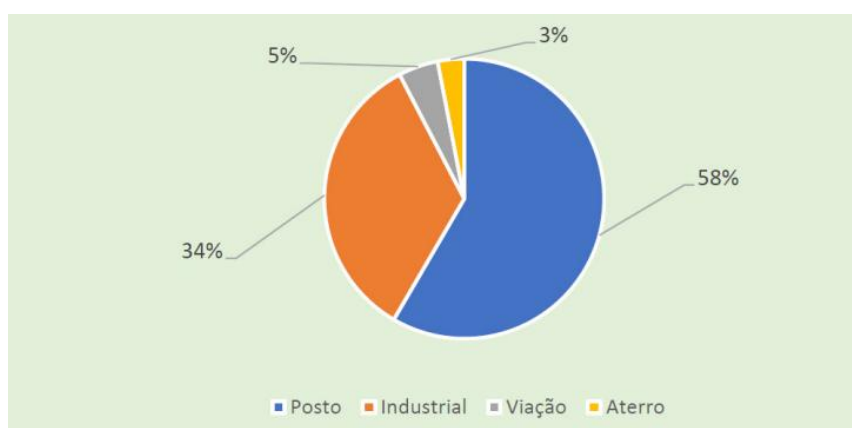
Os postos de combustíveis são amplamente reconhecidos como a principal fonte de contaminação ambiental. No Estado de São Paulo, eles são responsáveis por 70% dos casos de contaminação. Essa proporção é ainda maior em Minas Gerais, onde, conforme mostrado na Figura 2 alcança 73% das áreas contaminadas. Já no Estado do Rio de Janeiro, como ilustrado na Figura 3, os postos de combustíveis representam 58% das fontes de contaminação.

Figura 2: Fonte da Contaminação das Áreas Contaminadas em Minas Gerais.



Fonte: Agência Nacional de Qualidade Ambiental Urbana (2020)

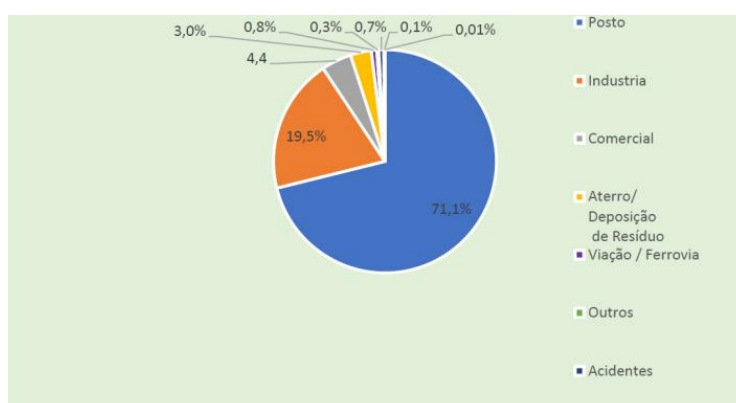
Figura 3: Origem das Áreas Contaminadas no Estado do Rio de Janeiro



Fonte: Agencia Nacional de Qualidade Ambiental Urbana (2020)

A nível nacional, conforme ilustrado na Figura 6, os postos de combustíveis detêm a liderança, contribuindo com 71,1% da origem das contaminações nas áreas do país.

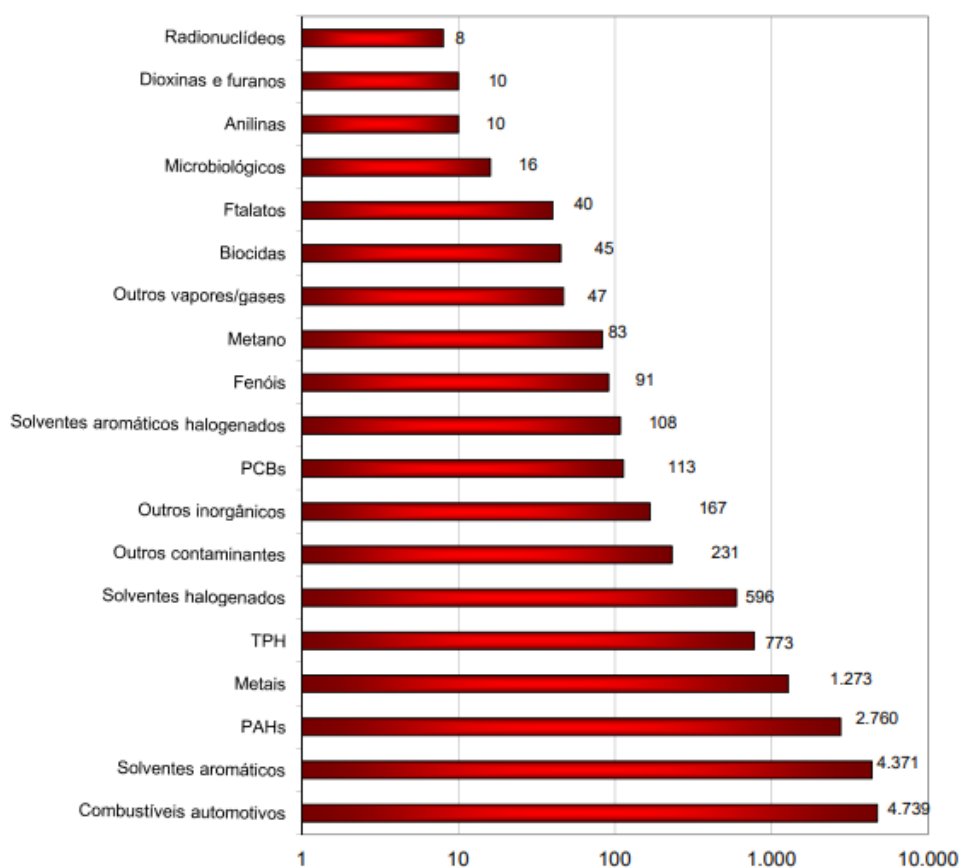
Figura 4: Fonte da Contaminação das Áreas Contaminadas no Brasil



Fonte: Agência Nacional de Qualidade Ambiental Urbana (2020)

Os dados fornecidos pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) em 2020 revelam que os principais grupos de poluentes identificados nas áreas monitoradas em São Paulo estão fortemente associados à comercialização e uso de combustíveis. Dentre esses poluentes, destacam-se os solventes aromáticos, que incluem substâncias como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, amplamente presentes em combustíveis e processos industriais. Além disso, os combustíveis utilizados em veículos e os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) também figuram entre os contaminantes mais comuns. Outro grupo significativo de poluentes são os metais pesados e os solventes que contêm halogênios, que podem ter impactos nocivos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde pública. A distribuição e os tipos específicos desses poluentes nas áreas analisadas podem ser visualizados na Figura 5.

Figura 5: Constatações de grupos de contaminantes - dezembro de 2020



Fonte: CETESB (2020)

A presença de áreas contaminadas apresenta preocupações críticas, não apenas relacionadas ao risco de explosões e incêndios, mas também aos graves danos à saúde humana e aos ecossistemas. Conforme descrito por Sánchez (1998), os efeitos adversos da contaminação são intensificados por processos contínuos e de longo prazo, resultando em um aumento

expressivo na incidência de doenças em indivíduos expostos a substâncias químicas presentes em águas subterrâneas contaminadas. A exposição ocorre predominantemente por meio de contato dérmico, ingestão de partículas de solo, especialmente em crianças e trabalhadores, inalação de vapores tóxicos e consumo de alimentos cultivados com água poluída.

Além dos impactos sobre a saúde pública, a contaminação também restringe os usos potenciais do solo, comprometendo diretamente o planejamento e o desenvolvimento urbano. Essas limitações impõem barreiras econômicas significativas, reduzindo o valor imobiliário e dificultando a implementação de novos projetos e investimentos na área afetada. Nesse contexto, estudos sobre áreas contaminadas são fundamentais para compreender os impactos ambientais e socioeconômicos, orientar ações de remediação e promover um desenvolvimento sustentável.

3.1.1 Efeito da contaminação por óleo diesel nas propriedades geotécnicas e resistência do solo

Shah et al. (2002) realizaram um estudo focado no complexo petroquímico próximo a Vadodara, no estado de Gujarat, Índia, em que o solo investigado foi classificado como argila de baixa plasticidade, conforme a Classificação Unificada de Solos (SUCS). A contaminação do solo por óleo diesel resultou em uma elevação dos Limites de Atterberg, associados a uma redução nos valores de resistência à compressão não confinada, coesão, ângulo de atrito interno e permeabilidade. Segundo Shridharan e Sivapulliah (1987), a elevação nos Limites de Atterberg pode ser explicada pelo aumento da espessura da camada dupla dos minerais argilosos, como caulinita, clorita e ilita, devido à presença de óleo diesel.

Portelinha et al. (2021) descreveram que o óleo diesel atua como uma camada sobre as partículas do solo, o que compromete a capacidade de absorção de água, trocas catiônicas e reações químicas. Os pesquisadores observaram que, mesmo em pequenas quantidades, o diesel alterou a compactação do solo, evidenciada por uma redução significativa nas densidades máximas secas (ρ_{dmax}) e um aumento nas umidades ótimas de compactação. Esses efeitos foram atribuídos à dispersão das partículas de argila e à lubrificação dos poros, conforme observado previamente por Alsanad et al. (1995). Além disso, a resistência à compressão não confinada foi afetada pela contaminação por óleo diesel, com uma redução de aproximadamente 70% quando comparada à resistência do solo não contaminado.

Ijimdiya (2013) investigou os impactos do óleo diesel em solos lateríticos e observou que, à medida que a concentração de contaminante aumentava de 0% para 8%, houve uma diminuição na proporção de partículas de granulometria fina. O autor descreve que o óleo diesel, ao entrar em contato com o solo, promove um fenômeno de aglomeração das partículas presentes no meio. Esse processo ocorre devido às propriedades físico-químicas do óleo, que favorecem a

adesão de partículas menores, levando à formação de aglomerados maiores. Esse fenômeno é denominado "pseudo-areia" porque os aglomerados formados possuem aparência semelhante à de partículas maiores, como grãos de areia. Essa alteração modifica a distribuição do tamanho das partículas no solo contaminado, diferenciando-o significativamente do solo não contaminado, as mudanças na granulometria afetam diretamente as propriedades físicas e químicas do solo.

Khamehchivan et al. (2007) investigaram os efeitos da contaminação por óleo derivado do petróleo em solos localizados na planície costeira do sul do Irã, próximo ao Golfo Pérsico. O estudo revelou que a presença de óleo reduziu os Limites de Atterberg, que são parâmetros utilizados para avaliar a consistência e a plasticidade dos solos. Essa redução foi atribuída à interação entre a água presente na matriz dos minerais argilosos e os fluidos apolares e viscosos do óleo, que interferem nas propriedades de coesão e plasticidade do solo. Além disso, a adição de óleo ao solo levou à diminuição da massa específica seca e da umidade ótima, características importantes para determinar a densidade máxima que o solo pode alcançar sob compactação e a quantidade ideal de água para tal. Quanto à resistência ao cisalhamento, os resultados variaram conforme o tipo de solo analisado, mas, de forma geral, o pico de resistência ao cisalhamento foi reduzido. Esse comportamento sugere que a presença do óleo altera as interações internas entre as partículas do solo, afetando negativamente sua estabilidade e capacidade de suportar esforços mecânicos.

Mucha e Trzcinski (2008) relataram que, após a contaminação de uma amostra de argila com óleo diesel, as partículas de argila sofreram uma alteração em sua microestrutura, resultando em uma estrutura mais densa devido à modificação na distribuição do tamanho dos poros.

Knop (2003) conduziu experimentos de lixiviação em coluna, medição da condutividade hidráulica utilizando um permeâmetro de parede flexível, ensaios de resistência à compressão não confinada e análise fotomicrográfica com o objetivo de avaliar a eficácia de processos de remediação aplicados a um solo residual proveniente do arenito Botucatu. Observou que, à medida que o teor de óleo aumentava, ocorria uma diminuição na resistência do solo e um aumento no volume total de líquido lixiviado.

Salimnezhad et al. (2021) concluíram que o limite de plasticidade de solos contaminados com petróleo bruto aumentou conforme a concentração do contaminante aumentava, enquanto o índice de plasticidade diminuiu com o aumento da concentração de contaminantes. Além disso, constataram que o recalque do solo contaminado aumentou à medida que a concentração de óleo diesel crescia, uma vez que o contaminante reduziu a área superficial específica do solo, diminuindo sua capacidade de absorção de água e facilitando a drenagem.

3.2 ESTABILIZAÇÃO E ENCAPSULAMENTO

De acordo com Knop (2009), a técnica de estabilização e solidificação de solos contaminados, também chamada de encapsulamento, tem se mostrado eficaz na redução da contaminação por hidrocarbonetos e metais pesados. Essa abordagem envolve a remoção da água livre por meio da hidratação de agentes cimentantes, como o cimento, que foi introduzido inicialmente na década de 1960 para o tratamento de resíduos nucleares (Park, 2000; Nyavor et al., 2003).

Heineck (2007) define o encapsulamento como uma técnica que visa criar uma estrutura monolítica sólida e quimicamente estável, capaz de imobilizar contaminantes sem modificar suas propriedades físicas essenciais. Além do cimento, materiais como cinza volante, cal, escórias siderúrgicas, silicatos solúveis e argilas são comumente utilizados nesse processo. Segundo a Environmental Protection Agency (EPA, 1991), a estabilização, por sua vez, reduz a solubilidade dos poluentes através de reações químicas, contribuindo para a imobilização dos contaminantes e aumentando a segurança ambiental do solo tratado.

Wiles (1987) destaca que o encapsulamento isola contaminantes com uma membrana impermeável, sendo realizado em microencapsulamento (partículas individuais revestidas) e macroencapsulamento (aglomerados de partículas microencapsuladas). Mecanismos adicionais incluem absorção (adição de sólidos que reagem com a água livre) e reações pozolânicas, como a interação de cal com sílica e alumina amorfa da cinza volante, formando uma matriz cimentada para maior resistência no solo contaminado.

Segundo o USACE (1995), na prática, o uso de reagentes inorgânicos como cimento Portland, cinza volante, cal e cimento é preferível devido à sua eficácia e à minimização de riscos associados aos reagentes orgânicos. O processo de solidificação/estabilização com esses reagentes geralmente segue três etapas principais: reação química inicial com a água presente, transformação dos contaminantes em formas insolúveis e encapsulamento dos produtos resultantes para reduzir a mobilidade dos poluentes no ambiente.

Segundo Perez (2017), 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. 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.

Cardoso (2024) enfatiza que estabilizantes químicos têm um efeito positivo no comportamento mecânico do solo, promovendo o aumento da troca catiônica e incentivando reações pozolânicas. O processo de encapsulamento, que envolve a adição de agentes cimentantes como cimento ou cal, contribui para a redução da solubilidade ou fixação de contaminantes,

encapsulando as partículas. Essa técnica pode ser classificada em dois tipos principais: microencapsulamento, que se destina a partículas individuais, e macroencapsulamento, voltado para aglomerados de partículas, ambos melhorando a trabalhabilidade, resistência, permeabilidade e outras propriedades do solo contaminado.

Oliveira et al. (2003), Benny et al. (2017), Castro et al. (2019) e Javed e Chakraborty (2020) reconhecem os benefícios do encapsulamento e da adição de resíduos vítreos como pó de vidro, melhorando propriedades mecânicas e geotécnicas do solo contaminado, especialmente com óleo diesel. Estudos como os de Chen et al. (2017) e Knop (2003) também evidenciam melhorias na resistência mecânica e nas propriedades de lixiviação através do uso de cimento, cal e outros estabilizantes.

Portelinha e Correia (2018) utilizaram cal para encapsular solo areno-argiloso contaminado com óleo diesel, recuperando ou melhorando suas propriedades mecânicas. Este estudo especificamente explora o uso de pó de vidro para estabilizar solo contaminado com óleo diesel, alinhando-se às tendências recentes e aos benefícios econômicos e ambientais associados ao material.

3.3 VIDRO

Os vidros são materiais cerâmicos não cristalinos formados principalmente por silicatos, que contêm uma variedade de óxidos, como os de cálcio, sódio, potássio e alumínio. A composição química desses óxidos desempenha um papel crucial na definição das propriedades do vidro, particularmente sua transparência óptica e facilidade de fabricação, conforme destacado por Callister e Rethwisch (2012). Embora o vidro seja amplamente conhecido por sua transparência e fragilidade, variações em sua composição química resultam em propriedades distintas, possibilitando uma ampla gama de aplicações.

A produção de vidro, como mostra a Figura 6, envolve a fusão de matérias-primas, como sílica (areia), calcário, soda cáustica e outros aditivos, a temperaturas superiores a 1.200°C. Nesse processo, os materiais se transformam em um líquido viscoso que, ao ser resfriado, se solidifica, adquirindo a forma desejada. Após a produção, o vidro pode passar por tratamentos adicionais, como temperagem ou laminação, para atender a requisitos específicos, conforme relatado por Worrell et al. (2001) e Taha et al. (2003).

Estudos laboratoriais conduzidos por Chen et al. (2002) revelaram que a composição química dos vidros varia mais significativamente em função de sua aplicação do que em relação à sua cor ou origem. Essa versatilidade é confirmada por Alves, Gimenez e Mazali (2001), que ressaltam as distintas propriedades dos vidros à base de sílica, como resistência térmica, mecânica e química, além de suas características ópticas e isolantes. Dentre os exemplos de vidros estão o

silicato de sódio, amplamente empregado em detergentes e na limpeza de metais; o silicato sódio-cálcico, presente em garrafas, janelas e embalagens; e o borossilicato, utilizado em instrumentos laboratoriais devido à sua alta resistência térmica. Outros exemplos incluem o alumino silicato, aplicado em fibras e materiais resistentes ao fogo; o silicato de chumbo, utilizado na fabricação de utensílios decorativos e ópticos; e o vidro de alta sílica, que, devido à sua elevada resistência e pureza, é usado em equipamentos laboratoriais e fibras ópticas.

De acordo com a Confederação Nacional do Ramo Químico (CNQ), a indústria vidreira é organizada em segmentos distintos conforme os produtos desenvolvidos. No Brasil, a produção concentra-se principalmente nos setores de vidros planos e vidros domésticos, que atendem a diversas demandas do mercado industrial e de consumo, como por exemplo:

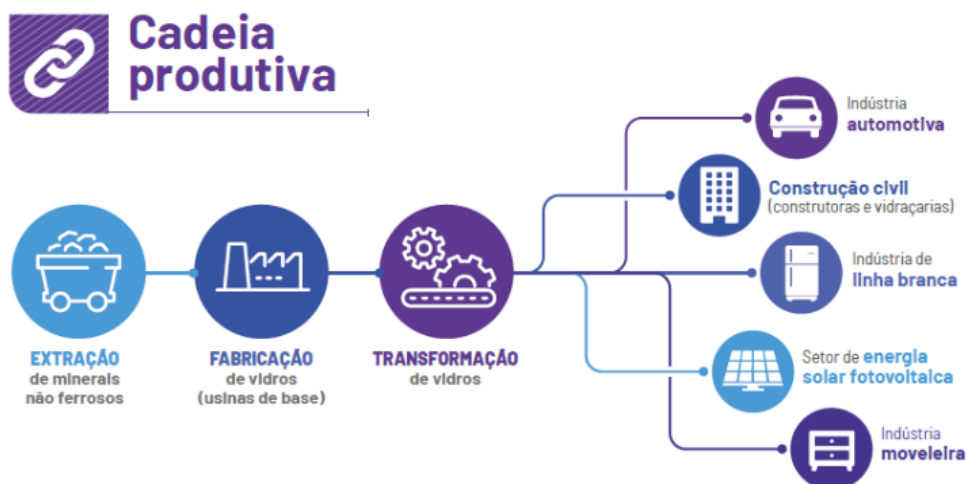
Embalagens de vidro: Essenciais para os setores de bebidas e alimentos, além de aplicações em produtos farmacêuticos e cosméticos.

Vidros planos: Produzidos em chapas, têm ampla utilização na construção civil, indústria automobilística, setor moveleiro e decoração de interiores.

Vidros especiais (técnicos): Incluem lãs e fibras de vidro para isolamento térmico, tijolos e blocos de vidro, isoladores elétricos, ampolas farmacêuticas e bulbos de lâmpadas.

Em 2021, a ABRAVIDRO (Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano) relatou uma produção de cerca de 59 milhões de metros quadrados de vidro, destinados a setores como a construção civil e a indústria automotiva. No entanto, a alta demanda por vidro gera grandes volumes de resíduos, ressaltando a importância de estratégias eficazes de gestão e reciclagem. Essas medidas são cruciais para mitigar os impactos ambientais e promover o uso sustentável dos recursos naturais.

Figura 6: Cadeia Produtiva do Vidro



Fonte: ABRAVIDRO (2022)

A destinação final dos resíduos de vidro tem se tornado uma questão de crescente relevância, conforme indicado pela CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que enfatiza a importância da adoção de práticas adequadas para o gerenciamento e reciclagem desses materiais. A implementação de estratégias eficientes é essencial para reduzir os impactos ambientais e promover a sustentabilidade, alinhando-se aos objetivos de economia circular e conservação dos recursos naturais.

3.4 RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO

Tuaum, Shitote e Oyawa (2018) destacam que o gerenciamento de resíduos sólidos não degradáveis, como o vidro, representa um desafio significativo para países em desenvolvimento. O crescimento acelerado da população, aliado à urbanização e ao progresso econômico, tem impulsionado a geração de resíduos, resultando em impactos severos para o meio ambiente e a saúde pública.

No Brasil, a gestão de resíduos sólidos, incluindo o vidro, é regulamentada pela Resolução CONAMA nº 307/2002 e pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). Essas normas estabelecem diretrizes específicas para o descarte e a reciclagem desses resíduos. O vidro é classificado como resíduo da classe A, que engloba materiais recicláveis como concreto, argamassa e vidro, ou da classe B, destinada a resíduos recicláveis contaminados ou misturados, como plásticos, papéis, metais e vidros não segregados. Esses materiais devem ser devidamente segregados, armazenados e descartados de forma adequada, sendo proibido o descarte inadequado.

A legislação também incentiva a logística reversa, um sistema que envolve a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, comerciantes e consumidores ao longo do ciclo de vida do produto. Além disso, a norma exige o desenvolvimento de Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil para garantir a destinação ambientalmente correta dos resíduos e mitigar os impactos ambientais.

A Cristal Sete, empresa especializada no fornecimento e processamento de vidro, explica que o processo de lapidação visa corrigir imperfeições, como rebarbas e cortes nas bordas do vidro após o corte. Esse procedimento é realizado por máquinas equipadas com rebolos diamantados. O vidro é transportado por uma máquina com múltiplos motores, sendo cada motor responsável por um rebolo específico. Ao entrar em contato com as bordas do vidro, o rebolo realiza o acabamento necessário, suavizando as extremidades e eliminando as partes cortantes.

Segundo Radke (2022), durante o processo de lapidação, forma-se um pó fino de vidro, que é expelido juntamente com a água utilizada para resfriar e auxiliar a lapidação. A mistura de

água e pó de vidro é coletada e encaminhada para a central de tratamento, onde a água é filtrada e purificada, podendo ser reutilizada no processo. O pó de vidro, por sua vez, é descartado. Contudo, vale destacar que o resíduo de pó de vidro, denominado lodo, possui altos teores de SiO_2 (dióxido de silício) e Al_2O_3 (óxido de alumínio), além de conter partículas extremamente finas. Parte desse resíduo pode ser aproveitada em processos de recuperação ou melhoria da qualidade do solo. Estudos como os de Pudell (2022) e Olufowobi et al. (2014) apontam que a adição de pó de vidro ao solo pode aumentar sua resistência, além de oferecer benefícios em outras aplicações, como na fabricação de novos vidros ou como agregado em materiais de construção, garantindo um destino útil e sustentável para esse resíduo e evitando impactos ambientais negativos.

3.4.1 Atividade pozolânica do PDV

A composição do vidro e suas propriedades pozolânicas têm sido exploradas na indústria da construção, com potencial significativo para a sustentabilidade e melhorias nas propriedades de materiais de construção. Massazza (2004) observa que os cacos de vidro têm sido utilizados na indústria da construção como pozolanas complementares. As pozolanas são materiais de natureza silicosa ou alumino-silicosa que, quando combinados com cal hidratada e água, formam compostos com propriedades cimentícias. A incorporação de cacos de vidro como pozolana pode melhorar as características do concreto e da argamassa, como resistência, durabilidade e sustentabilidade. O pó de vidro, por sua vez, consiste em partículas finamente moídas de vidro.

Estudos evidenciam que quanto menor o tamanho das partículas maior a probabilidade de apresentarem atividade pozolânica. Segundo Barros (2016), quando o vidro é moído finamente, possui uma quantidade adequada de sílica amorfa (SiO_2) e, ao reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido na água, forma compostos hidratados de maneira equivalente aos materiais pozolânicos. Além disso, poucos procedimentos são necessários para modificar alguns subprodutos industriais em pozolanas, sendo que esses procedimentos normalmente consistem em moagem e classificação, que reduzem seu tamanho e aumentam a superfície das partículas.

Idir et al. (2011) e Bignozzi et al. (2015) afirmam que, quando utilizadas partículas de vidro menores que 150 μm , aumenta-se a probabilidade de o material apresentar atividade pozolânica.

Autores como Guo et al. (2020), que investigaram a substituição parcial do cimento por pó de vidro, analisam diversos estudos e parâmetros, como o tipo de vidro utilizado, o tamanho das partículas, o material substituído, o percentual de substituição e a tendência de resistência à compressão. De forma geral, observa-se uma tendência de redução na resistência à compressão à medida que o tamanho das partículas de vidro aumenta.

A composição do vidro e suas implicações nas suas propriedades pozolânicas são bem descritas por diversos autores. Marcon (2015) destaca que os cacos de vidro apresentam características químicas e físicas adequadas para desempenharem sua função como pozolanas. A presença de sílica no vidro é a principal responsável por sua reatividade pozolânica. Durante o processo de hidratação, os compostos pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento, resultando na formação de produtos adicionais de hidratação, como os silicatos de cálcio hidratados (CSH), que contribuem para a resistência e durabilidade do material estabilizado.

Chandra Paul, Savija e Babafemi (2018) destacam que o resíduo de vidro reciclado exerce uma dupla função na microestrutura do concreto. Como material agregado, sua interação com o cimento afeta a resistência, enquanto, como material pozolânico, sua adição contribui para o aumento da força dos sólidos envolvidos. A interação entre essas duas influências opostas determina a resistência à compressão do concreto. Além disso, os autores afirmam que os resíduos de vidro triturado quimicamente contêm elevados níveis de silício e cálcio com estrutura amorfa, o que lhes confere propriedades pozolânicas ou cimentícias. Dessa forma, o resíduo de vidro pode ser utilizado no concreto tanto como agregado quanto como substituição parcial do cimento.

Shao et al. (2015) afirmam que um material pozolânico típico possui três características principais: alto teor de sílica, estrutura amorfa e grande área de superfície específica. O autor compara o vidro às cinzas volantes e à sílica ativa, concluindo que o vidro em pó atende aos requisitos essenciais para ser classificado como material pozolânico.

Baldovino (2021) estudou a estabilização de silte com adição de solo-cimento PDV, solo-cal-PDV e solo-lama de cal-PDV, utilizando 5% de cal e 5%, 15% e 30% de PDV, com tempos de cura de 7, 28 e 90 dias. Os resultados mostraram aumento na resistência à compressão e à tração com o acréscimo de PDV e o tempo de cura, sendo que os maiores ganhos de resistência ocorreram aos 7 dias, devido às reações pozolânicas iniciais entre cal e PDV.

Neste contexto, o pó de vidro se apresenta como uma opção promissora para o estudo e estabilização de solos contaminados devido às suas notáveis propriedades pozolânicas. Sua composição rica em sílica e cálcio, associada à estrutura amorfa, permite que ele reaja com compostos presentes nos solos, como o hidróxido de cálcio, formando produtos cimentícios que melhoram a resistência e a durabilidade do material estabilizado. Dessa forma, a utilização do pó de vidro não apenas contribui para a estabilização ambiental de solos, mas também promove o reaproveitamento de resíduos, alinhando-se aos princípios da economia circular e da construção sustentável.

3.4.2 Estudos sobre as Aplicações do Resíduo de PDV

Benny et al. (2017) realizaram um estudo sobre o impacto do resíduo de pó de vidro (PDV) em aplicações geotécnicas, avaliando propriedades como resistência ao cisalhamento, compressibilidade e valores de CBR de solo argiloso. Os resultados mostraram que a adição de pó de vidro, nas proporções de 2% a 10%, inicialmente aumentou a coesão, o ângulo de atrito, a densidade seca, a resistência à compressão e os valores de CBR. No entanto, após atingir 8%, esses parâmetros começaram a decrescer. Os autores concluíram que o uso de PDV para estabilização do solo é uma estratégia eficiente e econômica, especialmente em solos de baixa resistência, sendo o material promissor para melhorar a resistência de componentes usados em pavimentação.

Perera et al. (2022) realizaram uma série de análises mecânicas e microestruturais para investigar os efeitos do vidro triturado (com dimensões inferiores a 5 mm) em solos argilosos destinados ao uso em subleitos de pavimentos. Os resultados indicaram que a adição de vidro triturado à argila expansiva utilizada como material de subleito promoveu melhorias expressivas nas propriedades mecânicas, incluindo resistência à compressão não confinada, ISC e módulo resiliente. Além disso, essa inclusão reduziu os potenciais de expansão e retração do solo e otimizou suas características de retenção de água.

Rotta (2022) estudou a resistência à compressão de concretos com substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro (10% a 30%) e diferentes fatores água/cimento (0,55 e 0,60). O estudo também avaliou a durabilidade em ambientes agressivos, como a exposição a sulfatos. Os resultados indicaram que a incorporação de pó de vidro apresenta desempenho comparável ao concreto de referência, principalmente em concentrações mais baixas de substituição e com fator a/c reduzido. O traço com 25% de substituição e fator a/c de 0,55 mostrou o melhor desempenho, combinando resistência satisfatória com vantagens econômicas e ambientais, apesar de uma leve perda de resistência.

Cyr, Tagnit e Hamou (2011) observaram que o vidro triturado, quando reduzido a partículas finas, apresenta atividade pozolânica, que aumenta com a diminuição do tamanho das partículas.

Blayi et al. (2020) investigaram o uso de pó de vidro residual triturado em diferentes proporções — 2,5%, 5%, 10%, 15% e 25% em relação ao peso seco do solo — para aprimorar as características de um solo argiloso expansivo. Os resultados indicaram que a adição do material contribui de maneira significativa para melhorar a consistência e a resistência ao cisalhamento do solo. Notavelmente, o RCS das amostras testadas apresentou um aumento de aproximadamente 75,6% com a inclusão de até 15% de pó de vidro.

Pudell (2022) investigou os efeitos da adição de pó de vidro e cal no comportamento mecânico de solos e encontrou melhorias na resistência mecânica, com aumento progressivo à medida que os teores de cal e pó de vidro eram elevados.

Ibrahim, Mawlood e Alshkan (2019) analisaram os efeitos de diferentes concentrações de PDV (6% a 36%) na estabilização de solos argilosos altamente plásticos. Nos ensaios de limites de consistência, houve uma redução significativa no limite de liquidez e plasticidade com o aumento da concentração de PDV. Embora a massa específica seca tenha mostrado um aumento marginal, o teor de umidade ótima reduziu em 14%. A resistência à compressão simples aumentou em 98% com relação ao solo puro com a adição de 27% de PDV, indicando uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas do solo.

Tajaddini et al. (2023) investigaram o uso de pó de vidro e escória de cobre na estabilização de solos argilosos. Para isso, foram testadas diferentes proporções desses materiais, juntamente com a aplicação de um ativador alcalino à base de hidróxido de sódio, a fim de avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais do solo estabilizado. Os resultados mostraram que a resistência à compressão simples das amostras tratadas com geopolímero foi significativamente superior à do solo não estabilizado. Entre os materiais avaliados, as amostras contendo pó de vidro apresentaram maior resistência em comparação às aquelas com escória de cobre. As análises microestruturais demonstraram que os aditivos promoveram a formação de uma estrutura geopolimérica de silicato de alumínio bem-organizada, com fortes ligações entre as partículas do solo.

Olufowobi et al. (2014) observaram que o pó de vidro, quando misturado com solos lateríticos, age como uma pozolana, reagindo com o hidróxido de cálcio na presença de água e formando compostos cimentantes, que aumentam a resistência do solo.

Javed e Chakraborty (2020) concluíram que a adição de pó de vidro melhora as propriedades do solo de subleito, reduzindo o impacto ambiental e oferecendo vantagens econômicas devido ao baixo custo e fácil disponibilidade. A resistência ao cisalhamento aumentou proporcionalmente ao conteúdo de pó de vidro até 8%, após o que a taxa de incremento desacelerou.

Cerzósimo (2019) investigou a aplicação de pó de vidro como agregado em bases de pavimentação asfáltica, testando proporções de 8% e 10% de material fino. O estudo revelou um aumento na resistência do material em 4,16 vezes ao adicionar 10% de pó de vidro. Além disso, não houve expansão do material e o índice de plasticidade foi reduzido em 7,33 vezes.

Shi e Zheng (2007) destacam que o vidro é um material amorfo composto predominantemente por silício e cálcio. Teoricamente, apresenta propriedades pozolânicas e,

quando moído em partículas finas, possui características semelhantes à matriz cimentícia. Dessa forma, pode ser empregado como substituto parcial do cimento na produção de concreto.

Com base nos estudos apresentados, o pó de vidro (PDV) emerge como uma solução promissora para o tratamento de solos contaminados com óleo diesel, mesmo sendo uma abordagem ainda pouco explorada. As pesquisas de Benny et al. (2017), Blayi et al. (2020) e outros autores destacam que o PDV melhora significativamente propriedades mecânicas e de estabilidade dos solos, como resistência ao cisalhamento e compressão, além de reduzir a plasticidade e a expansão de solos argilosos. Essas características são essenciais para a recuperação de áreas impactadas por hidrocarbonetos, pois um solo mais resistente e estável pode mitigar a mobilidade dos contaminantes e facilitar intervenções de remediação. Apesar de a aplicação do PDV em cenários de contaminação por óleo diesel não ter sido profundamente investigada, suas propriedades pozolânicas e cimentantes, conforme descrito por Cyr, Tagnit e Hamou (2011) sugerem um potencial significativo para atuar como barreira física e química. Assim, o uso do pó de vidro não apenas apresenta vantagens técnicas, mas também se alinha a práticas sustentáveis, promovendo o reaproveitamento de resíduos industriais em iniciativas de remediação ambiental.

3.5 SOLO COMPACTADO

Segundo Crispim (2007), as características importantes na construção de obras de terra, como resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade, são, em geral, dependentes do índice de vazios do solo. De maneira geral, a redução desse índice está associada ao aumento da resistência ao cisalhamento e à diminuição da deformabilidade e da permeabilidade dos materiais utilizados em obras de engenharia civil. A compactação, portanto, busca a melhoria dessas características, sendo responsabilidade do engenheiro determinar a redução necessária do índice de vazios e o método mais adequado para sua aplicação em campo.

Santos (2016) explica que o objetivo principal da compactação é garantir que o solo mantenha um desempenho adequado ao longo de toda a vida útil da obra, exibindo características como alta resistência e baixa deformabilidade. Embora as propriedades exigidas possam variar conforme a aplicação, valores adequados de resistência e compressibilidade são considerados fundamentais. Nesse contexto, diversos materiais têm sido estudados na área de geotecnia para o aprimoramento dos solos, sendo esses materiais melhorados por meio da adição de substâncias com propriedades aglomerantes, como cimento Portland e cal, e/ou materiais pozolânicos, como cinza de casca de arroz e microssílica. Portanto, é essencial realizar estudos experimentais para entender melhor o comportamento geomecânico dos solos compactados, com ou sem a adição desses materiais, visando sua aplicação em obras de engenharia.

É importante mencionar que, nesta pesquisa, não serão tratados estudos relacionados ao comportamento hidráulico, como os parâmetros de permeabilidade. Como os ensaios foram realizados em laboratório, foi necessária a definição de parâmetros controlados, para que as amostras pudessem ser comparadas, o que levou à escolha do uso de solos compactados.

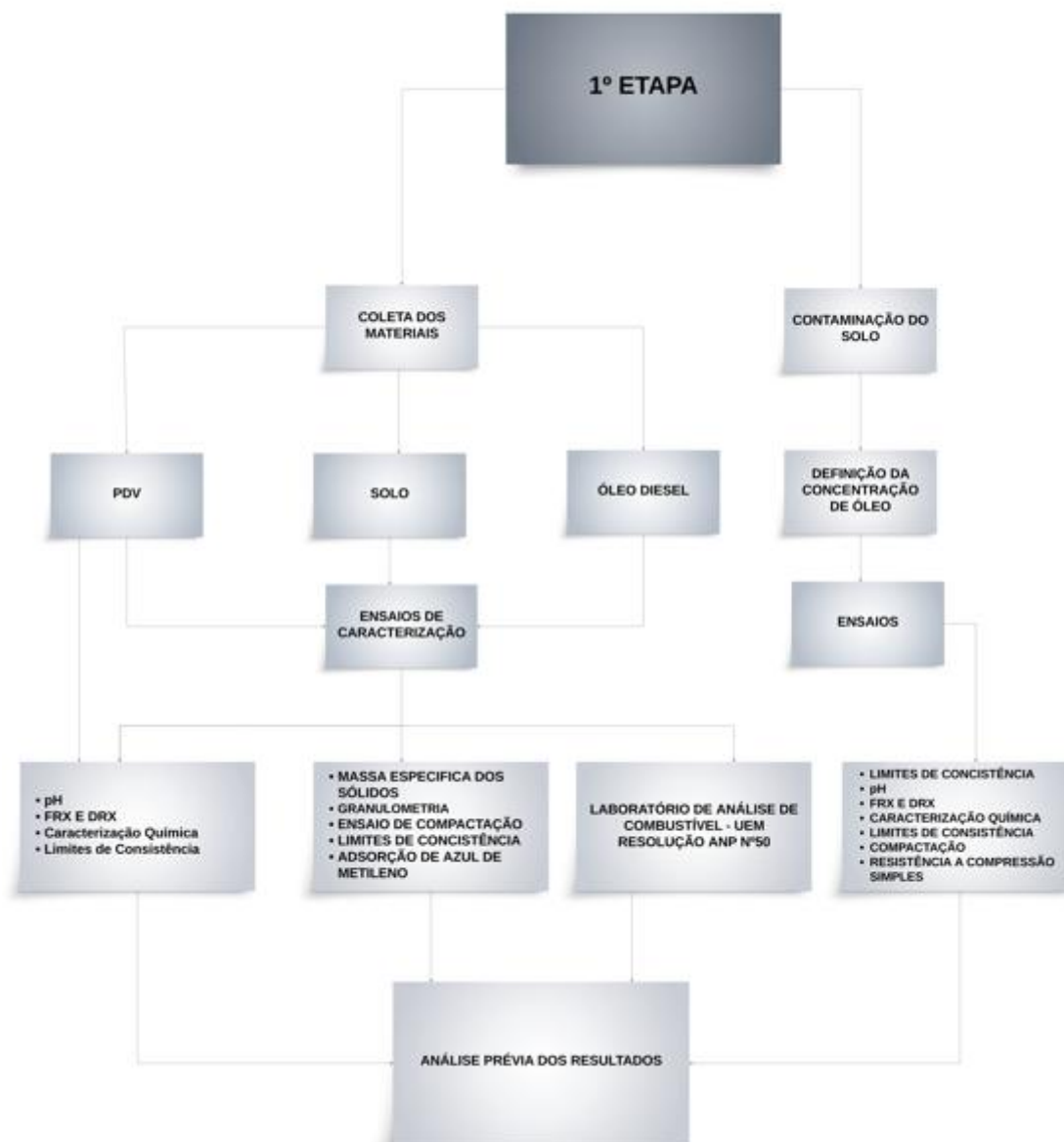
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, o solo utilizado foi coletado na cidade de Mandaguaçu, localizada no estado do Paraná. A escolha desse solo foi fundamentada em estudos anteriores conduzidos no laboratório de Mecânica dos Solos da UEM. O programa experimental incluiu ensaios de caracterização dos materiais, ensaios de compactação e ensaios de resistência à compressão não confinada.

Na primeira etapa, foram realizadas a coleta e a preparação dos materiais, incluindo solo, resíduo de pó de vidro e óleo diesel. No laboratório, as amostras foram classificadas em três categorias: solo em seu estado natural; mistura de solo com óleo diesel como contaminante; e combinação de solo, óleo diesel (como contaminante) e resíduo de pó de vidro como material estabilizante. Na segunda etapa, foi avaliada a eficiência da adição do resíduo de pó de vidro no tratamento do solo contaminado.

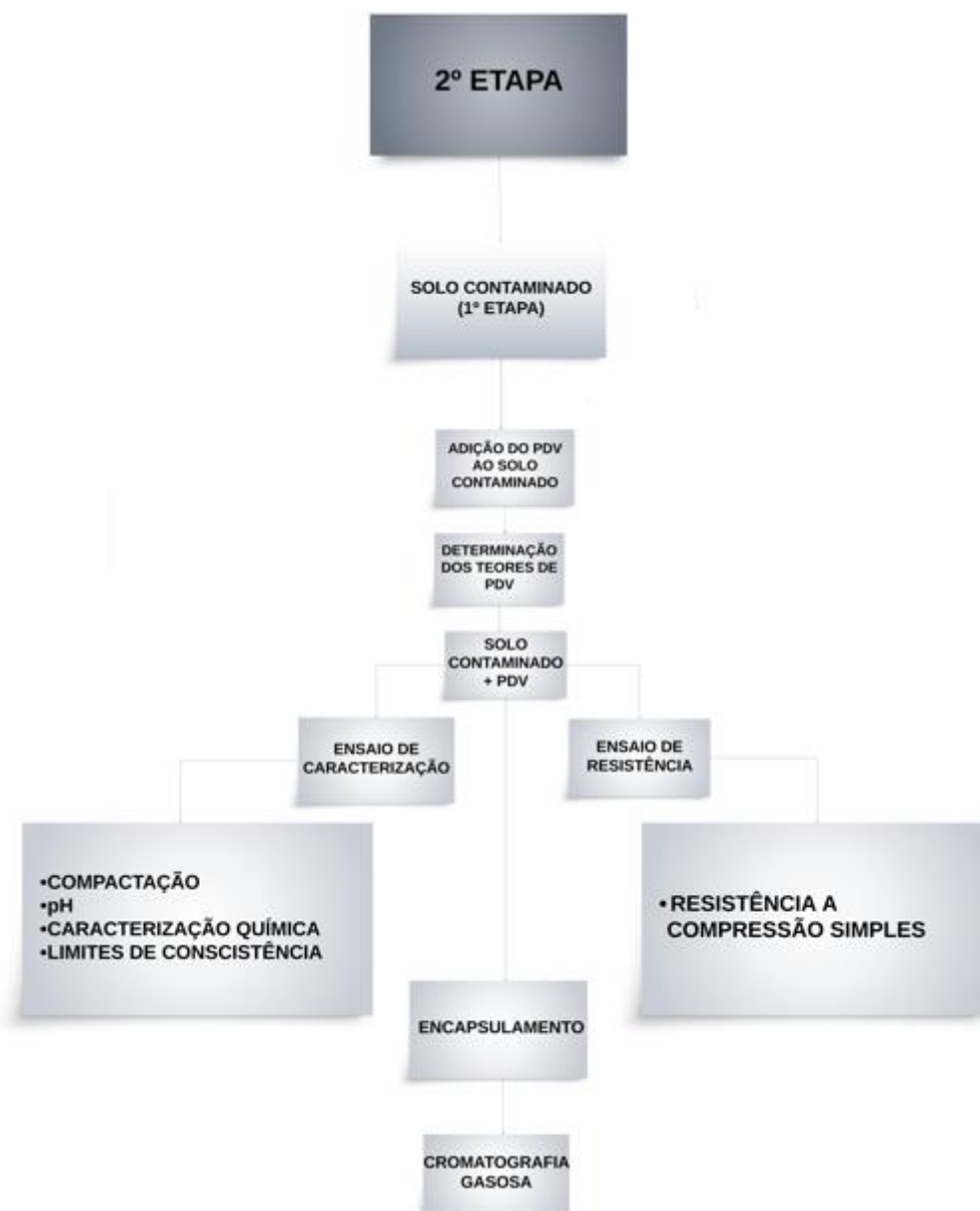
A Figura 7 apresenta um fluxograma das principais atividades realizadas na 1ª etapa do projeto de pesquisa, enquanto a Figura 8 ilustra o fluxograma correspondente às atividades da 2ª etapa.

Figura 7: Fluxograma da Primeira Etapa da fase Experimental



Fonte: Autora (2025)

Figura 8: Fluxograma da Segunda Etapa da fase Experimental



Fonte Autora (2025)

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Solo

As Figura 9 (a) e (b) apresentam o talude de onde foram coletadas as amostras deformadas de solo. Esse procedimento foi realizado em uma área situada na cidade de Mandaguaçu, no estado do Paraná. A escolha desse material se deu por se tratar de um solo característico da região Noroeste do Paraná.

Figura 9: Coleta das Amostras



Fonte: Autora (2025)

Após a coleta, as amostras de solo foram transportadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Maringá. As amostras foram submetidas ao peneiramento utilizando a peneira nº 4 (4,8 mm) e, em seguida, dispostas em bandejas metálicas, com a finalidade de alcançar o teor de umidade higroscópico, em um ambiente protegido da ação do vento e da luz solar (Figura 10). Após o processo de preparação, as amostras foram armazenadas em tambores plásticos.

Figura 10: Secagem do Solo em temperatura ambiente



Fonte: Autora (2025)

4.1.2 Óleo diesel

O óleo diesel utilizado neste estudo foi adquirido em um posto de combustível Shell localizado na Avenida Dr. Alexandre Rasgulaeff, nº 4850, Jardim Real, na cidade de Maringá-PR. Atualmente, os tipos de diesel comercializados são o S10 e o S500, com limites máximos de 10 e 500 ppm (partes por milhão) de enxofre, respectivamente, conforme descrito por Azambuja et al. (2017). Para este estudo, foi selecionado o óleo diesel S500, o qual foi submetido a análises no laboratório associado ao programa de pesquisa e desenvolvimento em combustíveis da Universidade Estadual de Maringá. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1, enquanto o laudo laboratorial encontra-se em anexo.

Tabela 1: Análise de 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 855,0	NBR 7148
Condutividade elétrica	pS/m	189	25 (min)	D2624/D4308
Teor de Água (máx.)	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 óleo diesel S500

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

Fonte: Autora (2025)

A Tabela 2, apresenta os resultados das análises realizadas no Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos (LACAUT), em Curitiba-PR. As análises incluíram: aspecto, água e sedimentos, cor, destilação (com as recuperações de 10%, 50%, 85% e 95% em volume), enxofre, massa específica a 20°C, ponto de fulgor, teor de água, teor de biodiesel e viscosidade cinemática a 40°C.

Tabela 2: 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 D209-22
10% vol. Recuperado	192,2	Anotar	3,6	2,13	°C	ASTM D86-23
50% vol. Recuperado	288,0	245,0 a 310,0	2,8	2,11		
85% vol. Recuperado	343,10	360,0 máx	2,2	2,01		
90% vol. Recuperado	353,9	-	2,7	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	EN14078-14
Viscosidade Cinemática a 40°C	2,903	2,0 a 5,0	0,062	2,03	mm ² /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 (2025)

4.1.3 Pó de vidro (PDV)

O resíduo de pó de vidro (PDV) foi coletado na empresa Cristal Sete, situada em Apucarana-PR, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Empresa Cristal Sete – Apucarana PR.



Fonte: Cristal Sete Vidro Temperado-Blindex

Conforme apresentado por Rotta (2022), o resíduo é gerado durante o processo de corte de placas de vidro temperado, configuradas em diferentes dimensões conforme as especificações dos pedidos. O corte utiliza jatos de água direcionados às placas, originando resíduos que se misturam à água empregada no processo. Essa mistura é conduzida por canais específicos até a estação de tratamento de efluentes da empresa, onde ocorre a decantação e densificação. Essa etapa é otimizada pela adição de polímeros, que facilitam a separação e a consolidação dos resíduos. Ao final do tratamento, sacos plásticos são posicionados sob valetas para coletar a mistura do resíduo pastoso decantado no fundo do funil e da água excedente. Como resultado, diversos sacos contendo o resíduo são acumulados diariamente, conforme ilustrado nas Figura 12 (a) e (b)

Figura 12: Resíduo obtido no processo final da lapidação do vidro



(a) Válvulas para descarga de resíduo decantado



(b) Válvulas para descarga de resíduo decantado

Fonte: Rotta (2022)

Após a coleta, o resíduo de pó de vidro (PDV) passou por um processo de preparação laboratorial fundamental para sua utilização posterior. Inicialmente, a pasta de PDV foi espalhada sobre uma lona e exposta à luz solar até atingir a secagem completa. Esse procedimento foi necessário devido à consistência pastosa do material, que exige um período de desidratação para ser adequadamente manipulado (Radke 2022).

Após a secagem, o resíduo de PDV foi submetido a um processo de desagregação em um moinho de barras, como ilustrado nas Figura 13(a) e Figura 13(b). O uso de um moedor teve como objetivo refinar ainda mais o material, garantindo partículas mais finas, homogêneas e adequadas para aplicações futuras. A Figura 14 (a) mostra o aspecto do resíduo antes da moagem, enquanto a Figura 14(b) ilustra o material após ser moído. Para obter uma granulometria mais fina, o pó foi peneirado em uma peneira de malha 50 (0,3 mm), conforme ilustrado na Figura 14 (c).

Figura 13:Moinho de Barras



Fonte: Autora (2025)

Figura 14: Estágios do Resíduo de Pó de Vidro



(a) Resíduo seco a temperatura ambiente



(b) Resíduo processado no moinho



(c) Resíduo peneirado

Fonte: Autora (2025)

4.1.4 Análise granulométrica – Solo Natural e Pó de Vidro

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de análise granulométrica realizados no solo natural, indicando que as três amostras, analisadas não exibiram variações significativas, evidenciando a homogeneidade do material. Os ensaios de caracterização geotécnica foram conduzidos nos laboratórios da Universidade Estadual de Maringá (UEM). A Figura 15, ilustra a curva granulométrica utilizada para determinar as proporções de areia, silte e argila, conforme os dados apresentados na Tabela 3.

Além disso, a comparação entre os resultados obtidos no laboratório da UEM (Tabela 4) e aqueles provenientes dos ensaios de caracterização física realizados pela empresa AgriSolum, apresentados em anexo, revelou semelhança entre as análises. O ensaio do picnômetro, também realizado no laboratório da UEM, determinou que a massa específica dos sólidos (ρ_s) é de 26,3 kN/m³, valor coerente com o encontrado por Ladeira (2019) em ensaios conduzidos no mesmo tipo de solo. Essa concordância válida a confiabilidade dos dados e sustenta uma análise comparativa sólida. Com base nas informações obtidas, conclui-se que o solo da região de Mandaguaçu apresenta características predominantemente arenosas.

Para a granulometria do pó de vidro a técnica utilizada para determinação foi a granulometria a laser, que mede o tamanho das partículas por meio do espalhamento da luz. Quando um feixe de laser incide sobre a amostra, as partículas dispersam a luz em diferentes ângulos, sendo que a intensidade do espalhamento varia conforme o tamanho das partículas. Partículas menores dispersam a luz em ângulos maiores, enquanto as maiores o fazem em ângulos menores. Esta técnica baseia-se nas teorias de Fraunhofer, aplicadas a partículas grandes, e de Mie, que descrevem o comportamento de partículas pequenas ou de tamanho similar ao comprimento de onda do laser, o resultado obtido encontra-se na Figura 15. A determinação da massa específica dos sólidos (ρ_s) do PDV foi realizada no laboratório da Universidade Estadual de Maringá, utilizando o método do picnômetro. O resultado obtido foi de 2,57 g/cm³, valor próximo ao reportado por Radke (2022), que registrou 2,52 g/cm³.

A comparação apresentada na Figura 25 entre as curvas granulométricas do pó de vidro (PDV) e do solo evidencia que o PDV possui partículas mais finas caracterizadas por uma curva acentuada a partir de 0,001 mm, enquanto o solo apresenta uma granulometria com partículas maiores e uma transição mais gradual.

Tabela 3:Análise granulométrica

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
Fração do Solo	(%)	Fração do Solo	(%)	Fração do solo	(%)
Areia grossa	22	Areia grossa	20	Areia grossa	23
Areia fina	52	Areia fina	54	Areia fina	51
Areia total	74	Areia total	74	Areia total	74
Silte	2	Silte	2	Silte	2
Argila	24	Argila	24	Argila	23

Fonte: Laboratório AgriSolum (2024) – Adaptado pela Autora

Tabela 4: Caracterização Geotécnica do Solo

Parâmetros Geotécnicos	Solo de Mandaguauçu-PR
Fração argilosa	23
Fração silte (%)	5
Fração areia (%)	72
LL (%)	25
LP (%)	15
IP (%)	10
Classificação Unificada	SC- Areia argilosa
Classificação AASHTO	A-2-4
ρ_d (Kn/ m³)	26,3

Fonte: Autora (2024)

Figura 15: Curvas Granulométrica

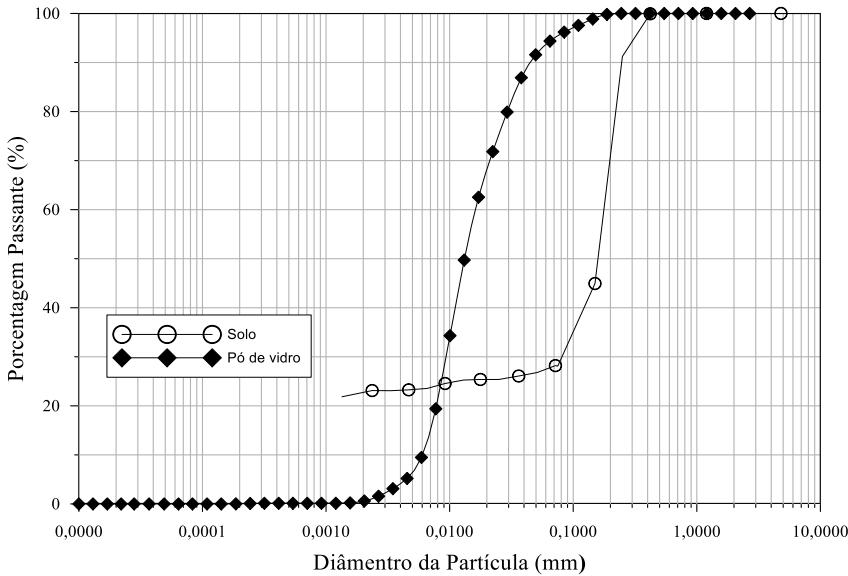


Tabela 5 : Granulometria do PDV

D10	6.957 μm
D50	15.33 μm
D90	56.63 μm

Fonte: Autora (2025)

Conforme a NBR 7181:2016, que aborda a classificação dos solos, também é possível caracterizar um resíduo com base no tamanho das partículas, representado pelos valores de D10, D50 e D90, conforme demonstrado na Tabela 5. Nesse caso, o resíduo seria classificado semelhante a um material siltiloso ou arenoso fino, com uma distribuição de partículas que varia de finas a médias. A combinação desses valores revela a presença significativa de partículas finas (siltosas) e uma fração de partículas mais grosseiras (areia fina).

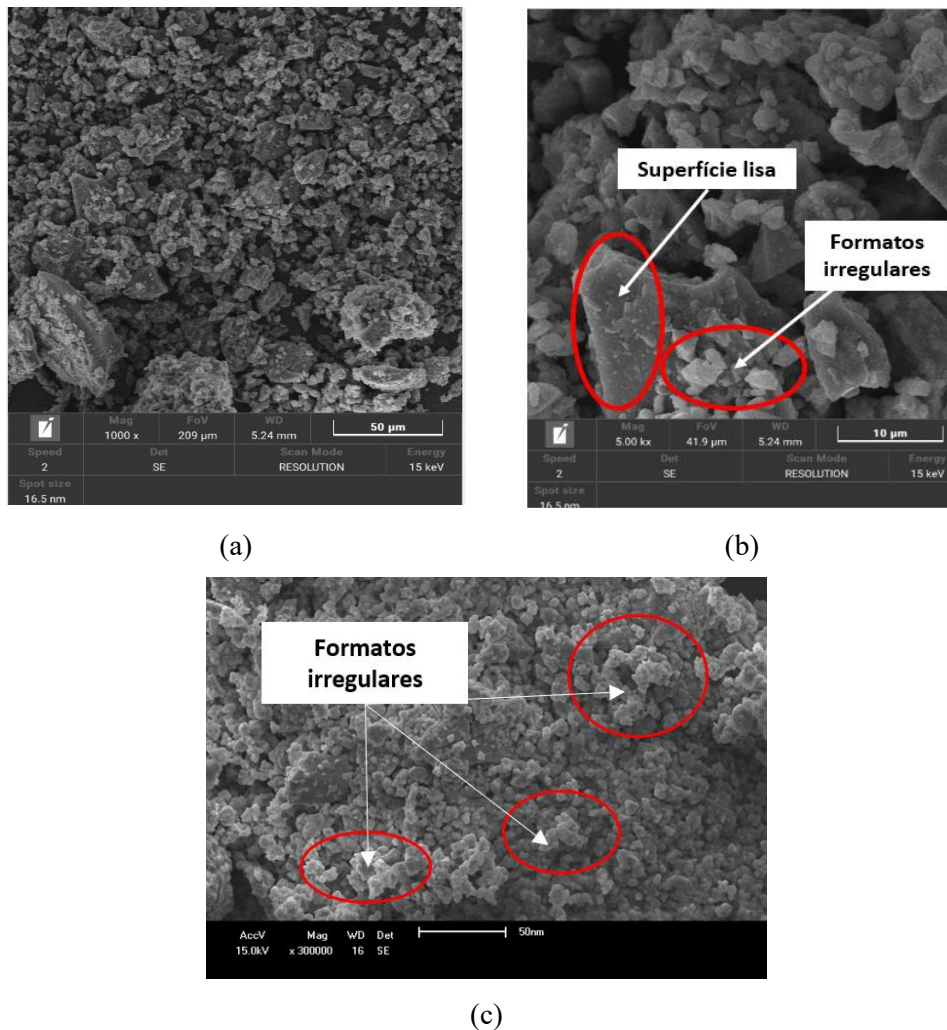
4.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

Essa técnica utiliza feixes de elétrons que interagem com a amostra, resultando na emissão de diferentes sinais, como elétrons secundários e retroespalhados. Moura (2018) ressalta que a microscopia eletrônica de varredura (MEV) se distingue por sua alta resolução e excelente capacidade de foco. Segundo Dedavid, Gomes e Machado (2007), a MEV é amplamente utilizada na caracterização e análise de microestruturas, sendo aplicável em diversos campos do conhecimento. Além de gerar imagens tridimensionais com alta resolução, essa ferramenta fornece informações detalhadas sobre a composição química do material, permitindo a identificação da estrutura, morfologia, composição elementar e topografia da superfície da amostra.

As imagens foram obtidas e os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) realizados em laboratórios distintos: parte das imagens foi gerada no laboratório multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina (LabMult-LD), e a continuidade dos ensaios foi realizada no COMCAP, da Universidade Estadual de Maringá (UEM), utilizando os seguintes equipamentos: FEI, modelo Quanta 250; Shimadzu, modelo SUPERSCAN SS-550; e, para a metalização, o equipamento Bal-Tec SCD 050. Esses detalhes podem ser observados nas Figura 16 (a), (b) e (c).

Comparando o ensaio realizado neste trabalho com a análise do resíduo de vidro conduzida por Radke (2022), para um resíduo de mesma origem, identificaram-se semelhanças nos resultados. Em ambas as análises, as partículas do resíduo apresentaram formato irregular e superfície lisa, características típicas de materiais amorfos. Rotta (2022) explica que, quando o material é amorfo, há um indicativo de pozolanicidade.

Figura 16: Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV



Fontes: Autores (2025)

4.3 DRX - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

De acordo com Gobbo (2009), a difração de raios X (DRX) é uma técnica analítica utilizada para identificar a composição cristalográfica de materiais, por meio da interação dos raios-X com a estrutura atômica dos cristais. O feixe de raios-X se difrata em ângulos específicos, determinados pelo espaçamento entre os planos cristalinos e pelo comprimento de onda dos raios-X. Os ensaios de DRX foram realizados nas amostras de solo natural e resíduo de PDV que passaram pela peneira número 50, no Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

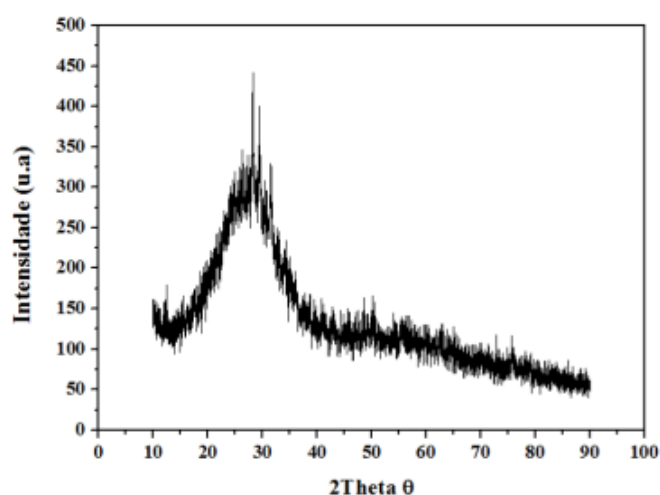
Para o pó de vidro as medidas foram conduzidas utilizando um espectrômetro Shimadzu 7000, com um ânodo de cobre. Os parâmetros de medição foram configurados com um ângulo inicial de 2 Theta (5°) e um ângulo final de 2 Theta (90°), com uma taxa de varredura de 0,01°/segundo e uma velocidade de varredura de 2°/min.

As medidas foram realizadas sob uma tensão de 40kV e corrente de 30mA. No DRX do vidro, foi observada a presença de um halo amorfo na faixa de 15° a 28°. Galvão, Faria e Souza

(2013) corroboram essa observação, pois, ao analisarem a curva difratométrica do pó de vidro (Figura 17) proveniente do resíduo da lapidação, constataram a ausência de fases cristalinas, o que indicou que o espectro obtido correspondia a uma banda característica de material amorfo. Rotta (2022), ao estudar o resíduo de PDV, observou a ausência de cristais na amostra, indicando uma composição predominantemente amorfa, o que sugere um potencial pozolânico.

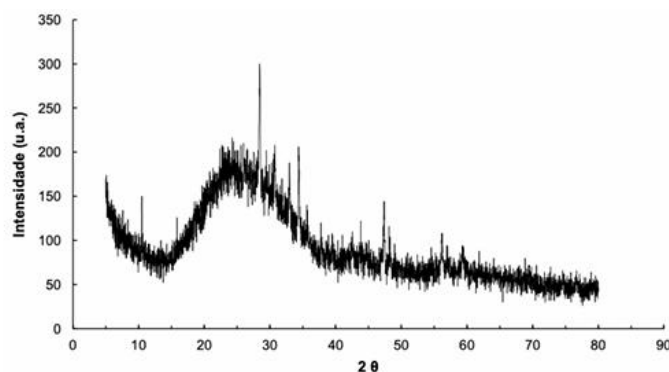
Conforme Barros (2016), o vidro finamente moído apresenta uma quantidade significativa de sílica amorfa (SiO_2), que, ao reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido em água, forma compostos hidratados semelhantes aos produzidos por materiais pozolânicos. Ao comparar o gráfico apresentado por Radke (2022), na Figura 18, com os resultados obtidos neste estudo, mostrados na Figura 19, foi identificado um comportamento consistente em relação à presença da fase amorfa no resíduo de PDV, uma vez que não foram observados picos de cristais bem definidos.

Figura 17: Difratoograma de raios-X do pó de vidro.



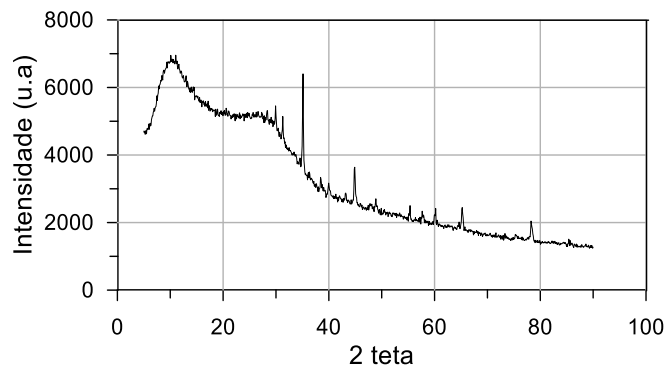
Galvão, Faria e Souza (2013)

Figura 18: Fases da amostra de pó de vidro – Literatura



Fonte: Radke (2022)

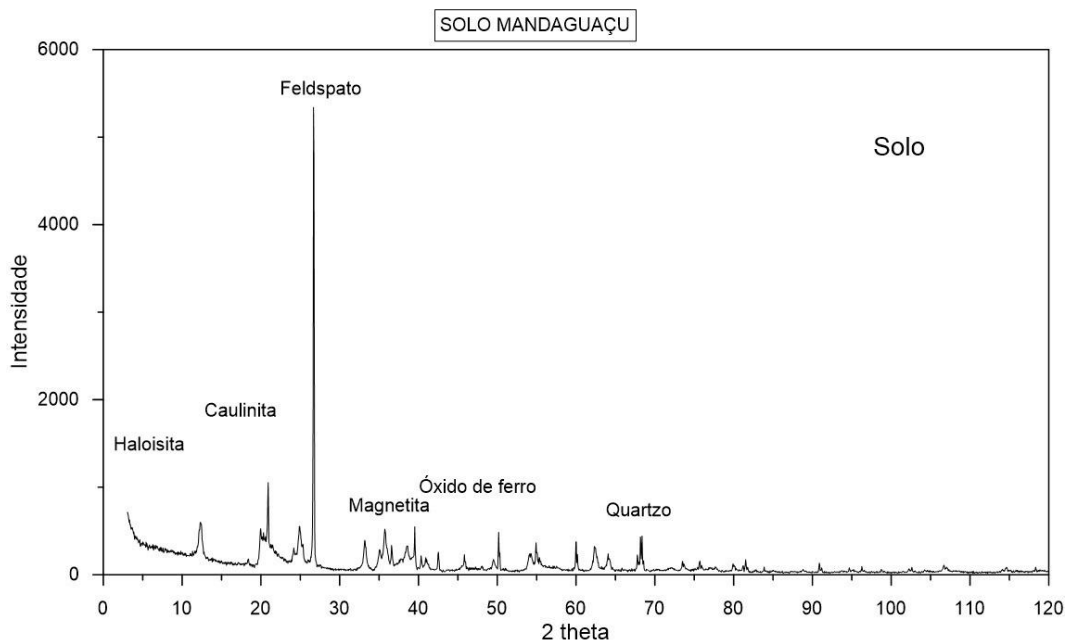
Figura 19: Fases das amostras de PDV



Fonte: Autora (2025)

O DRX do solo natural pode ser observado na Figura 20, o solo em estudo apresentou a presença de haloisita, caulinita, feldspato, magnetita, óxido de ferro e quartzo. Os resultados obtidos demonstram coerência, considerando que os solos lateríticos possuem óxidos de ferro em sua composição e argilominerais de baixa atividade. Os minerais identificados estão em concordância com os dados apresentados por Laderia (2019), que realizou análises em solos da mesma região.

Figura 20: DRX Solo Natural



Fonte: Cardoso (2025)

4.4 FRX- - FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

As análises por fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas com o objetivo de determinar a composição química elementar da amostra do PDV e Solo Natural. O ensaio foi

conduzido no laboratório multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina (LabMult-LD).

De acordo com a ABNT NBR 12653 (ABNT, 2014), o somatório dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve atingir, no mínimo, 70% para as classes N e C, e 50% para a Classe E. Além disso, a quantidade de óxidos de SO_3 não deve exceder 4%. Os resultados obtidos no ensaio, apresentados na Tabela 6, indicam que, segundo as especificações, o resíduo está dentro dos critérios de aceitação para pozolana.

Tabela 6: Componentes químicos do PDV

Componentes	Fórmula Composta	(%)
Al	Al_2O_3	2,05
Si	SiO_2	75,49
S	SO_3	0,36
Cl	Cl	0,06
K	K_2O	0,75
Ca	CaO	15,136
Ti	TiO_2	0,227
V	V_2O_5	0,012
Cr	CrO_3	0,003
Mn	MnO	0,087
Fe	Fe_2O_3	5,66
Ni	NiO	0,001

Fonte: Autora (2025)

Com relação ao solo natural os resultados obtidos são semelhantes aos reportados por Gonçalves et al. (2018) para o solo de Mandaguaçu-PR. O silício é o elemento predominante na amostra, como era esperado, devido à granulação predominantemente arenosa do solo. A presença de alumínio e ferro pode ser explicada pelo comportamento laterítico do solo analisado. Outros elementos encontrados incluem titânio (Ti), enxofre (S), cálcio (Ca), potássio (K), manganês (Mn) e zircônio (Zr). Os resultados para o solo natural podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7: Componentes químicos do Solo

Componentes	Fórmula Composta	(%)
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 (2025)

4.5 PH

A ASTM (2019), que aborda a medição do pH em solos, define o pH como a medida da atividade dos íons hidrogênio em uma solução aquosa. A norma destaca que o pH é um indicador da intensidade da acidez ou alcalinidade de um solo, sendo um parâmetro essencial na análise para determinar a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

O ensaio de pH foi realizado em amostras de solo natural (SN), solo contaminado com 2% e 8% de óleo diesel e tratados com 10%, 20% e 30% de resíduo de PDV.

Segundo a Embrapa, a análise de pH do solo é conduzida misturando 10 g de solo seco com 25 mL de água destilada ou solução de cloreto de cálcio (CaCl₂), na proporção de 1:2,5. Após agitar a mistura por 5 minutos e deixar em repouso por 1 hora, o pH é medido utilizando um medidor de pH calibrado.

4.6 ATIVIDADE POZOLÂNICA

A atividade pozolânica é avaliada pelo consumo de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), expresso em miligramas por grama do material analisado. Segundo a ABNT NBR 15895:2010, um material é classificado como pozolânico quando apresenta consumo mínimo de 750 mg/g de Ca (OH)₂, enquanto Raverdy et al. (1980) sugerem um valor de 436 mg/g. O ensaio realizado pelo método de Chapelle modificado resultou em um consumo de 249,05 mg/g, valor abaixo dos critérios estabelecidos, não indicando atividade pozolânica para o material na condição avaliada.

Entretanto, a composição química do pó de vidro (PDV) sugere potencial reatividade pozolânica. De acordo com a ABNT NBR 12653 (ABNT, 2014), para que um material seja classificado como pozolana, a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve atingir no mínimo 70% para as classes N e C, e 50% para a classe E, além de um limite máximo de 4% para SO₃.

Os resultados da caracterização química demonstraram que o PDV atende a esses critérios, corroborando sua adequação como material cimentício suplementar.

Além da composição química, a estrutura física do material influencia sua reatividade. Estudos de Marcon (2015) indicam que resíduos vítreos possuem propriedades químicas e físicas favoráveis à atividade pozolânica. Comparando-se a análise realizada neste estudo com os resultados obtidos por Radke (2022) para um resíduo de mesma origem, observou-se que as partículas apresentam formato irregular e superfície lisa, características típicas de materiais amorfs. Rotta (2022) destaca que a amorfia é um fator determinante para a reatividade pozolânica, uma vez que materiais amorfs possuem maior disponibilidade de sílica reativa.

A granulometria também é um fator crítico para a atividade pozolânica do PDV. Borges (2021) verificou que a redução do tamanho de partícula aumenta o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, favorecendo a reatividade do material. Oliveira (2021) obteve um consumo de 833 mg/g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para o mesmo resíduo, enquanto Rotta e Radke (2022) obtiveram resultados semelhantes ao utilizar peneira de malha 200 (0,075 mm). No presente estudo, a peneira utilizada foi de malha 50 (0,300 mm), o que pode justificar o menor consumo de hidróxido de cálcio observado. Assim, a baixa atividade pozolânica obtida pode estar relacionada ao maior tamanho das partículas, sugerindo que a adequação da granulometria pode aumentar a reatividade do material.

Dessa forma, apesar do resultado do ensaio de Chapelle modificado não indicar atividade pozolânica na condição avaliada, a composição química, a estrutura amorfa e o potencial reativo do PDV evidenciam que, com a adequação da granulometria, o material pode atuar como uma pozolana eficaz.

4.7 MISTURA DE SOLO E ÓLEO DIESEL

O solo foi inicialmente submetido a uma secagem natural até atingir o teor de umidade higroscópica (Figura 10). Para simular diferentes níveis de contaminação, os teores de óleo diesel foram definidos em 2%, 4%, 6% e 8%, sendo essas proporções calculadas com base no peso seco do solo. Para determinar esse peso, o solo foi seco em estufa a aproximadamente 105°C por 48 horas, conforme ilustrado na Figura 21. Esse procedimento seguiu metodologia semelhante à descrita por Portelinha (2021), que destaca que, devido à água ser um dos constituintes do óleo diesel, o termo tradicional "teor de água" pode ser interpretado como "teor de fluido".

O solo foi inicialmente peneirado em peneira nº 2 (10,2 mm) para garantir sua homogeneização. Em seguida, foi contaminado com óleo diesel S500 nas proporções de 2%, 4%, 6% e 8%, com base na massa seca. Para minimizar a evaporação da água e do óleo, o material contaminado foi armazenado em sacos herméticos, conforme ilustrado na Figura 22 (a). Após o

acondicionamento, realizou-se a mistura manual até que o solo apresentasse uma composição homogênea e visualmente uniforme. Segundo Portelinha et al. (2021), citando Safehian, Rajabib e Ghasemzadeh (2018), o uso de sacos plásticos para armazenar o solo cria um ambiente favorável à regulação da umidade e às reações de troca catiônica. Após a contaminação, o solo, ainda nos sacos plásticos, foi armazenado em uma caixa térmica e colocado em uma câmara úmida, conforme mostrado na Figura 22 (b) onde a temperatura e a umidade foram controladas. O material permaneceu nesse ambiente por 72 horas, e, após esse período, foram realizados os ensaios específicos para cada tipo de amostra.

Figura 21: Solo seco em estufa



Fonte: Autora (2024)

Figura 22: Solo contaminado armazenado em sacos Plásticos



(a)



(b)

Fonte: Cardoso (2024)

Neste estudo, o solo natural será identificado pela expressão (SN), enquanto a combinação de solo natural com uma determinada porcentagem de óleo diesel (OD) será indicada por SN+OD%.

4.8 MISTURA - SOLO ÓLEO DIESEL E ADIÇÃO DE PDV

Com base na análise do solo contaminado, foram selecionadas duas concentrações de óleo diesel para o estudo: 8% e 2% em relação à massa seca total, correspondendo, respectivamente, à maior e à menor concentração de óleo diesel, a fim de possibilitar comparações significativas. Para a estabilização do solo, foram estabelecidas proporções de pó de vidro (PDV) de 30%, 20% e 10%, também em relação à massa seca.

As proporções foram determinadas considerando a massa seca das misturas. Por exemplo, para a amostra contendo 30% de PDV, a mistura foi composta por 30% de PDV e 70% de solo natural. Para determinar a quantidade de óleo diesel, considerou-se a massa seca total da amostra, já incluindo as massas combinadas de PDV e solo. Assim, para a concentração de 8% de óleo diesel, o cálculo foi realizado com base na massa total seca após a combinação dos componentes. A Tabela 8 ,fornece uma descrição detalhada das amostras das misturas utilizadas na pesquisa, enquanto as

Figura 23 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) ilustra os aspectos visuais das combinações de solo contaminado com óleo diesel e tratado com pó de vidro.

Tabela 8: Misturas utilizadas na pesquisa

Mistura	Solo Seco (%)	Óleo Diesel	PDV (%)
SN	100	-	-
SN+2%OD	100	2	-
SN+4%OD	100	4	-
SN+6%OD	100	6	-
SN+8%OD	100	8	-
SOD2%+30%PDV	70	2	30
SOD2%+20%PDV	80	2	20
SOD2%+10%PDV	90	2	10
SOD8%+30%PDV	70	8	30
SOD8%+20%PDV	80	8	20
SOD8%+10%PDV	90	8	10

Fonte: Autor (2024)

Figura 23: Amostras de solo contaminado com óleo diesel e tratado com pó de vidro



Fonte: Autora (2024)

4.9 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

As análises de caracterização foram realizadas de acordo com as normativas técnicas aplicáveis. A seguir, são apresentados os ensaios realizados para as seguintes amostras:

- Solo Natural:
Análise Granulométrica NBR 7181:2016
- Solo Natural e Pó de Vidro:
Determinação da massa específica dos sólidos conforme a norma NBR 6508/1984
- Solo Natural e Misturas:
Determinação dos Limites de Liquidez conforme a norma ABNT NBR 6459/2016
Determinação dos Limites de Plasticidade ABNT NBR 7180:2016

4.9.1 Ensaios de Caracterização Química

Os resultados do ensaio realizado pelo laboratório AgriSolum para a caracterização química do material estão apresentados na Tabela 9. Observa-se a consistência dos valores entre

as três amostras, evidenciando uma baixa concentração de matéria orgânica e níveis elevados de óxidos de ferro. Esses achados são corroborados pelos estudos de Rios (2022), que investigaram o solo em Mandaguaçu, onde as análises revelaram também uma baixa quantidade de matéria orgânica e uma alta concentração de ferro (Fe), indicando a natureza laterítica do solo na região. Essas características estão em consonância com pesquisas anteriores realizadas na área. Villibor (2009) discute que diversos atributos estão intimamente relacionados ao processo de laterização, destacando, sob uma perspectiva tecnológica, o aumento da concentração de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio no substrato, juntamente com a predominância da caulinita como o mineral argiloso principal, frequentemente exclusivo. Esses componentes minerais são fundamentais na coloração característica dos solos lateríticos, resultando em uma gama de cores que inclui tons de vermelho, amarelo, marrom e alaranjado.

Tabela 9: Caracterização Química do Solo

	Unidade	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão
pH em CaCl_2	-	4	4	4	4	-
pH em H_2O	-	4,3	4,5	4,5	4,43	0,12
MO	(%)	0,24	0,3	0,24	0,26	0,03
CTC	cmolCdm^{-3}	3,11	4,52	3,48	3,7	0,73
Cálcio (Ca^{2+})	cmolCdm^{-3}	0,1	0,12	0,12	0,11	0,01
Mágnésio (Mg^{2+}) ³	cmolCdm^{-3}	0,06	0,07	0,08	0,07	0,01
Potássio (K^{+})	cmolCdm^{-3}	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01
FÓSFORO (P)	cmolCdm^{-3}	0,09	0,09	0,18	0,12	0,05
Enxofre (S)	cmolCdm^{-3}	ns	ns	ns	ns	ns
Boro (B)	cmolCdm^{-3}	ns	ns	ns	ns	ns
Cobre (Cu)	cmolCdm^{-3}	0,78	0,84	1,02	0,88	0,12
Ferro (Fe)	cmolCdm^{-3}	41,64	40,32	50,1	44,02	5,31
Magnésio (Mn)	cmolCdm^{-3}	6,6	6,6	7,92	7,04	0,76
Zinco (Zn)	cmolCdm^{-3}	4,56	0,42	0,6	1,86	2,34

Fonte: AgriSolum (2023)

4.9.2 Ensaio para avaliação do comportamento laterítico do solo

Foram realizados os ensaios de adsorção de azul de metileno e mini-MCV para determinar o comportamento laterítico do solo em estudo

4.9.2.1 Ensaio de adsorção de azul de metileno

Em sua pesquisa Pejon (1992) ressaltou a praticidade do teste de coloração com azul de metileno como uma abordagem simplificada e eficaz para a caracterização de solos voltada para atividades de mapeamento geotécnico. Os resultados dos testes permitiram a determinação da capacidade de troca catiônica (CTC), área específica (SE), valor de coloração

do solo (V_b) e valor de coloração da fração argila (A_{cb}). Fabbri (1994) por meio de ensaios realizados em diversas amostras de solo, evidenciou que a adsorção de azul de metileno, empregando o método da mancha, representa uma abordagem descomplicada para a identificação do tipo de argilomineral presente na fração fina do solo. A complementação deste método com o ensaio de granulometria por sedimentação permite a obtenção de informações abrangentes acerca do comportamento do solo. Após a obtenção dos valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC), apresentados na Tabela 10, é possível estimar a presença do argilomineral no solo em questão, conforme demonstrado na Tabela 11 com base nos parâmetros predefinidos por Pejon (1992).

O Ensaio consiste em colocar as amostras de solo em um becker (100 ml) e ir adicionando 10 ml de água destilada. O becker é posicionado sobre o agitador magnético e mantido em agitação por cerca de três minutos. Adiciona-se 1 ml da solução de azul de metileno (concentração 1,5 g/l). A suspensão de solo + água + azul de metileno é mantida em agitação constante por 30 segundos. Em seguida, uma gota da suspensão é retirada com um bastão de vidro e colocada sobre o papel de filtro. Caso o teste for negativo, mais 1 ml de azul de metileno era adicionado, e aguardava-se por 30 segundos antes de repetir o teste no papel de filtro.

Vale (2020) explica que se a expansão da gota no papel resultar em uma aura azulada ou esverdeada, indica um excesso de corante, confirmando assim o alcance do ponto de viragem da titulação. Caso contrário, é necessário adicionar mais corante à mistura e repetir o teste da mancha até que o ponto de viragem, identificado pela presença da aura na mancha, seja alcançado. Este ponto é conhecido como ponto de viragem, esse processo pode ser notado na Figura 24. Este procedimento era continuado até que o teste se tornasse positivo quando o teste se tornava positivo, aguardava-se mais 3 minutos e o teste era realizado novamente. Se o resultado fosse positivo, o ensaio estava encerrado.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Saneamento da UEM utilizando 2 gramas de solo previamente peneirado, homogeneizado e seco em estufa para determinação da massa seca. O material foi transferido para um Becker, onde foram adicionados 10 ml de água destilada e a mistura foi agitada por cerca de 3 minutos. Em seguida, acrescentou-se 1 ml de solução de azul de metileno, continuando a agitação por mais 30 segundos.

O teste da mancha foi iniciado com a retirada de uma gota da solução, a qual foi aplicada sobre o papel filme. Esse processo foi repetido até que se obtivesse um resultado positivo, conforme ilustrado nas Figuras 15(a) e 15(b). Ao final do ensaio, registrou-se o volume total de solução de azul de metileno utilizado, parâmetro essencial para o cálculo da capacidade de troca catiônica (CTC), conforme a Equação 1. Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 10, com a determinação de uma CTC de aproximadamente 11 meq/100g. Ao comparar

esses valores com os pré-determinados por Pejon (1992), conforme apresentado na Tabela 11, observa-se a caulinita como um possível argilomineral presente neste solo.

Tabela 10: Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno

Material	Amostra 1- Solo Natural	Amostra 2- Solo Natural
Peso do material seco (g)	0,81	0,87
Volume da solução de azul de metileno gasto (ml)	19	21
CTC	11,07	11,34

Fonte: Autora (2025)

Tabela 11: CTC de determinados coloides do solo em ambientes tropicais

Argila	CTC (Meq/100g)
Caolinita	3-15
Halosita 2 H ₂ O	5-10
Halosita 4 H ₂ O	10-40
Ilita	80-150
Montmorilonita	10-40
Clorita	20-30
Atapulgita	20-30
Vermiculita	100-150

Pejon (1992)

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

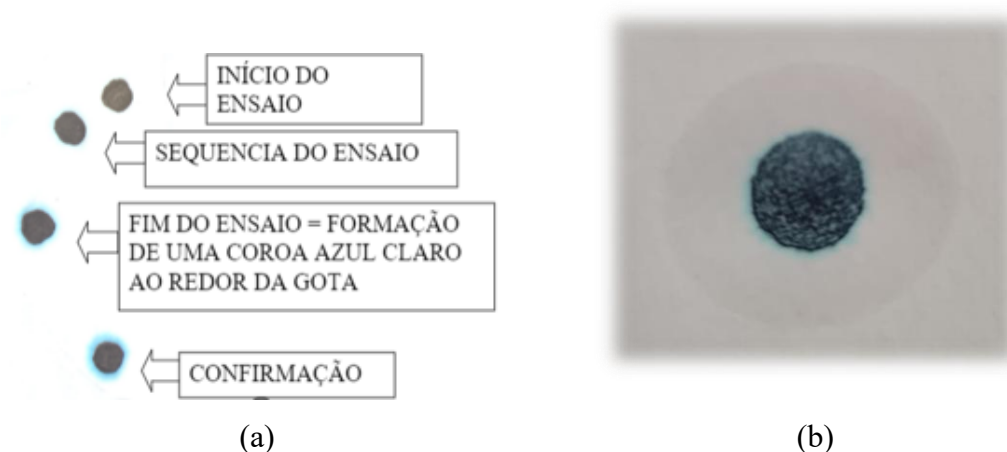
CTC= Capacidade de Troca catiônica (m_{eq}/100g)

V= Volume de Solução de Azul (ml)

C= Concentração da Solução (N)

M= Massa de solo seca (g)

Figura 24: Identificação do ponto de viragem

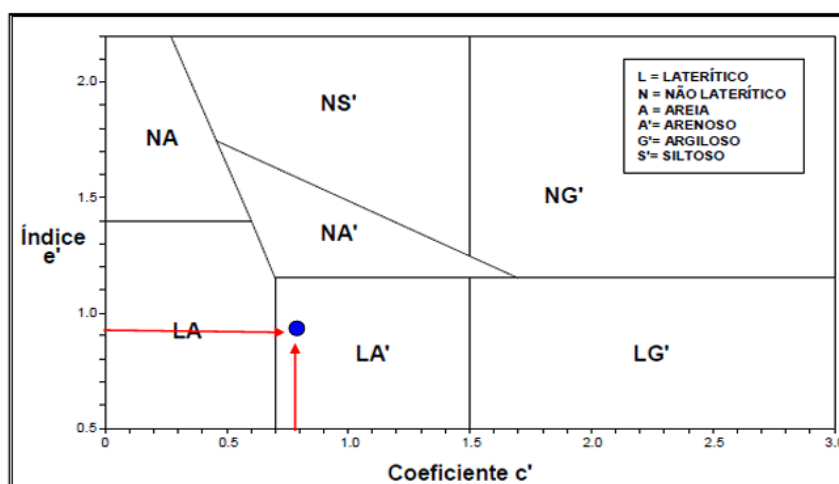


Fonte: Arteris (2015)

4.9.2.2 Ensaio MINI-MCV

O ensaio mini- mcv foi realizado no laboratório de geotecnia do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) localizado em São Jose dos Campos-sp. Com base nesses resultados, o solo foi classificado como arenoso laterítico (Figura 25), confirmando o comportamento laterítico típico da região. Durante o ensaio, foram obtidos os seguintes 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 $P_i = 58\%$.

Figura 25:Classificação Mini-MCV



Fonte: Autora (2025)

4.9.3 Ensaio de Compactação - (Proctor Normal)

Os ensaios de compactação foram realizados com energia normal (Proctor normal), utilizando cilindro metálico e soquete pequeno, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016). A amostra

de solo foi seca ao ar até atingir a umidade higroscópica e, em seguida, passada na peneira de 4,8 mm. Foram elaboradas curvas de compactação para as amostras de solo natural, as contaminadas com diferentes teores de óleo e as contaminadas e tratadas com PDV. A decisão de não reutilizar o material foi tomada devido à dificuldade de garantir uma amostra homogênea após a adição de óleo diesel.

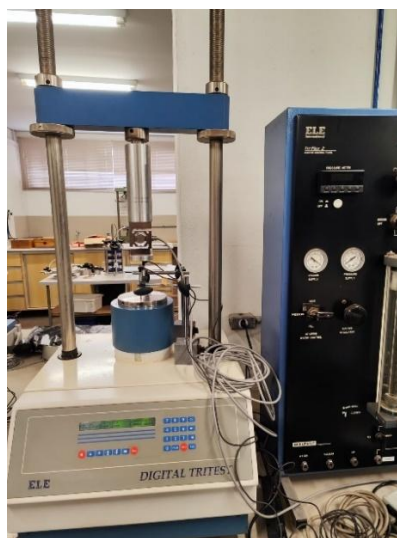
4.9.4 Determinação da resistência à compressão simples (RCS)

Os corpos de prova (CP) foram moldados com base nos parâmetros de massa específica seca e umidade ótima, obtidos a partir das curvas de compactação. As amostras foram confeccionadas com dimensões de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, conforme ilustrado na Figura (a). O armazenamento dos corpos de prova foi realizado em sacos plásticos vedados, devidamente identificados, e mantidos em uma câmara úmida, assegurando o controle de temperatura e umidade até os rompimentos, programados para os períodos de 7, 28 e 56 dias. O ensaio de RCS foi conduzido em uma prensa do Laboratório de Geotecnia da Universidade Estadual de Maringá, onde os corpos de prova foram submetidos à ruptura. A prensa foi ajustada para uma velocidade controlada, e dois transdutores de deslocamento verticais foram empregados para monitorar os deslocamentos e/ou deformações durante a ruptura das amostras, conforme indicado nas Figura 26 (a) (b), (c) e (d).

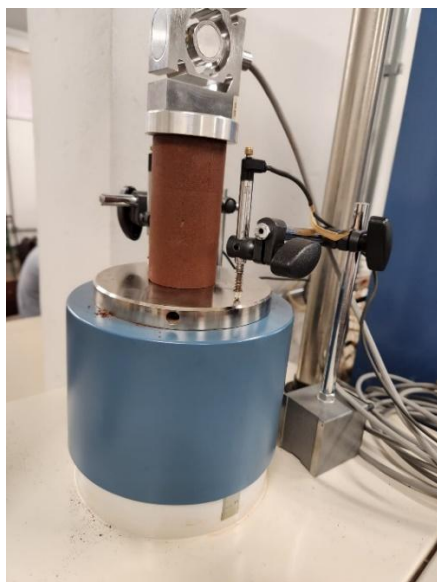
Figura 26: Ensaio de Resistência à Compressão Simples



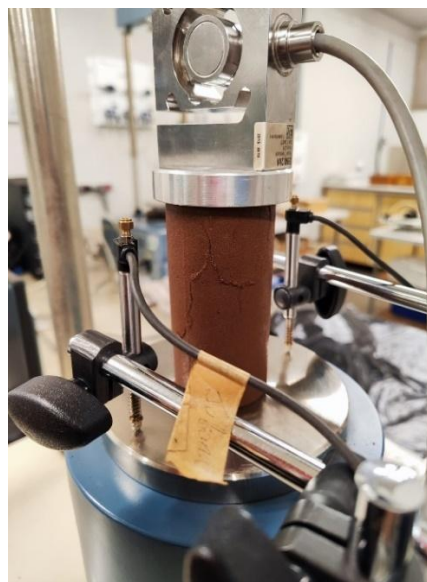
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor (2025)

4.10 CROMATOGRAFIA GASOSA

O ensaio de cromatografia gasosa foi conduzido pelo laboratório Pro-Ambiente, seguindo a metodologia EPA 3550C. A preparação das amostras de solo e sedimento foi realizada por meio de extração ultrassônica. A análise de TPH foi executada utilizando cromatografia gasosa em fase gasosa com detector de ionização por chama (GC-FID), conforme os procedimentos estabelecidos na EPA 8015B.

A cromatografia gasosa, conforme descrita por Marques (2014), é uma técnica amplamente empregada para a separação e análise de misturas contendo substâncias voláteis. Glush et al. (2003) esclarecem que, nesse processo, a amostra é inicialmente vaporizada e transportada por um gás apropriado, conhecido como fase móvel ou gás de arraste. Esse gás dirige a amostra vaporizada através de uma coluna cromatográfica, que contém a fase estacionária, permitindo a separação dos componentes da mistura. Skoog et al. (2002) complementam que, após a separação, as substâncias dissolvem-se no gás de arraste e passam por um detector, que gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de material eluído. Esse sinal é registrado ao longo do tempo, formando um cromatograma onde as substâncias aparecem como picos, cujas áreas são proporcionais às suas massas, possibilitando análises quantitativas.

No contexto ambiental, Cordeiro (2024) explica que os Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH) referem-se a compostos que fazem parte da mistura de petróleo e aos componentes extraídos de amostras específicas. Esses compostos podem incluir hidrocarbonetos encontrados em óleos brutos, gasolina, óleo diesel, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e óleos lubrificantes. A liberação de TPH no ambiente é frequentemente resultante de atividades antrópicas associadas ao manejo de combustíveis fósseis, como vazamentos em tanques de

armazenamento, danos a tubulações de óleos brutos e refinados, e operações de extração e refino de petróleo.

A análise de TPH em amostras de subsuperfície, como afirmado por Radelyuk et al. (2021), é essencial para identificar alterações na qualidade dos solos e da água subterrânea. Essas análises desempenham um papel fundamental em investigações ambientais, permitindo a determinação dos compostos contaminantes presentes, a avaliação do estágio de contaminação, a identificação das fontes do contaminante e a aferição da eficácia de processos de remediação.

Neste contexto, a cromatografia gasosa será empregada para avaliar a eficácia da introdução do Pó de Vidro (PDV) no solo contaminado, fornecendo uma ferramenta analítica precisa para monitorar a composição dos hidrocarbonetos presentes e a eficiência do processo de remediação.

5. RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Durante os ensaios de limites de liquidez realizados com o aparelho de Casagrande, constatou-se que a presença de óleo diesel ocasionou uma lubrificação no equipamento, levando ao desprendimento da mistura na concha, como ilustrado na Figura 27. Esse efeito dificultou a execução dos ensaios, especialmente para teores de óleo diesel de 4%, 6% e 8%, que não puderam ser analisados. Em contrapartida, os ensaios de limite de plasticidade apresentaram resultados satisfatórios para todos os teores de óleo estudados. Por meio da Figura 28, podemos observar que de maneira geral, observou-se que o limite de liquidez tende a diminuir com a adição de 2% de óleo diesel (OD) em comparação ao solo natural (SN), enquanto o limite de plasticidade, conforme apresentado na Tabela 12, não apresentou variações significativas.

Esses resultados corroboram os estudos de Khomehchiyan et al. (2007) e Nazir (2012), embora tenham estudado solos não lateríticos, verificaram a redução dos limites de Atterberg em solos contaminados com óleo diesel, observaram que quando o óleo é misturado ao solo, ele envolve as partículas do solo, diminuindo a absorção de água por estas partículas. Como resultado, a espessura da camada dupla de água, que influencia as propriedades do solo, pode ser reduzida, levando a uma diminuição nos limites de Atterberg.

Figura 27: Ensaio de Limite de Liquidez- SN + 6% OD



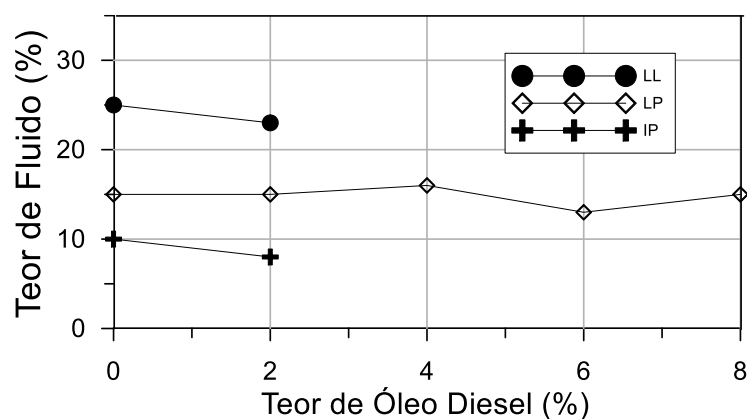
Fonte: Autora (2025)

Tabela 12: Limites de Atterberg - Solo Contaminado

Limites	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 (2025)

Figura 28: Influência do teor de óleo nos limites de Atterberg



Fonte: Autora (2025)

Foram selecionadas amostras de solo contaminadas com 2% e 8% de óleo diesel para análise das variações com 10%, 20% e 30% de PDV. Neste estudo, as amostras serão identificadas pela seguinte nomenclatura: o solo contaminado com 2% de óleo diesel e tratado com 10% de PDV será referido como SOD2%+10%PDV, enquanto o solo contaminado com 8%

de óleo diesel e tratado com 10% de PDV será identificado como SOD8%+10%PDV. Essa mesma lógica será aplicada às demais proporções de PDV (20% e 30%).

Os ensaios dos limites de Atterberg para o solo contaminado com óleo diesel e tratado com PDV foram realizados de forma satisfatória. O uso do pó de vidro proporcionou uma certa aderência na concha do aparelho de Casagrande, o que garantiu a viabilidade do ensaio. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 13. Observou-se que com relação ao Solo Natural (SN) houve uma diminuição dos limites de Attemberg, mas se observarmos as variações com relação aos teores de óleo e pó de vidro, não houve variações de grande significância.

Portelinha et al. (2020) descrevem que a troca iônica, promovida pela aplicação de cal, altera as interações entre as partículas do solo e os ligantes (neste caso, a cal). Essa troca resulta em floculação, ou seja, na agregação das partículas do solo, o que, por sua vez, altera os limites de consistência, como o limite de liquidez e o limite de plasticidade. No entanto, quando o solo é contaminado com óleo, como o diesel, o óleo não apenas recobre as partículas de argila, mas também afeta as partículas de cal, interferindo no processo de estabilização do solo. Esse revestimento das partículas com óleo limita ou altera os efeitos da aplicação de cal, prejudicando a modificação das propriedades do solo.

Esse comportamento pode ser observado de forma semelhante ao que ocorre com o pó de vidro. O pó de vidro também pode atuar como um revestimento, afetando as interações entre as partículas do solo e os ligantes, reduzindo a eficiência da estabilização e interferindo nas propriedades do solo.

Tabela 13: Limites de Attemberg - Solo Contaminado tratado com PDV

	SN	SOD2%+ 10%PDV	SOD2%+ 20%PDV	SOD2%+ 30%PDV	SOD8%+ 10%PDV	SOD8%+ 20%PDV	SOD8%+ 30%PDV
LL	25	18	18	19	17	19	20
LP	15	13	14	15	14	15	14
IP	10	5	4	4	3	4	5

Fonte: Autora (2025)

5.2 PH

O Ensaio de pH foi realizado no laboratório rural de Maringá que realiza análises agronômicas. Segundo Fernandes (2008), um método relativamente simples para determinar se a carga líquida superficial dos colóides é negativa, nula ou positiva consiste na análise do pH do solo em água e em solução de KCl. A diferença entre esses dois valores de pH, denominada delta pH (Δ pH), pode ser positiva, nula ou negativa, dependendo da carga líquida superficial, conforme

observado por Tan (1982). Fernandes (2008) também destaca que o sinal negativo e a magnitude do ΔpH indicam uma predominância de cargas negativas. Nessa situação, a capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos supera a capacidade de troca aniônica (CTA).

Durante a pesquisa, não foi possível realizar o ensaio de pH do óleo diesel. No entanto, nos estudos de Marques (2014), foi registrado um valor de pH igual a 6,7 para o óleo diesel S500. A Tabela 14, apresenta os resultados de pH para o solo natural (SN), solo contaminado com 2% e 8% de óleo diesel, e solo tratado com 10%, 20% e 30% de PDV. Observou-se um aumento no pH das amostras contaminadas com óleo diesel; à medida que a quantidade de contaminante aumentava, o pH também se elevava. Segundo Cardoso (2024), esse aumento pode ser explicado pelo fato de o pH do óleo diesel ser superior ao pH do solo natural, de modo que, ao ocorrer a contaminação, o pH se eleva conforme a concentração de óleo diesel aumenta.

Segundo Filho et al. (2017), o pH do meio influencia significativamente a atividade pozolânica, podendo ser utilizado como um indicador dessa propriedade. Costa (2020) destaca que a atividade pozolânica ocorre como consequência da reatividade em meio alcalino. No tratamento de solo contaminado com óleo diesel utilizando pó de vidro (PDV), o aumento expressivo do pH para valores alcalinos sugere que o PDV não apenas alcaliniza o solo, mas também pode ser um indicativo de atividade pozolânica devido à interação química entre o material e o meio. Como abordado no item 4.6.7, embora o resíduo investigado neste estudo tenha apresentado uma atividade pozolânica reduzida, não sendo considerada significativa conforme os critérios estabelecidos pela norma, acredita-se que, caso o resíduo seja submetido a um processo de trituração mais intenso, alcançando um grau de finura superior, sua atividade pozolânica poderia se tornar mais expressiva.

Tabela 14: pH das amostras de Solo Natural e das Misturas

Amostra	pH em água (H ₂ O)	pH em Cloreto de Cálcio (KCl)	Delta pH
SN	4,89	4,24	-0,65
PDV	12,24	11,84	-0,40
SN+2%OD	5,5	4,20	-1,30
SN+4%OD	5,48	4,25	-1,23
SN+6%OD	5,67	4,48	-1,29
SN+8%OD	6,13	4,32	-1,81
SOD2%+10%PDV	11,24	9,60	-1,64
SOD2%+20%PDV	11,61	10,40	-1,21
SOD2%+30%PDV	11,89	10,90	-0,99
SOD8%+10%PDV	11,26	9,7	-1,56
SOD8%+20%PDV	11,72	10,41	-1,31
SOD8%+30%PDV	11,90	10,85	-1,05

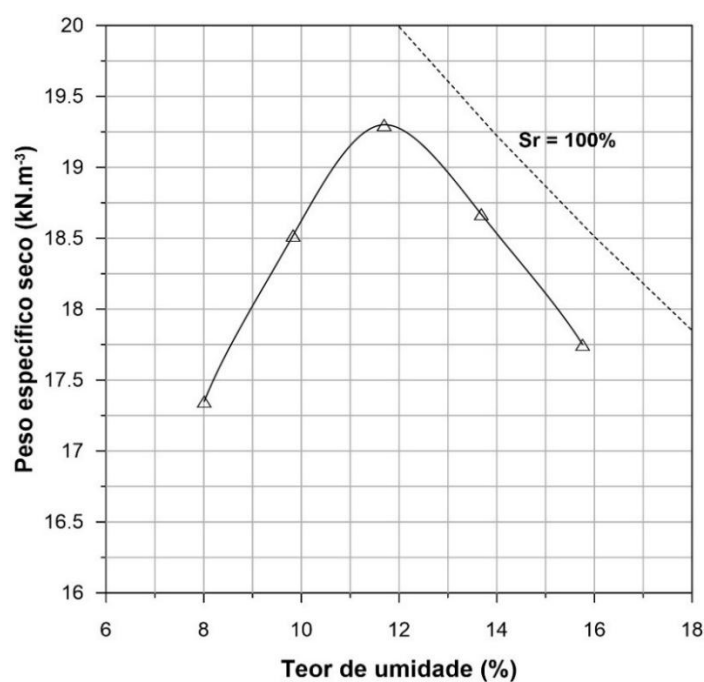
Fonte: Autora (2025)

5.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

5.3.1 Solo Natural

A Figura 29 ilustra a curva de compactação do solo natural, na qual foram determinados os seguintes parâmetros: umidade ótima de 11,69% e peso específico seco máximo de 19,30 kN/m³.

Figura 29: Curva de Compactação- Solo Natural



Fonte: Autora (2025)

5.3.2 Solo contaminado com diferentes teores de Óleo Diesel

Para os teores mais elevados de óleo diesel, como 6% e 8%, foi observado um acúmulo de óleo na superfície dos corpos de prova, conforme ilustrado nas Figura 30 (a) e (b). Esse acúmulo, em determinados casos, apresentou desafios durante a manipulação dos corpos de prova, demandando precauções adicionais. Esse comportamento está relacionado à atuação do óleo como um agente de "lubrificação" no cilindro, ocasionando o descolamento ocasional dos corpos de prova durante movimentações simples. Ademais, constatou-se que, ao adicionar água à amostra contaminada, o óleo formava uma camada protetora que dificultava a infiltração da água, conforme evidenciado nas Figura 31 (a) e (b). De acordo com Portelinha et al. (2021), as moléculas de óleo diesel revestem as partículas do solo, reduzindo a capacidade de absorção de água, as trocas catiônicas e as reações químicas.

Figura 30: Acúmulo de óleo na superfície dos corpos de prova



(a)



(b)

Fonte: Autora (2025)

Figura 31: Adição de água ao solo contaminado para o ensaio de Compactação



(a)



(b)

Fonte: Autora (2025)

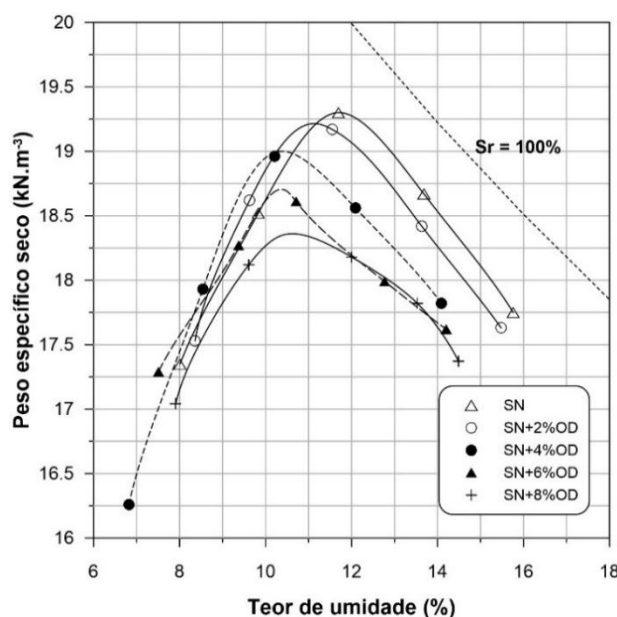
Portelinha et al. (2021) explicam que as moléculas de água, por serem polares, possuem maior afinidade com as partículas de argila, enquanto as moléculas do óleo diesel, por sua natureza apolar, apresentam menor capacidade de adsorção pelas partículas do solo. Essa diferença resulta em uma influência mais significativa das moléculas de água sobre amostras naturais, o que altera as propriedades do solo de maneira mais pronunciada em comparação às amostras contaminadas com diesel.

Essa diferença de comportamento é evidenciada no gráfico da Figura 32 (a), que compara as curvas de compactação de solos naturais e contaminados com diesel. A presença do diesel provoca alterações notáveis nessas curvas, impactando diretamente o comportamento do solo. Essas modificações incluem reduções significativas nos valores de peso específico seco máximo ($\gamma_{d_{max}}$) e no teor de umidade ótima, à medida que se aumentou a concentração do contaminante, como pode ser observado nos gráficos da Figura 33 (a) e (b).

Cardoso (2024) atribui essa redução à menor densidade do óleo diesel ($8,44 \text{ kN/m}^3$) em relação à densidade do solo ($26,30 \text{ kN/m}^3$), o que explica a diminuição do peso específico seco máximo conforme aumenta o teor de diesel no solo.

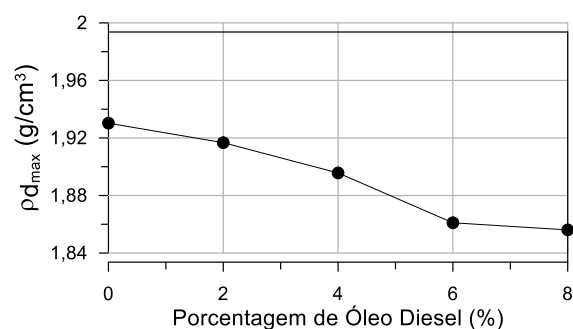
Ahmad et al. (2020) reforçam essa análise ao apontar que a substituição de partículas do solo por materiais mais leves, como o óleo diesel, contribui diretamente para a redução do peso específico seco máximo em solos contaminados. Esse comportamento também foi identificado no estudo realizado por Portelinha et al. (2021).

Figura 32: Curva de Compactação Solo

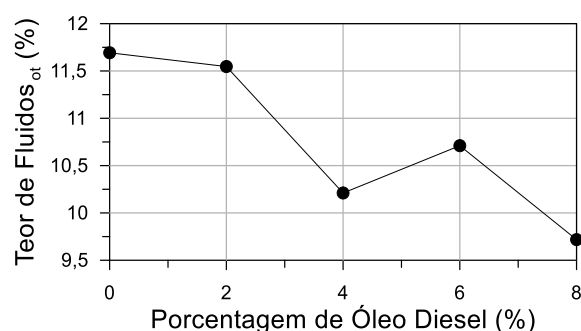


Fonte: Autora (2025)

Figura 33: Variação da massa específica seca máxima e da umidade ótima



(a)



(b)

Fonte: Autora (2025)

5.3.3 Solo contaminado com óleo diesel e tratado com PDV

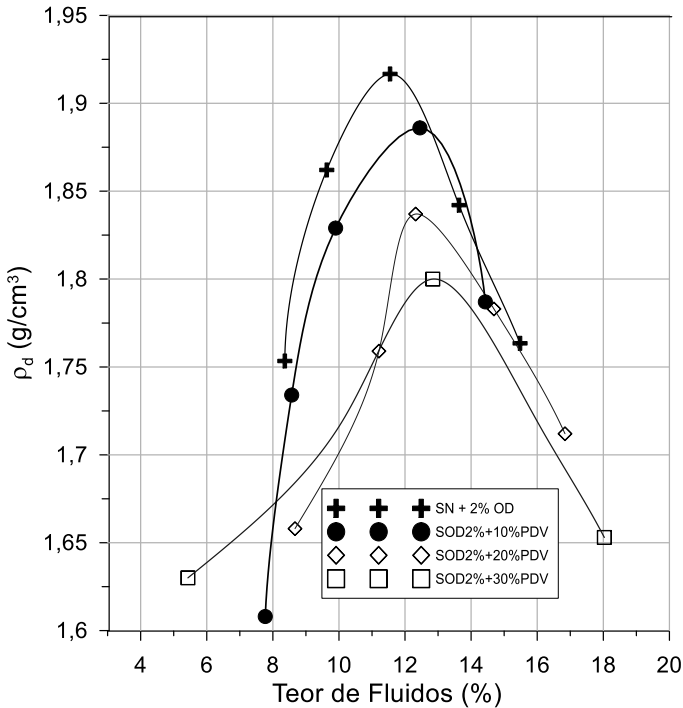
Para o tratamento das amostras, foram analisadas curvas representativas de solos contaminados com 2% e 8% de óleo diesel, aos quais foram adicionados diferentes teores de PDV (10%, 20% e 30%). No ensaio de compactação das amostras tratadas com PDV, observou-se que, para os solos com 2% de óleo diesel (Figura 34), houve uma redução na massa específica seca máxima (Figura 36), enquanto a umidade ótima manteve-se praticamente constante (Figura 35). A curva de compactação referente ao solo contaminado com 8% de óleo diesel é apresentada na Figura 37. Adicionalmente, as Figura 35 e Figura 36 mostram, respectivamente, a influência do teor de óleo diesel no teor de fluido e na massa específica seca máxima. Verificou-se que o aumento no teor de óleo diesel resultou em uma redução da massa específica seca máxima. Quanto o teor de fluido, observou-se um aumento entre os teores de 10% e 20% de PDV, seguido por uma redução entre os teores de 20% e 30%. No entanto, as variações do teor de fluido mantiveram-se inferiores a 2%.

Portelinha (2020) esclarece que, devido à sua natureza fina, a cal tende a aumentar a porosidade do solo, o que resulta em uma diminuição do peso unitário seco e, ao mesmo tempo, provoca alterações na umidade ótima de compactação. Quando os solos contaminados com diesel

foram comparados aos solos tratados com calcário, os parâmetros de compactação mostraram variações menores nos solos tratados. Isso sugere que o diesel pode limitar a reação entre a cal e o solo, provavelmente devido à interação do óleo com as partículas do solo. O peso unitário seco máximo dos solos, contaminados com diesel, diminuiu à medida que a quantidade de cal foi aumentada. O mesmo pode ser observado ao usar o pó de vidro para tratar o solo contaminado

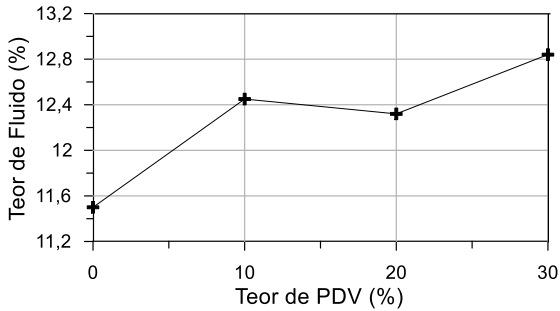
A presença de óleo diesel pode ter impedido a absorção de PDV e água, sem causar mudanças substanciais nos valores de umidade ótima de compactação. O óleo, ao ser retido nos poros do solo, interferiu no processo de compactação, dificultando a interação do PDV com as partículas do solo, o que comprometeu a eficiência da compactação.

Figura 34: Curvas de Compactação do SOD2% Tratado com PDV



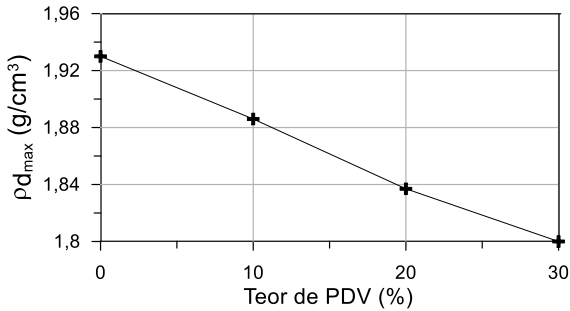
Fonte: Autora (2025)

Figura 35: Influência do teor de PDV na umidade ótima - 2%OD



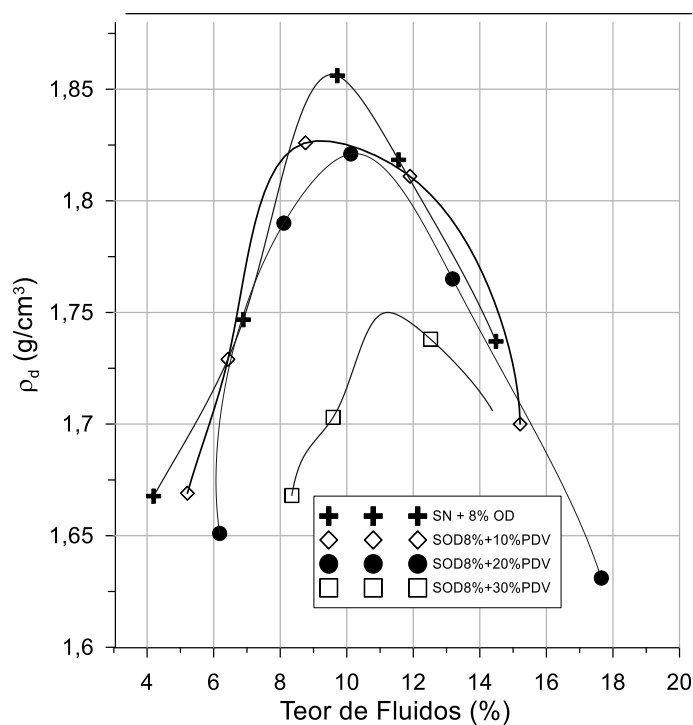
Fonte: Autora (2025)

Figura 36: Influência do teor de PDV na massa específica - 2%OD



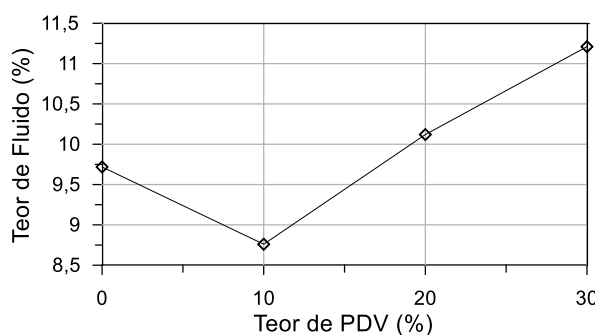
Fonte: Autora (2025)

Figura 37: Curvas de Compactação do SOD8% Tratado com PDV



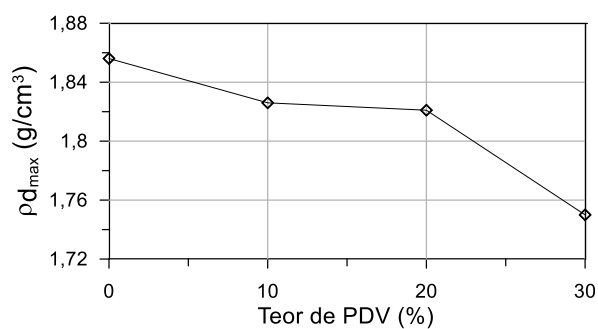
Fonte: Autora (2025)

Figura 38: Influência do teor de PDV na umidade ótima- 8%OD



Fonte: Autora (2025)

Figura 39: Influência do teor de PDV na massa específica solo - 8%OD



Fonte: Autora (2025)

5.4 RESISTENCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

Para a moldagem dos corpos de prova (CPs) de solo natural e solo contaminado com diferentes teores de óleo diesel, independentemente do teor de óleo diesel, foi padronizado o teor de fluidos ótimo (água e óleo diesel) e o peso específico seco máximo, com base na curva das misturas de solo natural (SN) com 8% de óleo diesel (OD) e solo natural (SN) com 2% de óleo diesel (OD). O controle foi realizado adotando um grau de compactação de 100%, permitindo variações de até $\pm 2\%$.

5.4.1 Solo contaminado com diferentes teores de Óleo Diesel

Inicialmente, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão simples tanto para o solo natural quanto para as amostras contaminadas com 2%, 4%, 6% e 8% de óleo diesel. Os resultados com relação aos tempos de cura podem ser observados na Tabela 15.

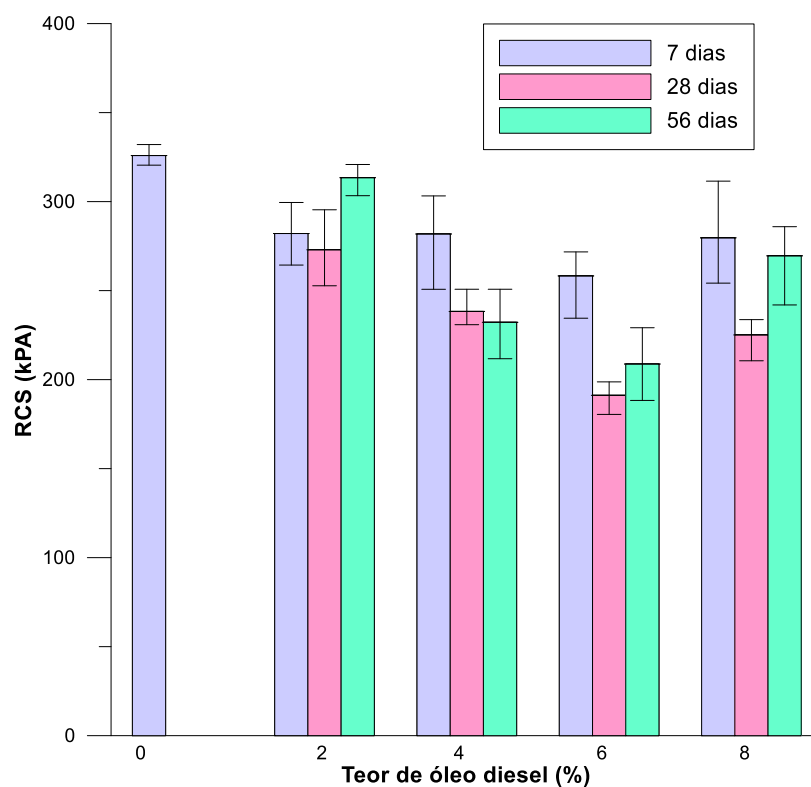
Tabela 15: Resistência a Compressão Simples – Solo contaminado com OD (kPa)

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

Fonte: Autora (2025)

Verificou-se uma redução na resistência quando comparados o solo natural e os diferentes teores de óleo diesel. Mendes, Correia e Portelinha (2019) apontaram uma diminuição aproximada de 19% na resistência de solos contaminados com 8% de óleo diesel após 28 dias de cura. Observou-se que a resistência à compressão simples (RCS) do solo reduziu ao longo do tempo, especialmente ao comparar os períodos de 7 e 28 dias. Para as amostras analisadas aos 28 dias, as reduções na resistência foram de 16%, 27%, 41% e 31% para os teores de 2%, 4%, 6% e 8% de óleo diesel, respectivamente. No entanto, para as amostras avaliadas aos 56 dias, foi identificado um aumento na resistência para os teores de 2% e 8% de óleo diesel. Segundo Cardoso (2024), esse comportamento pode ser atribuído à evaporação do óleo diesel ao longo do tempo. Para complementar, a Figura 40 apresenta o gráfico da resistência à compressão simples do solo contaminado com diferentes teores de óleo diesel.

Figura 40: RCS amostras Contaminadas com OD



Autora (2024)

5.4.2 Solo contaminado óleo diesel e tratado com PDV

A Tabela 16 apresenta a média dos resultados obtidos para três corpos de prova, cujos parâmetros de compactação não exibiram variações significativas, permanecendo dentro da tolerância de $\pm 2\%$ no grau de compactação. Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados em amostras contendo 2% e 8% de óleo diesel, tratadas com 10%, 20% e 30% de pó de vidro. Os gráficos correspondentes a cada amostra e aos respectivos tempos de cura estão anexados para consulta.

Tabela 16: Resistência a Compressão simples de solo contaminado tratado com PDV

Amostra	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS(kPa)	DP	Variância
Solo + 8%OD+10%PDV	7 dias	10,4%	1,1%	1,804	98%	0,448	63%	31%	110,28	8,86	8%
	28 dias	9,7%	0,4%	1,826	99%	0,431	58%	30%	141,40	10,23	8%
	56 dias	9,2%	0,0%	1,834	100%	0,424	57%	30%	173,06	9,44	5%
Solo + 8%OD+20%PDV	7 dias	11,5%	1%	1,803	99%	0,448	68%	31%	128,23	13,2	10%
	28 dias	10,5%	0,3%	1,834	101%	0,424	65%	30%	311,28	33,48	11%
	56 dias	11,5%	1,3%	1,799	99%	0,452	68%	31%	334,52	9,98	3%
Solo + 8%OD+30%PDV	7 dias	13,5%	2,3%	1,718	98%	0,520	67%	34%	98,69	6,84	7%
	28 dias	13,0%	1,8%	1,721	98%	0,518	66%	34%	191,19	9,35	5%
	56 dias	12,4%	1,2%	1,732	99%	0,508	65%	34%	440,38	4,35	1%
Solo + 2%OD+10%PDV	7 dias	10,5%	-2%	1,848	98%	0,413	69%	29%	262,12	26,69	10%
	28 dias	11,4%	-1%	1,902	101%	0,373	80%	27%	619,44	52,26	10%
	56 dias	11,2%	-1%	1,901	101%	0,374	79%	27%	522,63	51,05	9%
Solo + 2%OD+20%PDV	7 dias	13,0%	1%	1,819	100%	0,436	79%	30%	323,50	111,8	5%
	28 dias	12,0%	0%	1,836	100%	0,422	74%	30%	203,46	19,7	10%
	56 dias	11,4%	-1%	1,860	101%	0,404	73%	29%	917,63	21,94	13%
Solo + 2%OD+30%PDV	7 dias	12,8%	0%	1,812	100%	0,442	76%	31%	157,69	11,95	8%
	28 dias	12,96%	13%	1,798	100%	0,453	74%	31%	766,73	30,61	4%
	56 dias	12,7%	0%	1,808	100%	0,445	75%	31%	1445,87	15,24	8%

Fonte: Autora (2025)

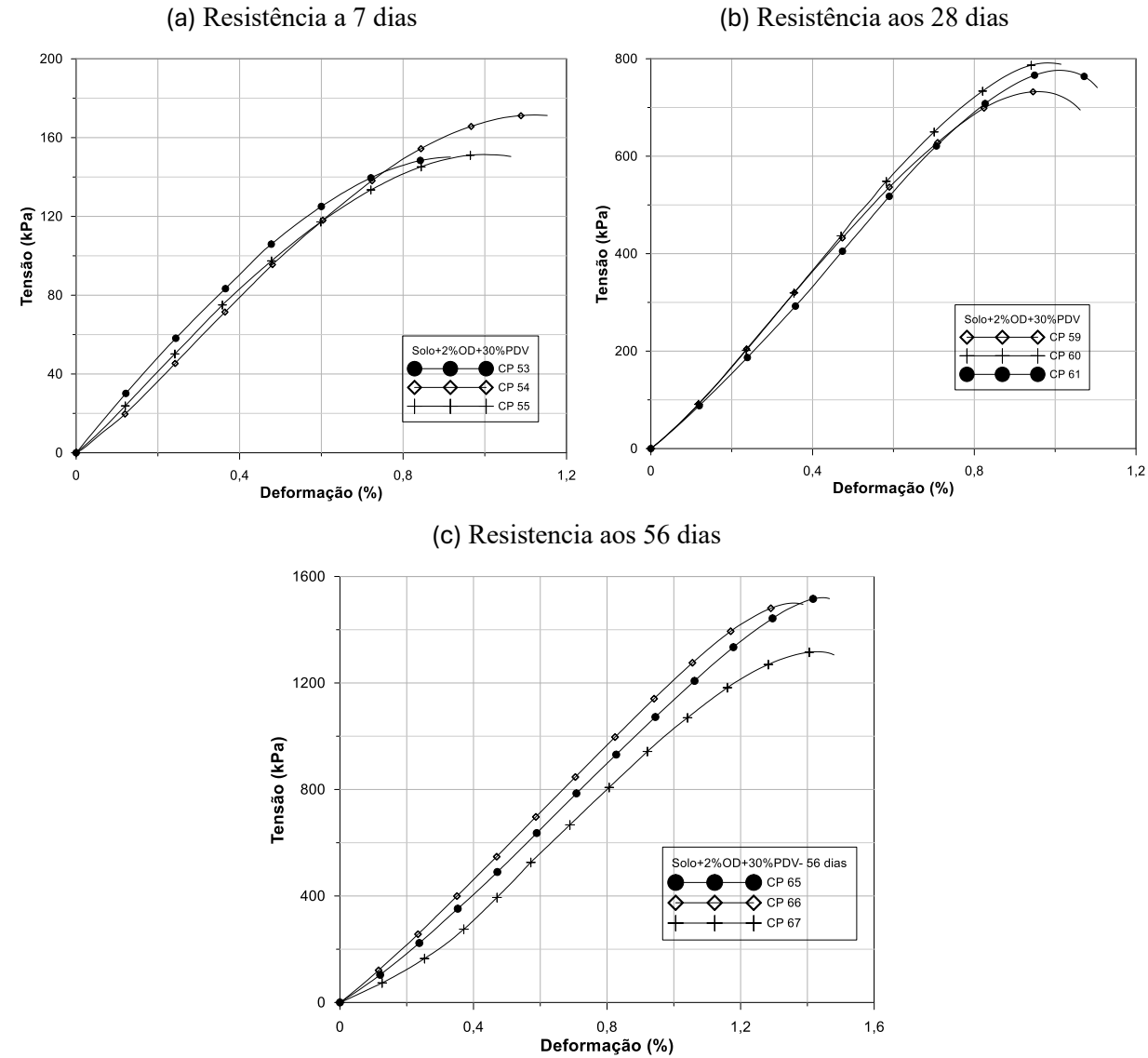
Observou-se um aumento significativo na resistência da amostra SOD2%+30%PDV, conforme ilustrado na Figura 41. Em particular, essa amostra apresentou um incremento de tensão de 609,04 kPa no intervalo de 7 para 28 dias e de 679,14 kPa entre 28 e 56 dias. As demais amostras também apresentaram aumento de tensão com a ampliação do tempo de cura. Embora o pó de vidro (PDV) não tenha demonstrado atividade pozolânica pelo método de Chapelle modificado, sua composição química sugere potencial pozolânico. Assim, o ganho de resistência observado pode ser atribuído ao preenchimento dos vazios e ao rearranjo das partículas, resultando em uma melhoria na resistência do material.

De acordo com o estudo de Jia et al. (2011), em solos contaminados com baixos teores de óleo diesel e submetidos a curtos períodos de cura, a deterioração das propriedades do solo é pouco significativa. O óleo diesel forma uma fina camada ao redor das partículas de argila, funcionando como uma interface viscosa que promove a reorganização estrutural e melhora a compactação do solo. Esse mecanismo contribui para um aumento discreto, porém consistente, na resistência à compressão simples.

Observou-se que, para um mesmo tempo de cura e teor de resíduo, a resistência à compressão simples diminui à medida que se aumenta a quantidade de óleo. Esse comportamento também foi identificado por Heineck et al. (2007) ao avaliar a eficiência da remediação de um solo residual do arenito Botucatu (SRAB) contaminado por hidrocarbonetos, utilizando o método de solidificação/estabilização com adição de cimento Portland. O estudo concluiu que a

resistência aumenta com o teor de cimento e o tempo de cura, mas reduz-se com a adição de borra oleosa ácida, sendo que maiores quantidades dessa borra resultam em menor resistência, mesmo para um teor fixo de cimento.

Figura 41:Ensaio de Resistencia a Compressão Simples – SOD2%+30%PDV



Fonte: Autora (2025)

As Figura 42 e Figura 43 mostram a variação da resistência à compressão simples do solo contaminado com 2% e 8% de óleo diesel, respectivamente, em função do teor de pó de vidro (PDV) incorporado, analisada em diferentes períodos de cura: 7, 28 e 56 dias. Na Figura 42Figura 43, referente ao solo contaminado com 2% de óleo diesel, observa-se que, aos 7 dias, a resistência é relativamente baixa, com variações mínimas em função do teor de PDV.

Aos 28 dias, verifica-se um aumento inicial da resistência até aproximadamente 20% de PDV, seguido por uma leve redução. Esse comportamento pode ser atribuído a possíveis

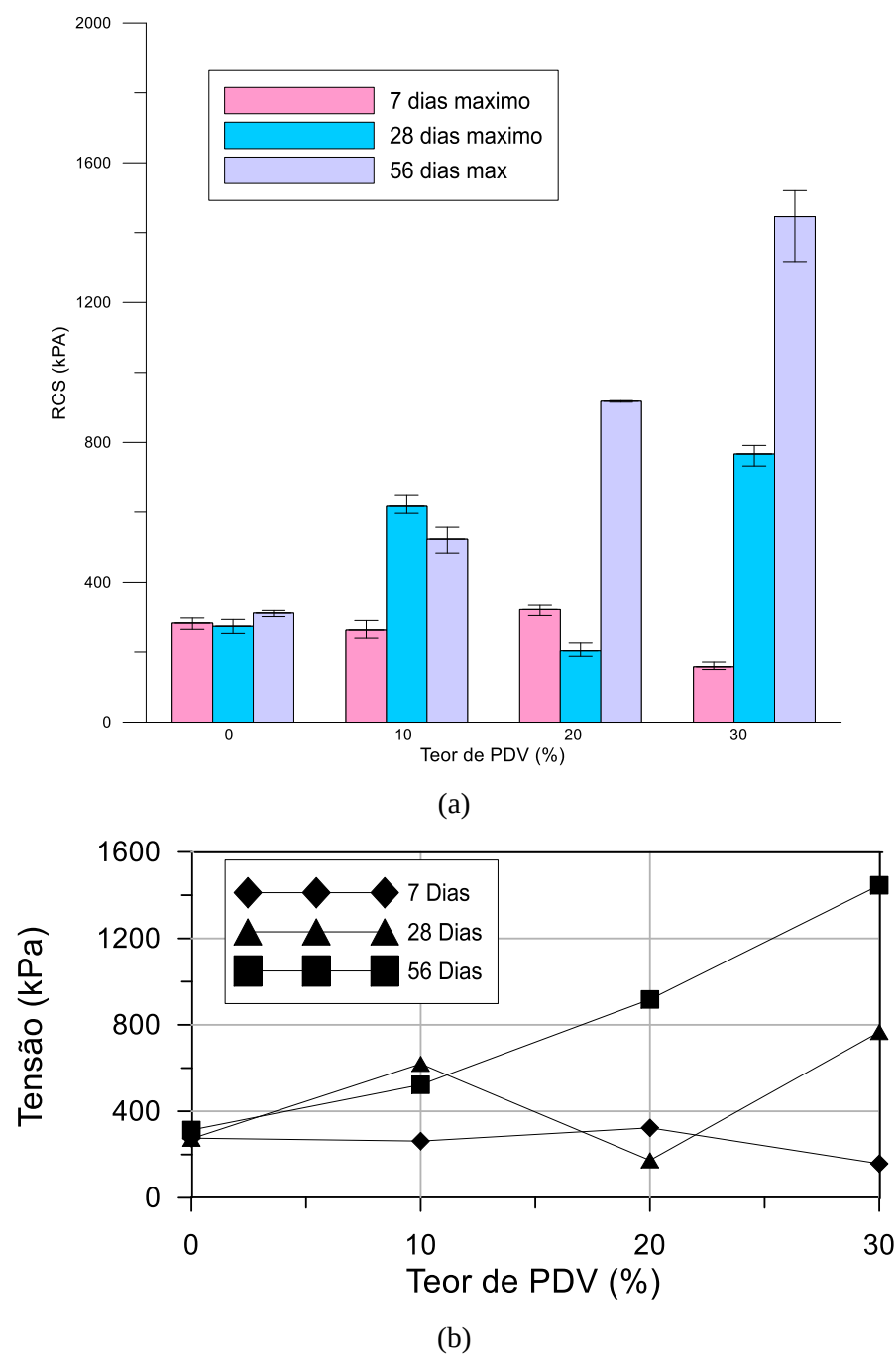
inconsistências no processo de moldagem dos corpos de prova, considerando que este foi o único grupo a apresentar diminuição na resistência durante esse período. Por outro lado, aos 56 dias, observa-se um aumento contínuo na resistência. Esses resultados sugerem que o resíduo desempenha um papel relevante nas reações secundárias, como as pozolânicas, favorecendo o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo.

Embora a atividade pozolânica do pó de vidro tenha sido considerada baixa neste estudo, o que impede sua classificação como pozolânico segundo a norma vigente, Borges (2021) observou que essa atividade aumenta com a redução da granulometria, demonstrando a importância da maior finura para o desempenho do material. Ademais, Rotta e Radke (2022) constataram que o material proveniente da mesma indústria apresentou elevada atividade pozolânica. Essa diferença pode ser atribuída à granulometria empregada: enquanto este estudo utilizou material passante na peneira 50, o trabalho de Rotta e Radke (2022) utilizou material passante na peneira 200. Isso evidencia o potencial do material para atividade pozolânica, especialmente quando ajustes na granulometria são considerados.

A Figura 43 apresenta a variação da resistência à compressão simples do solo contaminado com 8% de óleo diesel em função do aumento do teor de resíduo de pó de vidro (PDV). Em todos os períodos analisados, verifica-se um aumento da resistência à compressão com o incremento do teor de PDV. O valor máximo de resistência foi registrado na amostra contendo 2% de óleo diesel tratado com 30% de PDV aos 56 dias, alcançando 1445,87 kPa. Em contrapartida, o solo contaminado com óleo diesel sem tratamento apresentou uma resistência de apenas 269,54 kPa aos 56 dias, destacando o ganho significativo proporcionado pela adição do resíduo, considerando o mesmo período de cura.

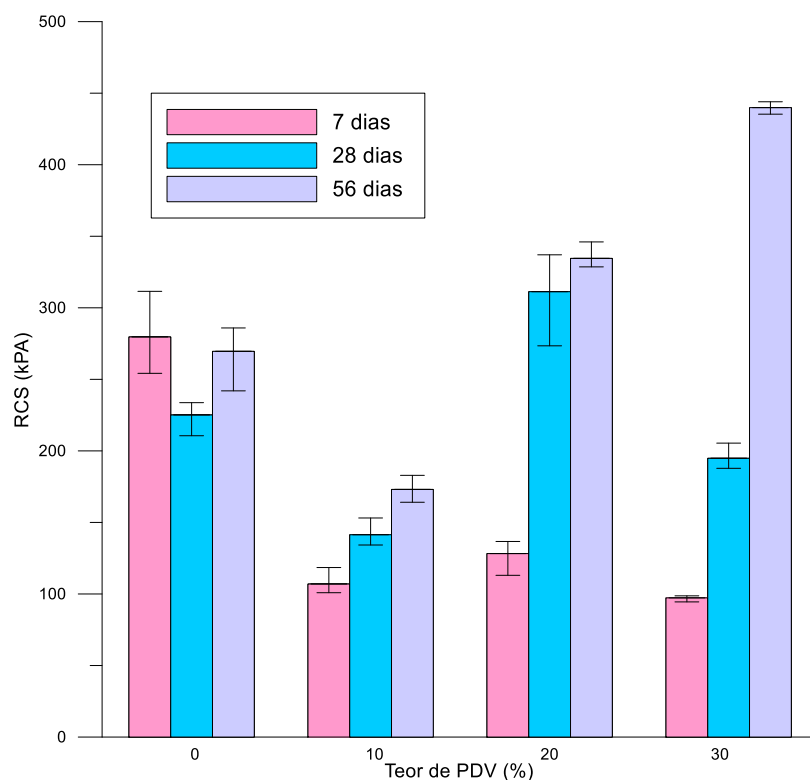
Além disso, observa-se que a resistência continua a aumentar com o tempo de cura, embora de maneira menos acentuada, indicando o desenvolvimento progressivo de reações químicas. Apesar de o pó de vidro utilizado neste estudo não apresentar atividade pozolânica, é provável que outros mecanismos, como interações físicas ou processos de estabilização do solo, estejam contribuindo para o aumento da resistência observado.

Figura 42: Resistência a compressão simples - 2%OD tratado com PDV

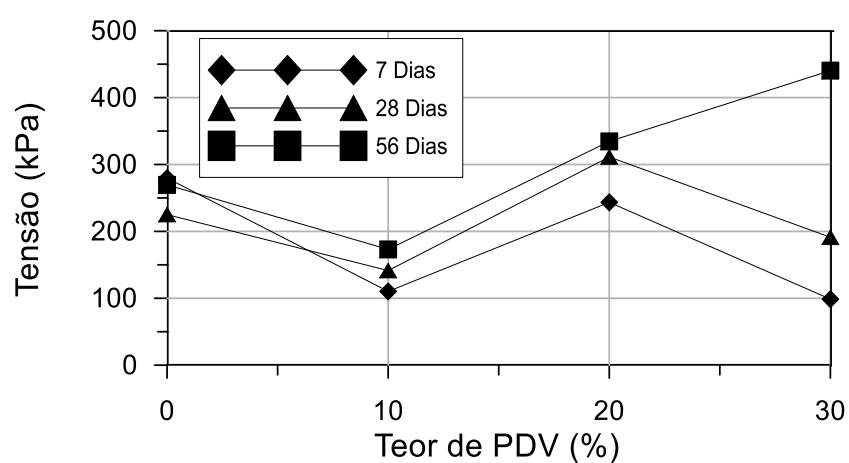


Fonte: Autora (2025)

Figura 43: Resistência a compressão simples - 8%OD tratado com PDV



(a)



(b)

Nas Figura 44 Figura 45 observa-se um aumento no índice de vazios e na porosidade para as amostras de solo natural solo contaminado 2% e 8% de OD respectivamente tratadas com 10%, 20% e 30% de PDV. Esse fenômeno pode ser explicado pelo empacotamento das partículas, processo no qual as partículas se organizam em um espaço de forma a otimizar sua disposição. O pó de vidro, por possuir partículas mais finas que o solo, tende a preencher os espaços entre as partículas maiores, o que, inicialmente, poderia reduzir os vazios. No entanto, as partículas finas

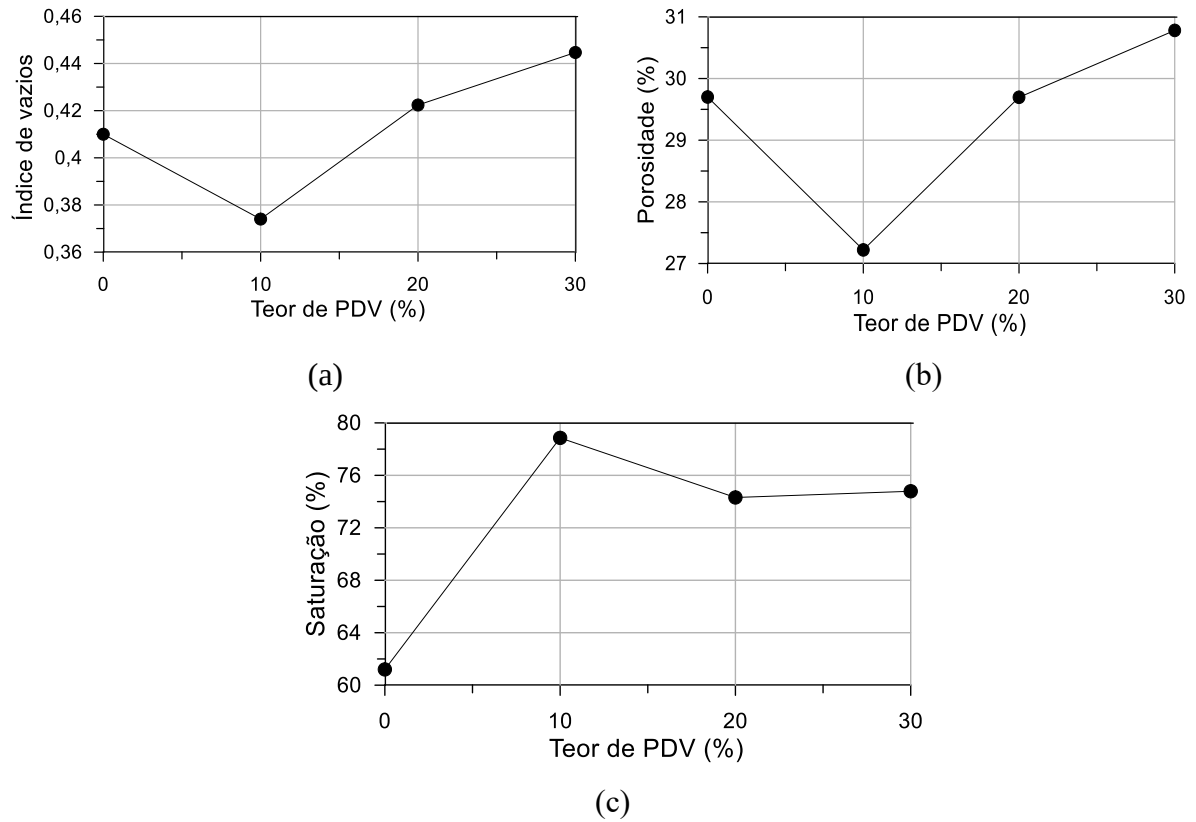
compactam de maneira diferente das maiores, resultando em uma estrutura com pequenos poros interconectados. Esse rearranjo aumenta a porosidade e contribui para o aumento do índice de vazios, mesmo com o acréscimo na resistência à compressão simples. Assim, o empacotamento das partículas finas do pó de vidro gera uma configuração que, embora melhore a resistência, também eleva a quantidade de vazios microscópicos e a porosidade do material.

Goes et al. (2020) destacam que a granulometria das partículas pode gerar dois efeitos distintos em uma mistura. O efeito parede ocorre quando materiais com partículas de tamanhos muito diferentes se misturam, fazendo com que a superfície das partículas maiores atue como um plano de contato com as partículas menores, o que aumenta os vazios nas regiões próximas à superfície das partículas maiores. Já o efeito de afastamento é observado quando as partículas finas não são grandes o suficiente para preencher os espaços vazios entre as partículas maiores, resultando no aumento dos vazios na mistura (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

Na amostra com 8% de óleo diesel, o aumento da quantidade de pó de vidro resultou em maior saturação, apesar do aumento nos vazios. Isso pode ocorrer porque o pó de vidro, ao interagir com o óleo diesel, pode dificultar a compactação devido à presença do óleo, que forma uma camada que impede a agregação eficiente das partículas de solo. Com mais pó de vidro, há um aumento na quantidade de vazios, mas a água necessária para preencher esses espaços também aumenta, resultando em maior saturação.

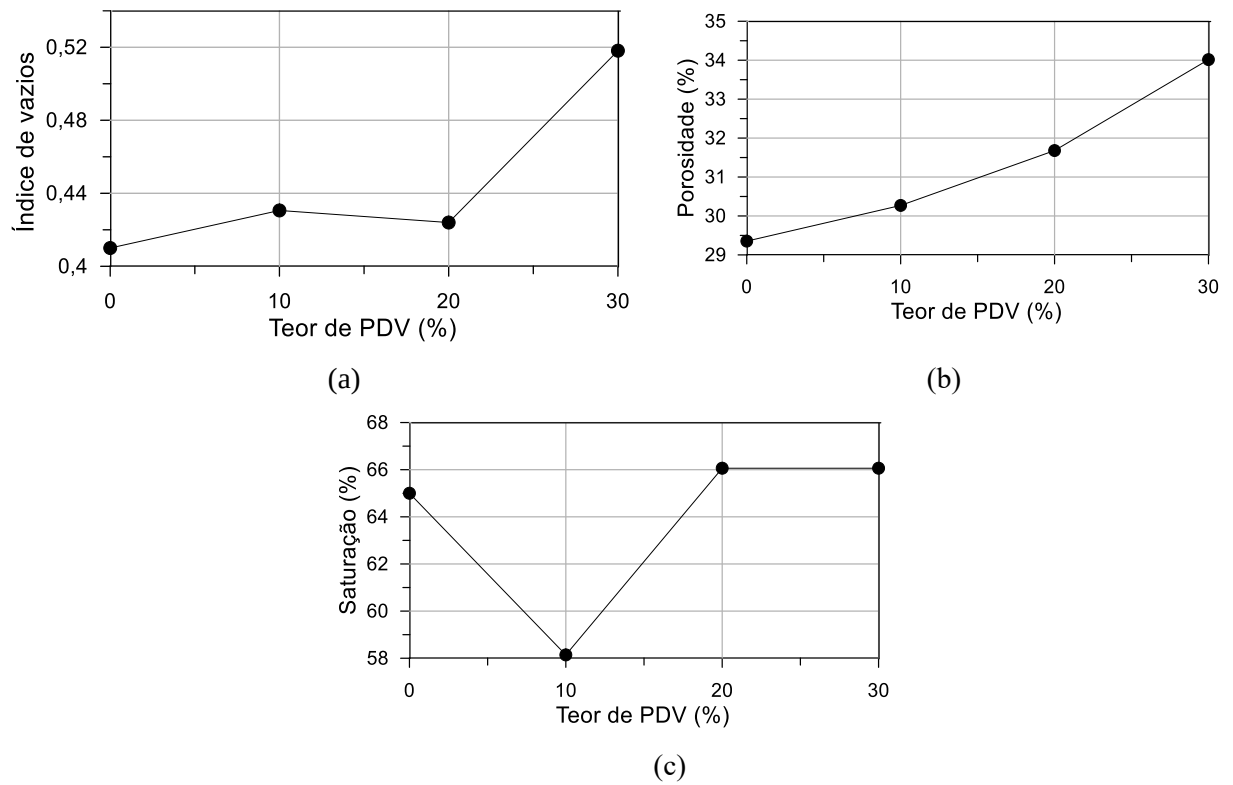
Na amostra com 2% de óleo diesel, a adição de pó de vidro também resultou no aumento dos vazios, mas a saturação diminuiu. Isso ocorre porque, com a menor quantidade de óleo, a estrutura do solo ainda permite alguma compactação, mas a presença do pó de vidro, apesar de promover a interação, pode ter dificultado a compactação ideal, criando mais vazios. No entanto, a menor quantidade de óleo significa que, mesmo com o aumento dos vazios, a água necessária para preencher os espaços é menor, resultando em menor saturação em comparação com a amostra com 8% de óleo diesel.

Figura 44: Condições dos Corpos de Prova-2%OD



Fonte: Autora (2025)

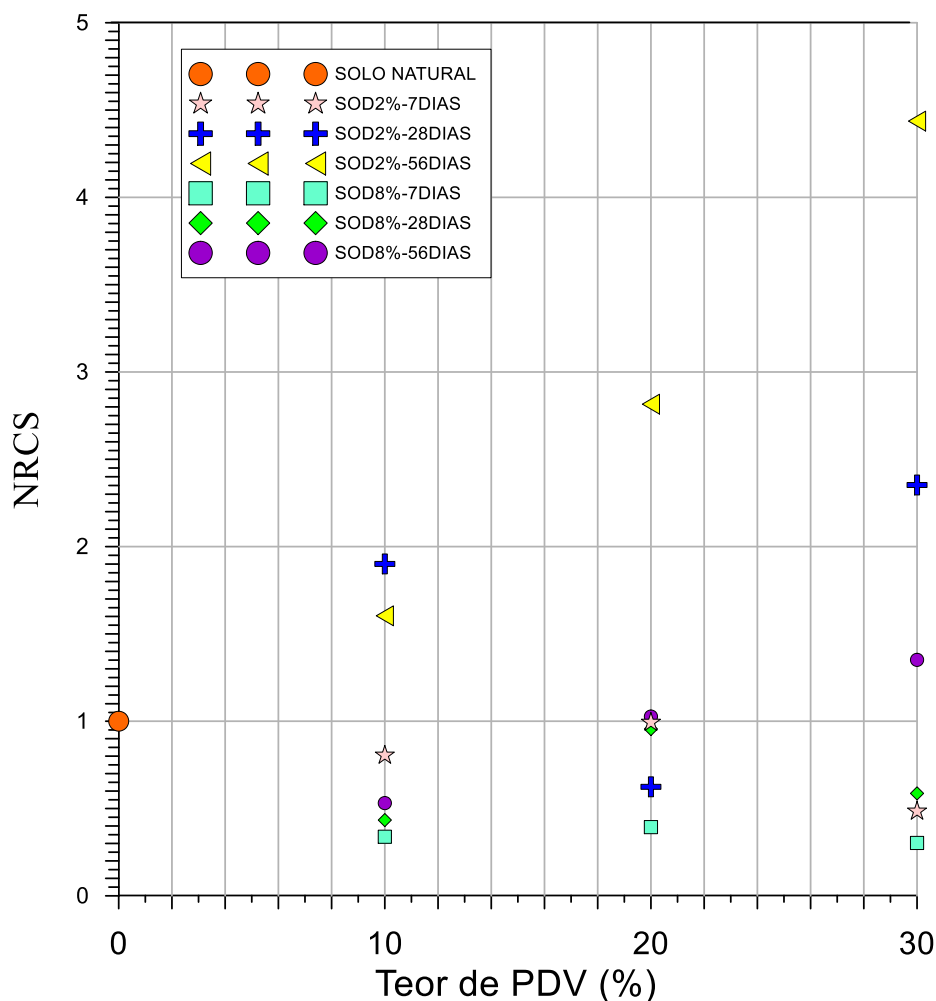
Figura 45: Condições dos Corpos de Prova-8%OD



Fonte: Autora (2025)

A Figura 46 a seguir apresenta a normalização da resistência do solo contaminado com óleo diesel e do solo contaminado tratado com pó de vidro em relação ao solo natural, visando uma análise comparativa dos valores.

Figura 46: Normalização das Resistências com relação ao Solo Natural



Fonte: Autora (2025)

5.5 CROMATOGRAFIA

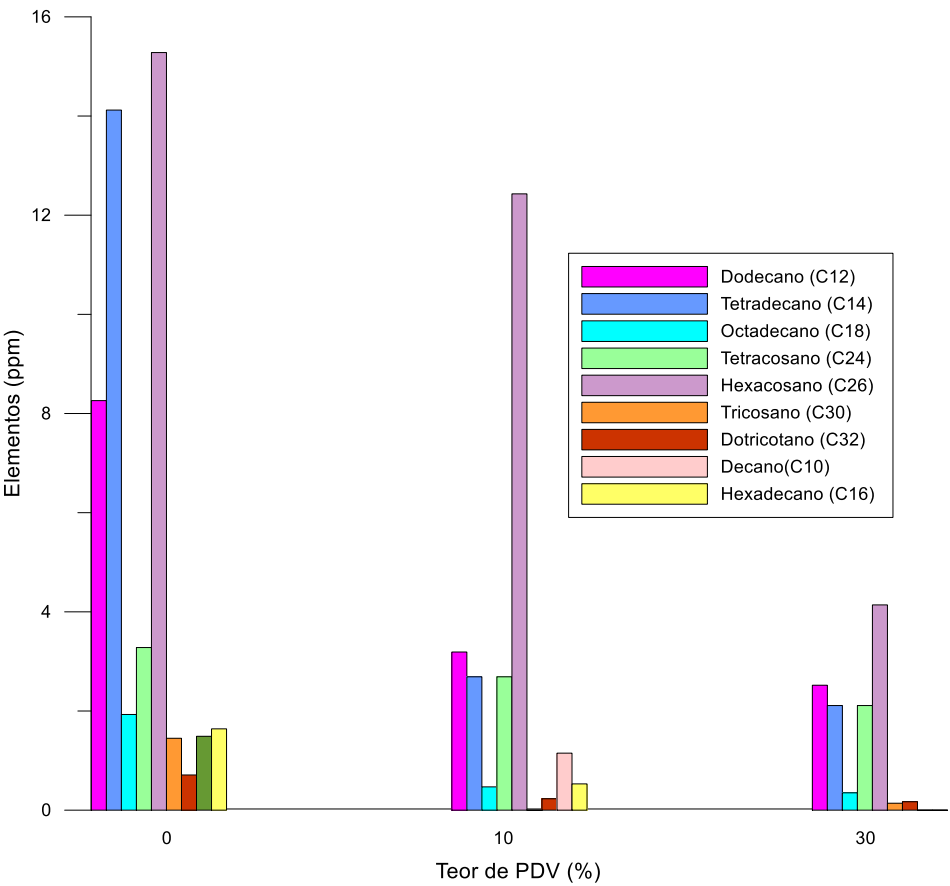
Para analisar a eficiência do pó de vidro (PDV) no tratamento de um solo contaminado com óleo diesel, foi realizada cromatografia, conforme apresentado na Figura 47. A análise considerou as condições de controle do solo contaminado com 8% de óleo diesel e a incorporação de 10% e 30% de PDV. Foram identificados hidrocarbonetos alifáticos, como dodecano, tetradecano, octadecano, tetracosano, hexacosano, tricosano, dotriacontano, decano e hexadecano, todos característicos do óleo diesel.

No solo sem a incorporação de resíduo, observa-se a maior concentração de hidrocarbonetos, com destaque para hexacosano e dodecano, refletindo a contaminação inicial significativa. Com a adição de 10% de PDV, há uma redução considerável na concentração da

maioria dos compostos, indicando que o resíduo contribui para a mitigação dos contaminantes, possivelmente por bioestimulação ou encapsulamento. Já com 30% de PDV, as concentrações diminuem ainda mais, atingindo níveis residuais em diversos compostos, o que evidencia uma maior eficiência na remediação.

A comparação entre os teores de 0%, 10% e 30% de PDV demonstra uma relação proporcional entre a quantidade de resíduo incorporado e a redução dos hidrocarbonetos presentes no solo. Essa redução pode ser atribuída à criação de condições favoráveis para a biodegradação ou à adsorção dos contaminantes pelo resíduo. Assim, a estratégia de utilização de resíduo, especialmente em concentrações mais elevadas, mostra-se eficaz para a remediação de solos contaminados com diesel.

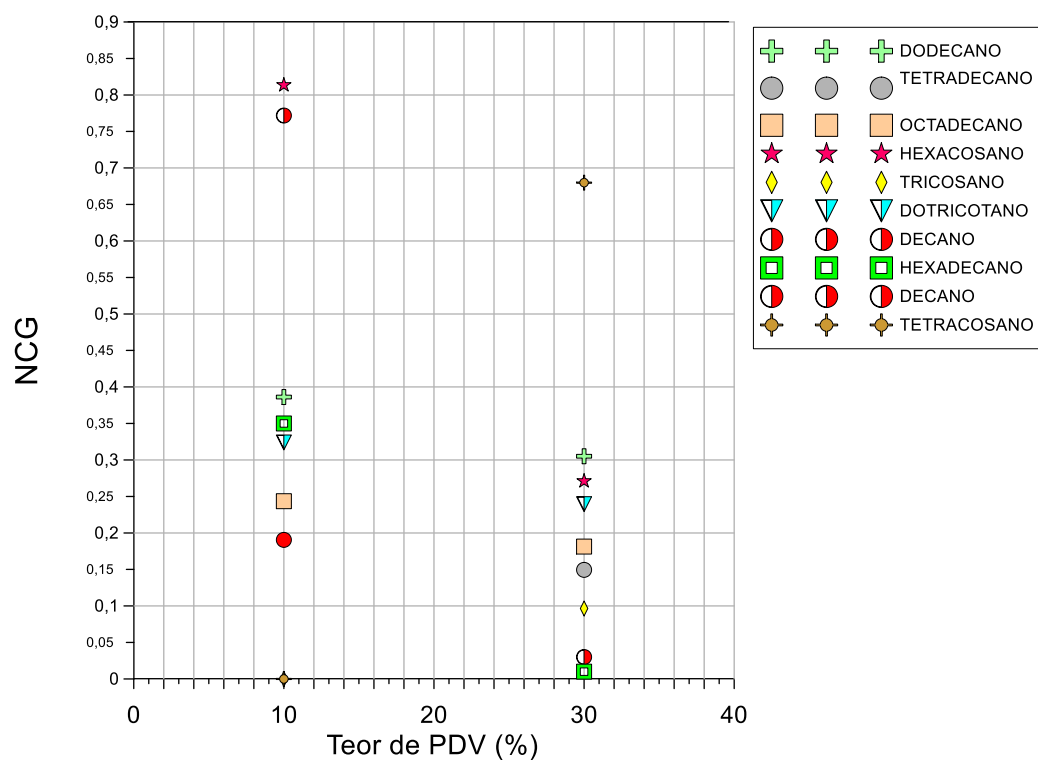
Figura 47: Cromatografia Gasosa Solo contaminado com diesel e tratado com PDV



Fonte: Autora (2025)

A Figura 48 apresenta a normalização dos dados cromatográficos obtidos para as amostras analisadas, permitindo uma comparação mais precisa entre os diferentes tratamentos e condições experimentais representadas no gráfico.

Figura 48 : Normalização da Cromatografia



6. CONCLUSÃO

Este estudo investigou o tratamento de solo contaminado com óleo diesel utilizando resíduo de pó de vidro (PDV), avaliando suas propriedades geotécnicas e ambientais, bem como a eficácia do PDV como estabilizador e remediador. A contaminação por óleo diesel alterou significativamente as características do solo, afetando os limites de Atterberg, a compactação e a resistência mecânica.

A contaminação com óleo diesel resultou em comportamento atípico nos limites de Atterberg (LL, LP e IP), especialmente em teores mais elevados de óleo, onde não foi possível realizar o ensaio de limite de liquidez para os teores de 4%, 6% e 8%. As variações no limite de plasticidade foram mínimas, indicando redução na capacidade de absorção de água do solo devido à presença de óleo diesel. Observou-se uma diminuição no limite de liquidez apenas na amostra com 2% de óleo, comparada ao solo natural. Esse efeito pode ser atribuído à lubrificação das partículas do solo pelo óleo diesel, alterando suas interações e a dinâmica de absorção de água. Após o tratamento com pó de vidro (PDV), observou-se que houve aderência suficiente na concha do aparelho de Casagrande, viabilizando a execução do ensaio para os teores em que anteriormente não foi possível. Verificou-se que, em comparação com o Solo Natural (SN), houve diminuição nos limites de Atterberg, mas as variações devido aos teores de óleo e pó de vidro não foram significativas.

O pH do solo aumentou conforme aumentou a concentração de óleo diesel, devido ao pH superior do óleo em comparação ao solo natural. O tratamento com PDV resultou em um aumento significativo do pH para valores alcalinos, sugerindo potencial atividade alcalinizante e pozolânica do PDV. Essa elevação do pH pode ser atribuída à interação química entre o PDV e o meio.

No ensaio de compactação, foi constatado que a presença de óleo diesel provoca alterações significativas nas curvas, impactando diretamente o comportamento do solo. Essas alterações incluem reduções nos valores de peso específico seco máximo (γ_{dmax}) e modificações no teor de umidade ótima, dependendo da concentração do contaminante.

Para as amostras tratadas com pó de vidro (PDV) e contaminadas com 2% de óleo diesel, observou-se uma redução na massa específica seca máxima, enquanto a umidade ótima permaneceu praticamente constante. Já no caso do solo contaminado com 8% de óleo diesel, a curva de compactação evidenciou a influência do teor de óleo diesel tanto na massa específica seca máxima quanto no teor de fluido. Verificou-se que o aumento na concentração de óleo diesel resultou em uma redução progressiva na massa específica seca máxima. Quanto ao teor de fluido, observou-se um comportamento distinto: houve um aumento entre os teores de 10% e 20% de

PDV, seguido de uma redução entre 20% e 30%. Contudo, as variações no teor de fluido permaneceram inferiores a 2%, indicando uma alteração limitada nesse parâmetro.

Nos ensaios de resistência à compressão simples de solo contaminado com 2% e 8% de óleo diesel tratado com diferentes teores de resíduo de pó de vidro (PDV), observou-se um aumento na resistência à compressão com o incremento do teor de PDV em todos os períodos analisados. O valor máximo de resistência foi registrado na amostra com 2% de óleo diesel e 30% de PDV após 56 dias, alcançando 1445,87 kPa. Em comparação, o solo contaminado com o mesmo teor de óleo diesel sem tratamento apresentou uma resistência de apenas 269,54 kPa após 56 dias, demonstrando o ganho significativo proporcionado pela adição do resíduo.

A análise cromatográfica revelou que o PDV teve um efeito significativo na redução dos hidrocarbonetos alifáticos, compostos principais do óleo diesel. A adição de 10% de PDV resultou em uma redução considerável na concentração desses contaminantes, sugerindo que o resíduo exerce uma função de adsorção ou encapsulamento, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais causados pela contaminação por óleo diesel. A eficiência do tratamento foi ainda mais evidente nas amostras com 30% de PDV, que apresentaram níveis residuais mais baixos de hidrocarbonetos, confirmando a eficiência do PDV na remoção de contaminantes por processos de biodegradação ou adsorção.

Em suma, a aplicação de pó de vidro (PDV) como tratamento para solos contaminados com óleo diesel demonstrou resultados promissores. Embora o PDV não tenha apresentado uma atividade pozolânica substancial, observou-se uma melhoria nas propriedades mecânicas do solo, como resistência à compressão e compactação, além de sua eficácia na redução dos contaminantes. Esses resultados indicam que o PDV pode ser uma alternativa viável e sustentável para a remediação de solos contaminados. A estratégia mostrou-se eficaz tanto na melhoria da estabilidade estrutural do solo quanto na mitigação dos efeitos da contaminação por óleo diesel.

No entanto, para pesquisas futuras, recomenda-se explorar técnicas adicionais, como a moagem mais intensiva do PDV, com o objetivo de potencializar sua atividade pozolânica. Além disso, é importante realizar novos ensaios de cromatografia para testar diferentes teores de óleo diesel, a fim de confirmar os resultados obtidos. Também é sugerido realizar ensaios de lixiviação para avaliar o comportamento do solo ao longo do tempo. Em relação à resistência à compressão simples (RCS), as pesquisas futuras poderiam avaliar se, após 56 dias, o solo continua a ganhar resistência, investigando períodos de cura superiores a esse valor para observar possíveis mudanças no comportamento do solo com o aumento do tempo de cura.

7. BIBLIOGRAFIA

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano. Panorama ABRAVIDRO edição 2022. Disponível em: <http://www.abravidro.org.br>.

AGOSTINI, J, I. Avaliação de atributos químicos em solo contaminado por compostos oriundos do petróleo (gasolina e óleo diesel). 2012. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2012.

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).

AKERMAN, M. Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro. [S. l.: s. n.], 2000.

AL-HAMAIEDH, H. D.; MAAITAH, O. N. Tratamento de solo poluído por óleo usando método eletroquímico. *Jornal de Engenharia de Alexandria*, v. 50, n. 1, p. 105-110, mar. 2011.

ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. Vidros. *Revista Química Nova na Escola*, São Paulo. Ed. Especial, p. 9 -20, mai /2001.

ANP – Agência Nacional do Petróleo. Síntese Mensal de comercialização de Combustível, dez 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/sinteses/scc/2022/sintese-volumes-dezembro-2022.pdf>.

ARTERIS (2015). Detecção qualitativa de argilas prejudiciais do grupo esmectita em agregados utilizando azul de metileno (ARTERIS T - 330-07, Centro de Desenvolvimento Tecnológico

A. SRIDHRAN, P.V. SIVAPULLIAH, Engineering behaviour of soils contaminated with different pollutants, *Environmental Geotechnica*, Balkema Press, Rotterdam, 1987.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 9604: Abertura de poços e trincheiras de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro/RJ, 2016.

Associação Brasileira De Normas Técnicas- ABNT. NBR 6458- Solo - Grãos de Pedregulho Retidos na Peneira 4,8 mm- Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água. Rio de Janeiro/RJ, 2016

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 6457. Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaio de Caracterização, Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas -ABNT NBR 6457: Solo - Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. NBR 14903:2014. Gás natural — Determinação da composição, química por cromatografia em fase gasosa. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT NBR 6459- Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro/RJ. 2016.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2004) ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos- Classificação. Rio de Janeiro/RJ.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4972-19: Standard test method for pH of soils. West Conshohocken, 2019.

AZAMBUJA, A. O. et al. Microbial community composition in Brazilian stored diesel fuel of varying sulfur content, using high-throughput sequencing. Fuel, v. 189, p. 340- 349, 2017.

BLAYI, R.A., SHERWANI, A.F.H., IBRAHIM, H.H., Faraj, R.H., DARAEI, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. Case Studies in Construction Materials, 13, p. e00427

- BAKER, J. M. 1970. The effects of oils on plants. *Environmental Pollution* 1(1): 27-44.
- BALDOVINO, J. A. Contribuição ao estudo da estabilização e geopolimerização de um solo siltoso da formação Guabirotuba melhorado com pó de vidro e lama de cal. 2021. 228f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.
- BARROS, L. M. Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado. 2016. 202f. Doutorado (Doutor em Ciências) - Universidade de São Paulo, 124 São Carlos, 2016.
- BELINCANTA, A; Ferraz, R.L.; GUTIERREZ, N.H.M. (2000) Algumas características dos solos constituintes do subsolo da cidade de Maringá, de interesse à geotecnia em geral. In: Enteca 2000, Maringá, UEM/DEC, p.182 a 190.
- BENNY et al. Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Published by: www.ijert.org Vol. 6 Issue 05, May - 2017.
- BIGNOZZI, M. C.; SACCANI, A.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I. Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. *Cement & Concrete Composites*, v. 55, p.45-52, 2015.
- BONA, C.; REZENDE, I. M.; SANTOS, G. O.; SOUZA, L. A. Effect of soil contaminated by diesel oil on the germination of seeds and the growth of *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) Seedlings. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 54, n. 6, p. 1379-1387, nov. 2011.
- BORGES, A. L. Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo (ANP). Síntese Mensal de Comercialização de Combustíveis – ref.: dezembro de 2022. Superintendência de Defesa da Concorrência (SDC).

CALLISTER Jr, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8a Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

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). 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá.

CASTRO, C. E. N. et al. Comportamento mecânico de solo argiloso estabilizado com lama de vidro pulverizado em moinho de alta energia e de bolas. *Matéria* (Rio de Janeiro), [s.l.], v. 24, n. 2, p.1-11, 2019.

CERZÓSIMO, J. M. M. H. Avaliação do potencial de aplicação do pó de vidro para execução de base de pavimentos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2019.

CHAGAS, M, M. Avaliação dos teores de enxofre em amostras de óleo diesel nas redes de distribuição de combustíveis na cidade de Natal/RN. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

CHANDRA PAUL, S.; ŠAVIJA, B.; BABAFEMI, A. J. A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass. *Journal of Cleaner Production*, v. 198, p. 891–906, 2018

CHEN, G. et al. Glass recycling in cement production-an innovative approach. *Waste Management*, v. 22, n. 7, p. 747–753, 2002.

CHIARANDA, H. S. Alterações biogeoquímicas em águas subterrâneas impactadas por biodiesel de soja e misturas de diesel/biodiesel (B20). 2011. 221f. Tese (Doutorado em Engenharia ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

CORDEIRO, T.C. Contaminação de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) em subsuperfície: revisão bibliográfica sistemática. Versão corrigida. São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2024.

COSTA, L. M. Influência da pozolanicidade na ativação alcalina. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

CLARK Jr., R. C.; BROWN, D. N. 1977. Petroleum properties and analyses in biotic and abiotic systems. In: Malis, D. C. Effects of petroleum on Arctic and Subarctic environments in organisms. 1 Nature and fate of petroleum. Academic Press, New York, 89p.

CNT- Confederação Nacional do Transporte. Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro. Brasília, 2012.

CORDEIRO, J.F.S. (2007). Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E&P de petróleo, com solo para uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB

CRISPIM, F. A. Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

DAKA, M. R. Geotechnical Properties of Oil Contaminated Soil. Thesis (Master of Philosophy). Universidade de Manchester, 2015.

DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparo de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

FERREIRA S.L, SANTOS A.M, SOUZA G.R, Polito W.L, Módolo D.L. Análise por Cromatografia Gasosa de BTEX nas emissões de motor de combustão interna alimentado com Diesel e mistura Diesel-Biodiesel (B10). Quim Nova. 2008; 31(3):539-45.

FERRETTI, Marco; TIRELLO, Regina Andrade. Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais. Revista CPC, n. 7, p. 74-98, 2009.

FINE, P., GRABER, E. R.; YARON, B. Soil interactions with petroleum hydrocarbons: Abiotic processes. *Soil Technology*, Amsterdam, v.10, n.2, p.133-153, feb. 1997.

JAVED, S. A.; CHAKRABORTY, S. Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement. *World Scientific News: An International Scientific Journal*. v. 144, p. 30-42, 2020.

Environmental Protection Agency (EPA). Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste. EPA/540/2-86/001. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio. 1986.

EPA. Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste. EPA/540/2-86/001. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio. 1986.

FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; OLIVEIRA, F. H. T. de; FARIAS, D. R. de. Ponto de efeito salino nulo e cargas elétricas de solos do estado da Paraíba. *Caatinga*, Mossoró, v. 21, n. 2, p. 147-155, maio/jun. 2008. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

FERREIRA, S. L. Análise por cromatografia gasosa das emissões de compostos orgânicos voláteis provenientes de motores de combustão interna. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Orientador: Prof. Dr. Antônio Moreira dos Santos.

FUNGARO, D, A.; FLUES, M, S. CELEBRONI, A, P. Estabilização de solo contaminado com zinco usando zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão. *Química Nova*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 582-585, 2004.

GASPARETTO, Nelson Vicente Lovatto. Formações Superficiais do Noroeste do Paraná e sua Relação com o Arenito Caiuá. 1999. Tese Doutorado em Geoquímica e Geotecnia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GALVÃO, Á. C. P.; FARIAS, A. C. M.; SOUZA, L. G. M. Viabilização de rejeitos de vidro para produção de tijolos cerâmicos. *HOLOS*, vol. 4, 2013, pp. 59-69.

GLISH, G. L., VACHET, R. W. The basics of mass spectrometry in the twenty-first century. *Nature Reviews Drug Discovery*, v. 2, n. 1, p. 140-150, fev. 2003.

GOBBO, L. de A. Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland. 2009. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Inst. de Geociências, Univ. de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOES, C. M. W. de; KRAHL, P.; ALMEIDA, L. C. de; TRAUTWEIN, L. M. Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho. 62º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC 2020), setembro de 2020.

GUO, P.; MENG, W.; NASSIF, H; et al. New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, v. 257, 2020.

HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; KNOP, A. Encapsulamento de um solo contaminado por óleo diesel. *Geotecnica*, n. 110, p. 59-73, jul. 2007

FILHO, J.H ; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. *Rev. Matéria*, v. 22, n. 3.

IBRAHIM, H. H.; MAWLOOD, Y. I.; ALSHKANE, Y. M. Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 15, n. 4, p. 496–503, 2019. DOI: 10.1080/19386362.2019.1647644.

IDIR, R.; CYR, M.; HAMOU, A. T.; Pozzolanic properties of fine and coarse color mixed glass cullet. *Cement & Concrete Composites*, v. 33, p. 19-29, 2011.

IJIMDIYA, T.S. The effect of oil contamination on the consolidation properties of lateritic soil. In: *Development and Applications of Oceanic Engineering (DAOE)*, Volume 2, pag. 53–59, maio de 2013.

JAVED, S. A.; CHAKRABORTY, Sudipta. Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement. World Scientific News: An International Scientific Journal, v. 144, p. 30-42, 2020. EISSN 2392-21

JIA, Y. G.; WU, Q.; SHANG, H., YANG, Z. N.; SHAN, H. X. (2011). The influence of oil contamination on the geotechnical properties of coastal sediments in the Yellow River delta, China. Bulletin of Engineering

KÄMPF, N., et al. (2012). Mineralogia de solos brasileiros. Pedologia; Fundamentos. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: 343.

KHAMEHCHIVAN, M.; CHARKHABI, A. H.; TADJIQUE, M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. Engineering Geology, vol. 89, pp. 220-229, 2007.

KNOP, A. Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos. Programa de pós graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio grande do Sul. Agosto de 2003.

KUMAR, S. V.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning : A review. The Indian Concrete Journal, n. September 2003, 2003

Ladeira, A. T.; Sandoli, M. A. M.; Lukiantchuki, J.A.; Ildefonso, J.S. Caracterização e Classificação Geotécnica de Solos Típicos do Noroeste do Paraná para Fins de Aplicação em Obras de Pavimentação. Encontro Anual de Iniciação Científica (EAIC), 2019.

LOVATO, R.S. Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, aplicado à Pavimentação. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LUONG, J.; GRAS, R.; CORTES, H.J.; SHELLIE, R. Multidimensional gas chromatography for the characterization of permanent gases and light hydrocarbons in catalytic cracking process. Journal of Chromatography A, v. 1271, p. 185-191, 2013.

LUKIANCHUKI, A.J., BELINCANTA, A., de NÓBREGA, M. T. (2003). Estudo Teórico Experimental: Influência do Tipo de Cimento Portland na Estabilização de Solo

Laterítico do Noroeste do Paraná. In IV Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura (ENTECA 2003).

Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Agência Nacional de Qualidade Ambiental Urbana. Programa Nacional de Áreas Contaminadas. Brasília, DF, 2020.

Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/acesso-a-informacao/acoesprogramas/agendaambientalurbana/recuperacao-de-areas-contaminadas/ProgramaNacionaldeRecuperaodereasContaminadas.pdf>

MOURA, A. A. DE. ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS INDUSTRIAIS. 2018. 107f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.

MUCHA, I. D.; TRZCINSKI, J. Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. Geologija 2008, 50, pag.69–75.

MARGESIN, R.; SCHINNER, F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. Applied Microbiology and Biotechnology, 56, 650-663, 2001. SALIMNEZHAD, A.; JIGHEH, S. H.; SOORKI, A. A. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. J. Rock Mech. Geotech. Eng., 13, 653–670, 2021.

MARGESIN, R.; WALDER, G.; SCHINNER, F. The impact of hydrocarbon remediation (diesel oil and polycyclic aromatic hydrocarbons) on enzyme activities and microbial properties of soil. Revista Acta Biotechnologica, Innsbruck, v. 20, n. 3-4, p. 313–333, 2004.

Marinha do Brasil. Nota à imprensa em 29 de junho de 2020 [Internet]. Brasília, DF. 2020. Disponível em:

https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/nota_a_imprensa_ressurgimento_de_ve stigios_de_oleo.pdf

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolan Cements. In: HEWLETT, P. C. (org.). LEA'S Chemistry of cement and concrete. Fourth ed. [S. l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2004. p. 471–602.

MELQUIADES, R. A.; LOBO, I.; GUEDES, C. L. B.; PINTO, J. P. Análise de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos em solos por headspace e cromatografia gasosa/detector de ionização de chama. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 27, n. 2, p. 113-120, jul./dez. 2006.

NAZIR, A. K. 2012. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. Alexandria Eng. J. 50 (4):331–35.

OLIVEIRA, D.M., CASTILHO Jr. MEIOTELLO, E. Avaliação da solidificação/estabilização de borras oleosas utilizando caulinita e vermiculita como materiais adsorventes. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, 2003

OLIVEIRA, R. C. S. DE. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO TRATADO COM RESÍDUO DE VIDRO. 2021. 116f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021.

OLUFOWOBI, J. et al. Clay soil stabilization using powdered glass. Journal of Engineering Science and Technology, Nigéria, p. 14-28, mai. 2014.

PEJON, O.L.: Mapeamento Geotécnico de Piracicaba. 1:100.000: Estudo de Aspectos Metodológicos de Caracterização e de Apresentação dos Atributos. Tese de Doutorado. São Carlos, EESC/USP – 1992.

PENA, P. G. Northcross, A, N. Lima M, A, G. Rêgo R, C, F. Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. CSP Cadernos de Saúde Pública, v. 36, n. 10, 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.

Petrobras. Refino: tecnologia que cria várias soluções com uma única matéria-prima. 2023. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/refino#etapas-do-refino-do-petroleo>

PEREIRA, J. N. Análise comparativa de métodos de remediação de solo contaminado com óleo diesel: um estudo de caso aplicado em área industrial no Oeste do Pará. 2020. 64 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de BrownFields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

PORTO JR., D. R. Caracterização do resíduo de pó de vidro Blindex® para substituição parcial do cimento na mistura solo-cimento. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade/Faculdade, Campo Grande, MS, 2024.

MARQUES, L. S. Remediação de solo contaminado com óleo diesel utilizando co-produtos da produção do biodiesel. 2014. Dissertação (Mestrado em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

MENDES, I. S.; CORREIA, N. 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. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2018, 28 de agosto a 01 de setembro de 2018.

PUDELL, P. C. A. Estudo do Comportamento Mecânico de Solo da Formação Guabirotuba com Adição de Cal e Pó de Vidro. Dissertação de Mestrado-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, 2022.

Rahman, ZA, U. Hamzah, MR Taha e NS Ithnainm. 2010. Influência da contaminação por óleo nas propriedades geotécnicas de solo residual basáltico. Sou. J. Appl. Ciência. 7(7):954–61.

RADKE, I. B. de G. Viabilidade da utilização de resíduo de laminação de vidro na confecção de concretos estruturais. 2022. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022.

RIOS, A.V. N. G. Uso potencial da etringita obtida no tratamento de efluentes industriais em aplicações geotécnicas. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade

Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Maringá, 2022.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. A desativação de empreendimentos industriais: um estudo sobre o passivo ambiental. 1998. Tese – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SANTOS, O. M., SILVA, P. D. A., FURTADO, K. G, COGAN, S. A Teoria das Restrições no Processo de Refino de Petróleo. In: 6º Congresso USP Pesquisa Contábil e Desenvolvimento Econômico e Social 2006. FIPECAFI.

SANTOS, Y. R. P. dos. Comportamento e melhoramento de solos compactados para aplicação em obras de engenharia civil. Caruaru, julho de 2016. UFPB. CAA, NT, Curso de Engenharia Civil.

SETCESP. Entidades realizam levantamento estatístico inédito sobre acidentes com produtos perigosos, set. 2021. Disponível em: <https://setcesp.org.br/noticias/entidades-realizam-levantamento-estatistico-inedito-sobre-acidentes-com-produtos-perigosos/>.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIENAM, T. A. Princípios de análise instrumental. 5. Ed. Bookman: Porto Alegre, 2002.

SOUSA, R. P. Estudo dos fluxos de óleo diesel e água em solos não saturados: desenvolvimento experimental e modelagem matemática. 2012. 283f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.

TAHA, R., TAHA, M., & KERDJOU DJ, R. (2003). *Production and characterization of glass from industrial waste*. Waste Management, 23(8), 731-740.

TAN, K.H. Principles of soil chemistry. New York: Marcel Dekker, 1982. 267p.

KHAMEHCHIYAN, M., A. HOSSEIN CHARKHABI, AND M. TAJIK. 2007. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. Eng. Geol. 89 (3–4):220–29.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 1, p. 91–100, 2015. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6.

SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 2, p. 234–247, 2007

SILVA D.C.P, MELO C.S, OLIVEIRA A.B, SANTOS N.M.M, Pinto L.C. Derramamento de óleo no mar e implicações tóxicas da exposição aos compostos químicos do petróleo. *Rev. Contexto & Saúde*. 2021;21(44):332-344.

SUPERINTENDÊNCIA DE DEFESA DA CONCORRÊNCIA (SDC). Síntese Mensal de Comercialização de Combustíveis (2022). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/sinteses/scc/2022/sintese-volumes-dezembro-2022.pdf>

TAJADDINI, A. SABERIAN, M., SIRCHI, V. K., Li, J., MAQSOOD, T. (2023). Improvement of mechanical strength of low-plasticity clay soil using geopolymer-based materials synthesized from glass powder and copper slag. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p. e01820.

TAKESHITA, Elaine Vosniak. Adulteração de gasolina por adição de solventes: Análise dos parâmetros físico-químicos. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2006.

SILVA D.C.P, MELO C.S, OLIVEIRA A.B, SANTOS N.M.M, Pinto L.C. Derramamento de óleo no mar e implicações tóxicas da exposição aos compostos químicos do petróleo. *Rev. Contexto & Saúde*. 2021;21(44):332-344.

Superintendência de Defesa da Concorrência (SDC). Síntese Mensal de Comercialização de Combustíveis (2022). Disponível em:

<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/sinteses/scc/2022/sintese-volumes-dezembro-2022.pdf>

TUAUM, A.; SHITOTE, S.; OYAWA, W. Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate. *Buildings*, v. 8, n. 2, 2018.

USACE. U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS. Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material. Technical Letter N° 1110-1158. Washington, 1995.

YONG, R. N.; RAO, S. M. (1991), Mechanistic Evaluation of Mitigation of Petroleum hydrocarbon contamination by soil medium. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 28, p. 84-91, 1991

Vale, J. L. R. Aplicação do Ensaio de Azul de Metileno como Ferramenta Complementar de Seleção de Solos Tropicais para Produção de Adobe. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

VILLIBOR, D.F. [ET. AL]. Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

WILES, C.C. A Review of Solidification / Stabilization Technology. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.14, p.5-21, 1987.

WORRELL, E., & REUTER, M. A. (2001). *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier.

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: 34.274.233/0259-46	
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 (min)	NBR 7974
Massa Específica a 20°C	kg/m³	844,3	815,0 a 865,0	NBR 7148
Condutividade elétrica	pS/m	189	25 (min)	D2624/D4308
Teor de água (máx.)	mg/kg	171	500	D8304

- (1) Limpo 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- ANALISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO



AgriSolum
ANÁLISES AGRONÔMICAS

Avenida Dr. Mario Cláudio Urbanelli, 1151 | Jardim Canadá
CEP 87.050-120 | Maringá - PR | Tel: (44)3252-9565
E-mail: contato@agrisolum.com.br | www.agrisolum.com.br

CHAVE DE ACESSO

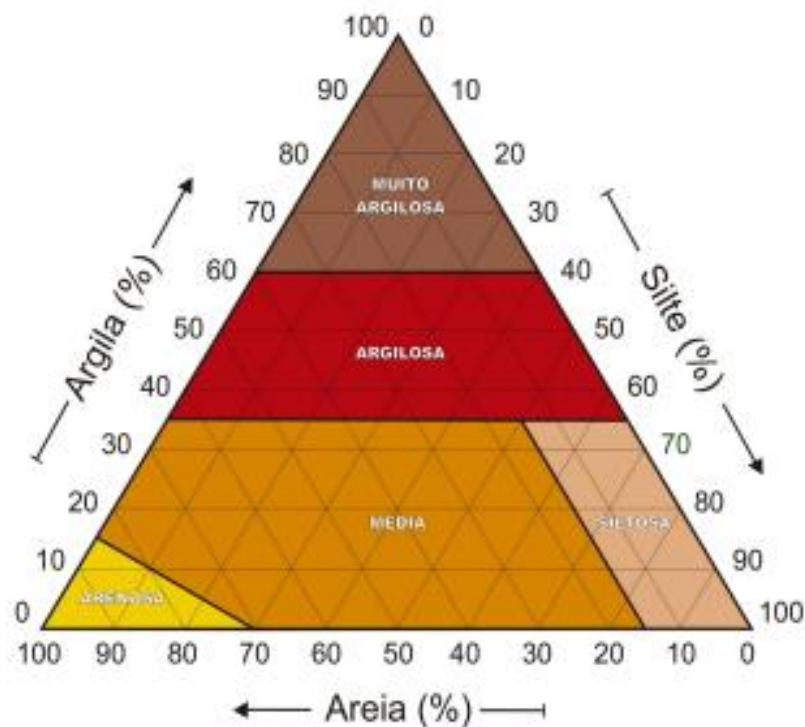
16c7925d41

SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7143	Nº DO LAUDO	2960/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PRÓPRIEDADE - 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	SILO	ARGILA		
22	52	74	2	24	Tipo 1 (MAPA-IN nº02 de 09/10/2006)	Média

TRIÂNGULO DAS CLASSES TEXTURAIS DE SOLO



OBSERVAÇÃO



ASSINATURA

Eng. Agr. Simone Lemes de Souza
PR-21815/D
Responsável Técnico



AgriSolum
ANÁLISES AGRONÔMICAS

Avenida Dr. Márcio Capier Urbinatti, 1181 | Jardim Canadá
CEP 87.080-120 | Maringá - PR | Tel: (44)3252-9585
E-mail: contato@agrisolum.com.br | www.agrisolum.com.br

CHAVE DE ACESSO

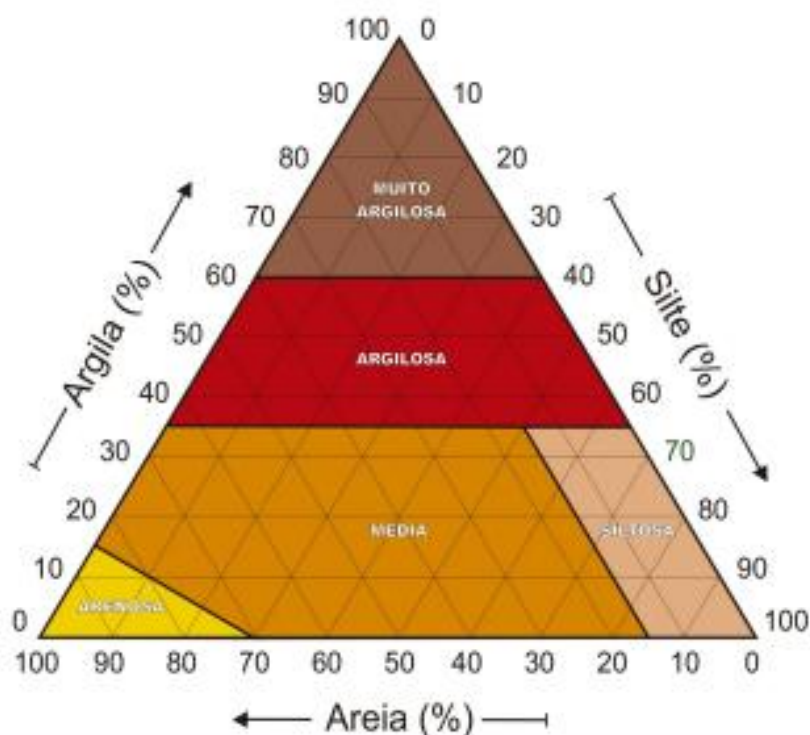
16c7925d41

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	SILOTE	ARGILA		
20	54	74	2	24	Tipo 1 (MAPA - IN nº 02 de 09/10/2006)	Media

TRIÂNGULO DAS CLASSES TEXTURAIS DE SOLO



OBSERVAÇÃO



ASSINATURA

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



AgriSolum
ANÁLISES AGRONÔMICAS

Avenida Dr. Manoel Caspary Urbanetti, 1181 | Jardim Canadá
CEP 87.080-120 | Maringá - PR | Tel: (44)3262-9583
E-mail: contato@agnisolum.com.br | www.agnisolum.com.br

CHAVE DE ACESSO

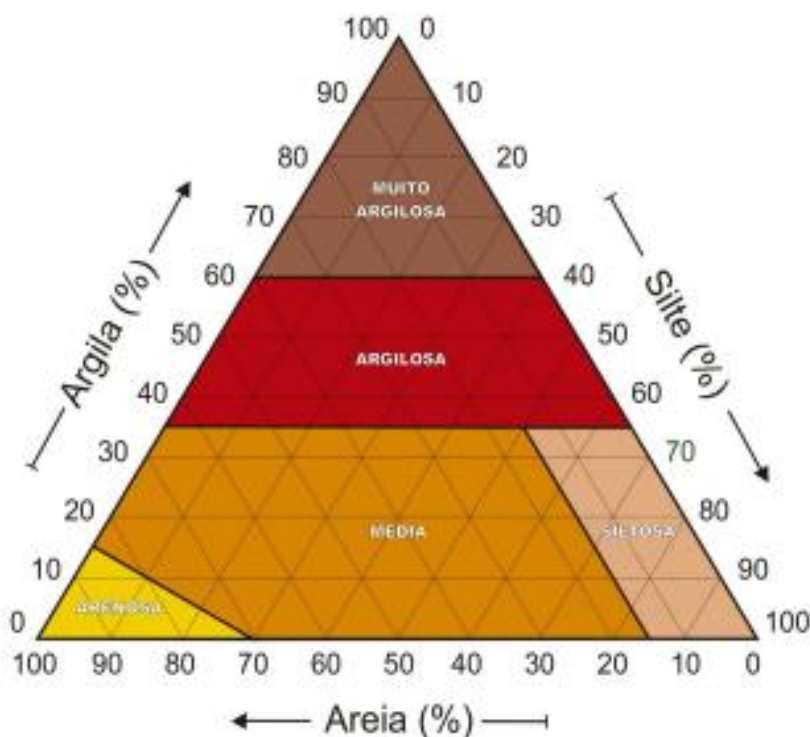
16c7925d41

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					
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 3	ÁREA	0 ha	PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLO

%					CLASSIFICAÇÃO	TEXTURA
AREIA GROSSA	AREIA FINA	AREIA TOTAL	SILTE	ARGILA		
23	51	74	3	23	Tipo 1 (MAPA - IN nº02 de 09/10/2008)	Media

TRIÂNGULO DAS CLASSES TEXTURAIS DE SOLO



OBSERVAÇÃO



ASSINATURA

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



AgriSolum
ANÁLISE AGRONÔMICA

Avenida Dr. Mano Cláudio Urbanczyk, 1181 | Jardim Canadá
CEP: 87.050-120 | Maringá - PR | Tel: (44) 3282-9588
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 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					

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					

MACRONUTRIENTES		NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
ELEMENTOS	cmol/dm ³	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					
Boro (B)	ns					



MICRONUTRIENTES		NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
ELEMENTOS	mg m ²	MB	B	M	A	MA
Boro (B)	ns					
Cobalto (Co)	0,78					
Ferro (Fe)	41,64					
Manganês (Mn)	6,42					
Zinco (Zn)	4,56					

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO			
mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
P-rem	Fósforo	Eneque	Zinco
ns	ns	ns	ns

ASSINATURA

Eng. Agr. Sérgio Lages 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: B; Fósforo de Cálcio Monobásico: S; Walkley-Black: C. - Os valores analíticos referem-se a amostra disponibilizada pelo interessado.





AgriSolum
ANÁLISES AGRONÔMICAS

Avenida Dr. Mário Cláudio Urbanski, 1151 | Jardim Canadá
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	Resultado	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
SB	0,21					
CTC	4,52					
CTC efetivo	1,02					
Acidez Potencial (H + Al)	4,31					
Acidez Não-Trocável (H)	3,50					
Acidez Trocável (Al ³⁺)	0,81					

MACRONUTRIENTES		NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
ELEMENTOS	Resultado	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					
Boro (B)	ns					



MICRONUTRIENTES		NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
ELEMENTOS	Resultado	MB	B	M	A	MA
Boro (B)	ns					
Cobre (Cu)	0,84					
Ferro (Fe)	40,32					
Manganês (Mn)	6,60					
Zinco (Zn)	0,42					

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO			
mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
P-rem	Fósforo	Estrato	Zinco
ns	ns	ns	ns

ASSINATURA

Eng. Agr. Sérgio Lopes de Souza
Responsável Técnico

OBSERVAÇÃO

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





AgriSolum
ANÁLISES AGRONÔMICAS

Avenida Dr. Mário Cláudio Urbanski, 1151 | Jardim Canadá
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	agrisolum®	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-Trocável (H)	3,50					
Acidez Trocável (Al ³⁺)	0,81					

MACRONUTRIENTES		NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
ELEMENTOS	agrisolum [®]	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					
Boro (B)	ns					



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

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO			
mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
P-rem	Fósforo	Estrato	Zinco
ns	ns	ns	ns

ASSINATURA

Eng. Agr. Sérgio 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: B; Fósforo de Cálcio Monobásico: S; Walkley-Black: C. - Os valores analíticos referem-se a amostra disponibilizada pelo interessado.





AgriSolum
ANÁLISES AGRONÔMICAS

Avenida Dr. Manoel Clapier Urbanetti, 1181 | Jardim Canadá
CEP 87.080-120 | Maringá - PR | Tel: (44) 3202-9500
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_2O	4,50					
C (g dm^{-3})	1,42					
MO (%)	0,24					

MACRONUTRIENTES		NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
ELEMENTOS	cmol dm^{-3}	MB	B	M	A	MA
Calcio (Ca^{2+})	0,12					
Magnésio (Mg^{2+})	0,08					
Potássio (K)	0,03					
	mg dm^{-3}					
Fósforo (P)	0,18					
Boro (B)	ns					

MICRONUTRIENTES		NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
ELEMENTOS	mg dm^{-3}	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					



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. George Lopes de Souza
Responsável Técnico

OBSERVAÇÃO

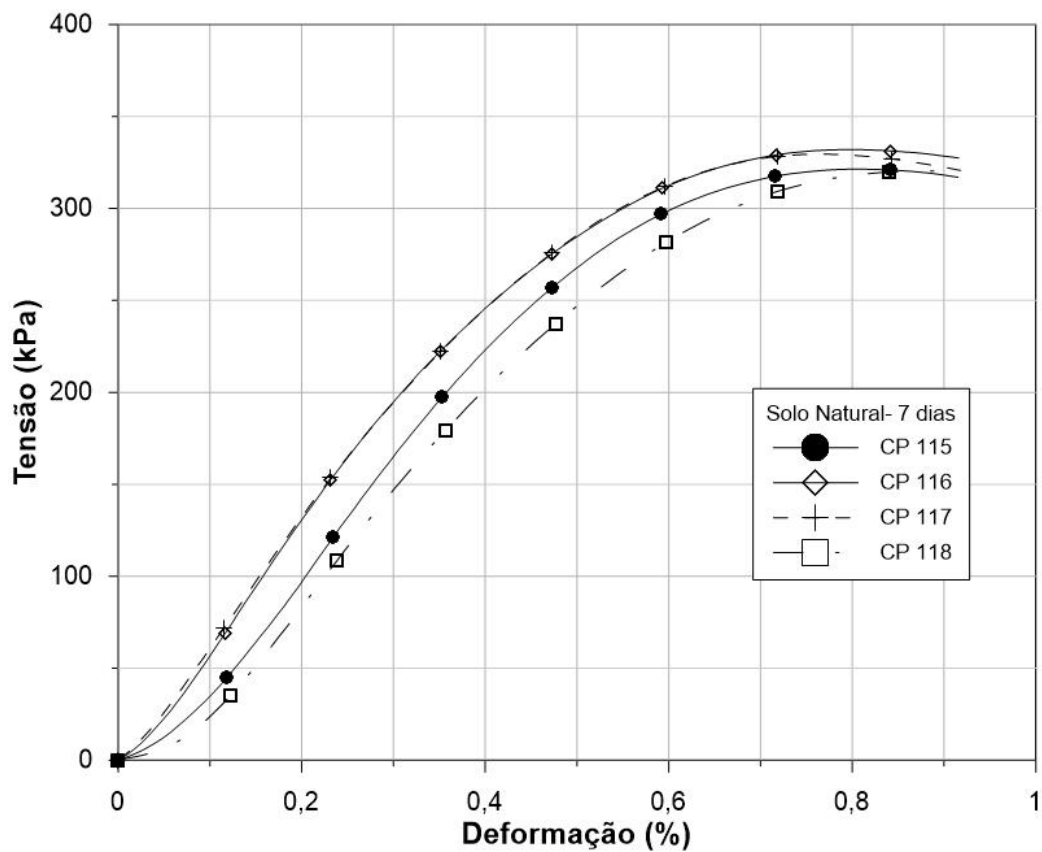
MB= Muito Baixo; B= Baixo; M= Médio; A= Alto e MA= Muito Alto.

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

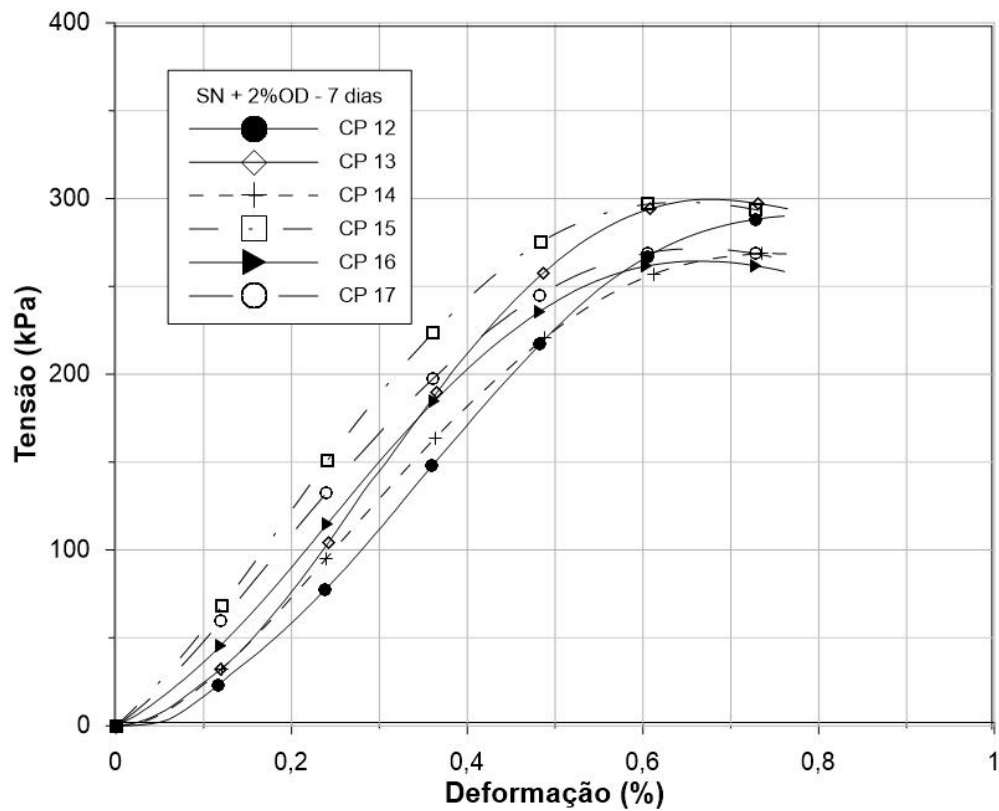


ANEXO C : CURVAS DOS CORPOS DE PROVA – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

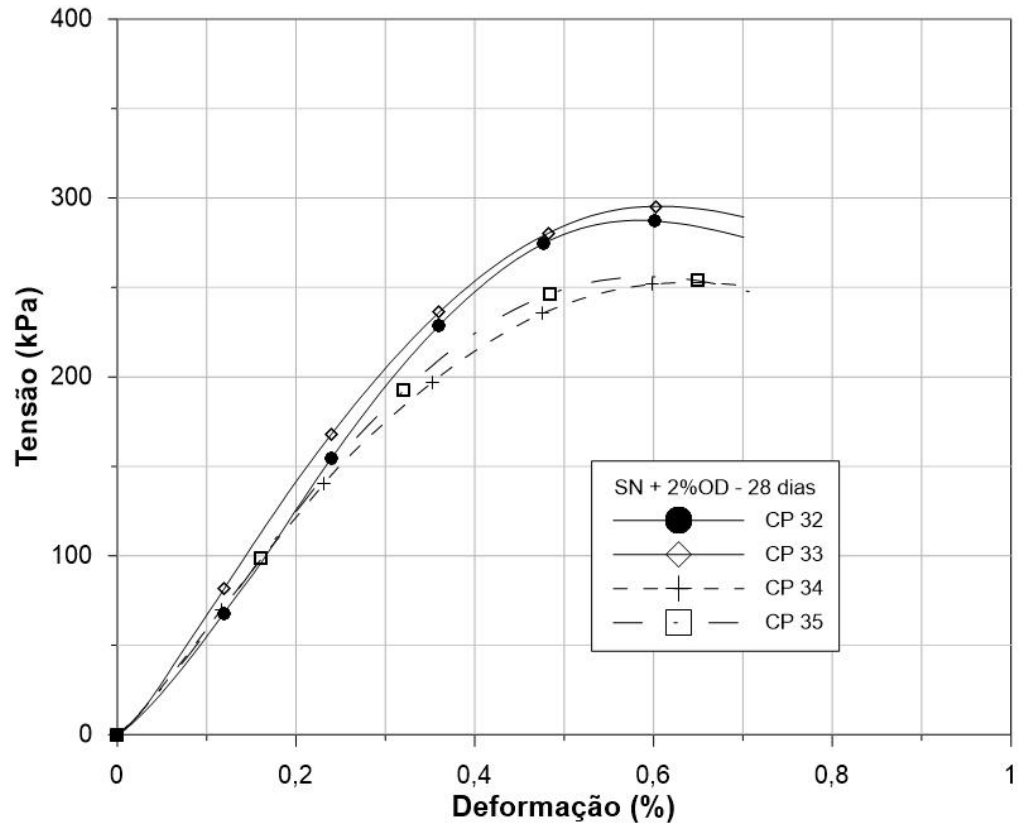
SOLO NATURAL											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
115	7 dias	9,59%	-0,41%	1,837	98,80%	0,43	58,40%	30,15%	321,43	5,79	1,78
116	7 dias	9,63%	-0,37%	1,868	100,50%	0,41	62,20%	28,95%	332,06		
117	7 dias	9,80%	-0,20%	1,869	100,50%	0,41	63,30%	28,95%	329,55		
118	7 dias	9,96%	-0,04%	1,863	100,20%	0,41	63,60%	29,17%	320,47		
Média		9,75%	-0,25%	1,859	100,00%	0,41	61,90%	29,31%	325,88		



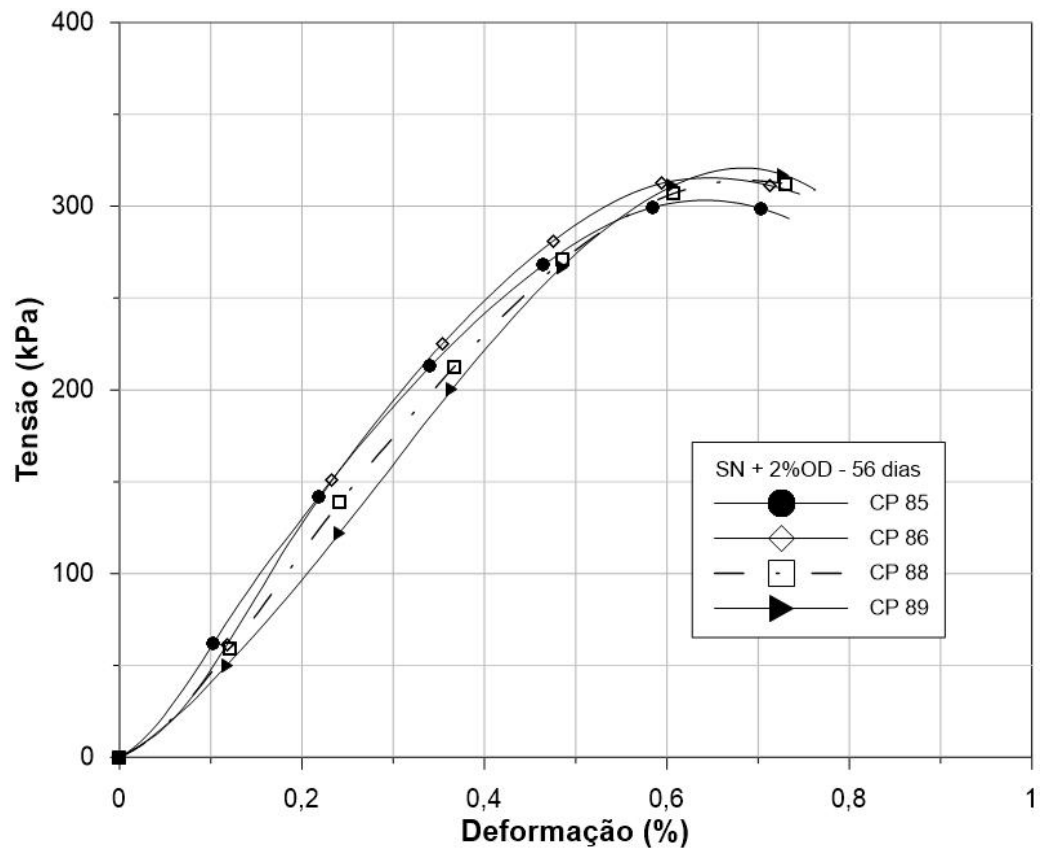
SOLO +2%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variação
12	7 dias	9,84%	-0,16%	1,862	100,14%	0,41	62,70%	29,22%	290,45	15,69	5,93
13	7 dias	10,10%	0,10%	1,851	99,59%	0,42	63,20%	29,60%	299,51		
14	7 dias	9,70%	-0,30%	1,86	100,07%	0,41	61,70%	29,26%	268,67		
15	7 dias	9,60%	-0,40%	1,862	100,15%	0,41	61,20%	29,21%	297,93		
16	7 dias	9,62%	-0,38%	1,858	99,93%	0,42	60,90%	29,37%	264,36		
17	7 dias	9,58%	-0,42%	1,861	100,13%	0,41	61,00%	29,22%	271,55		
Média		9,62%	-0,38%	1,86	100,07%	0,41	61,20%	29,27%	281,00		



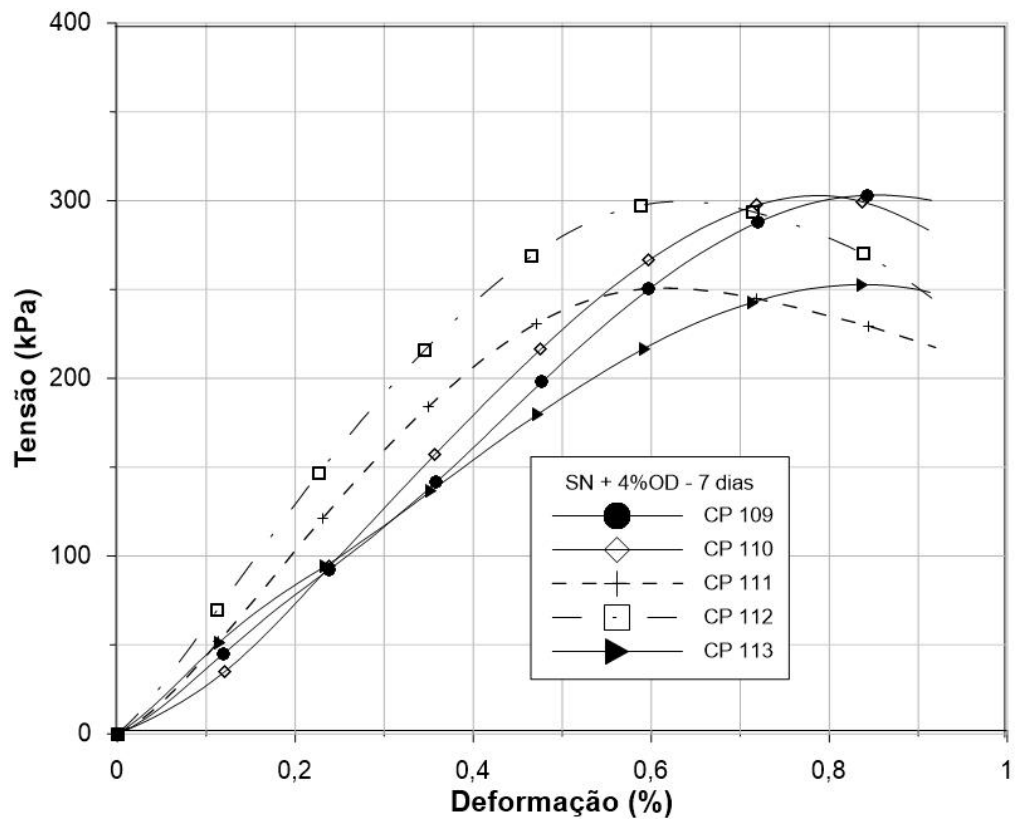
SOLO +2%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
32	28 dias	9,58%	-0,42%	1,861	100,12%	0,41	61,00%	29,23%	287,6	21,72	7,96
33	28 dias	9,39%	-0,61%	1,862	100,19%	0,41	59,90%	29,18%	295,41		
34	28 dias	9,59%	-0,41%	1,862	100,14%	0,41	61,10%	29,22%	252,73		
35	28 dias	9,52%	-0,48%	1,861	100,08%	0,41	60,50%	29,26%	256,01		
Média		9,52%	-0,48%	1,861	100,13%	0,41	60,60%	29,22%	272,94		



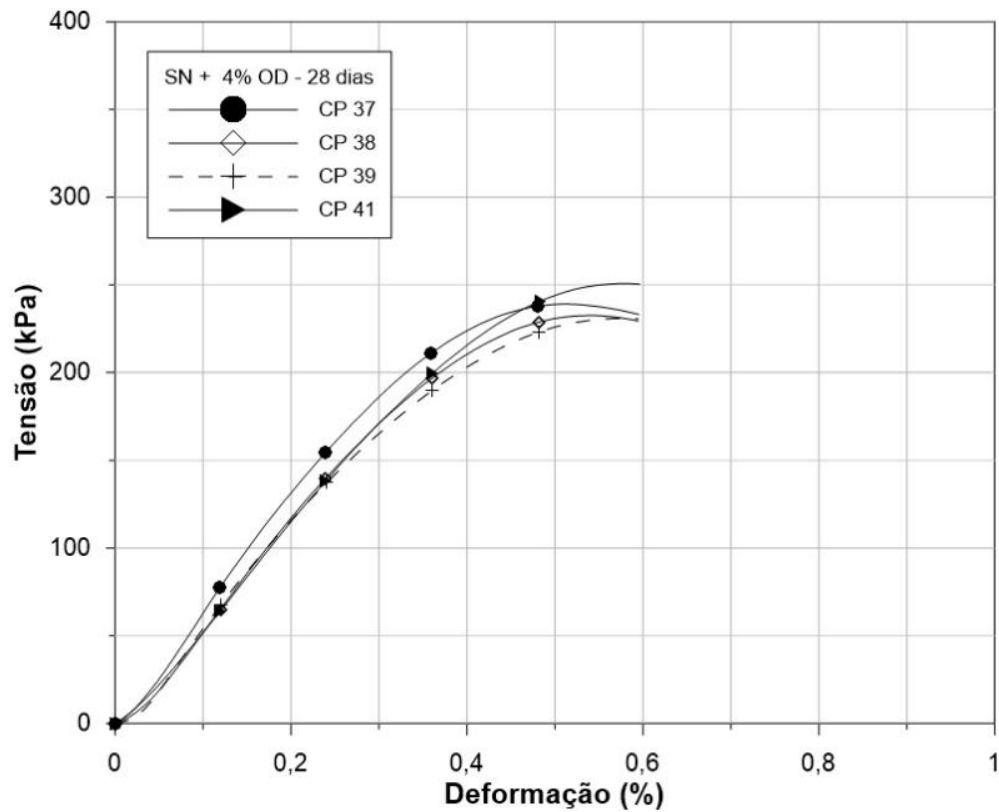
SOLO +2%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variação
85	56 dias	10,38%	0,38%	1,826	98,23%	0,44	62,00%	30,57%	303,33	7,34	2,34
86	56 dias	10,23%	0,23%	1,846	99,30%	0,42	63,30%	29,81%	315,46		
88	56 dias	10,13%	0,13%	1,863	100,23%	0,41	64,70%	29,15%	314,09		
89	56 dias	10,42%	0,42%	1,849	99,46%	0,42	64,90%	29,69%	320,85		
Média		10,29%	0,29%	1,846	99,30%	0,42	63,70%	29,81%	313,43		



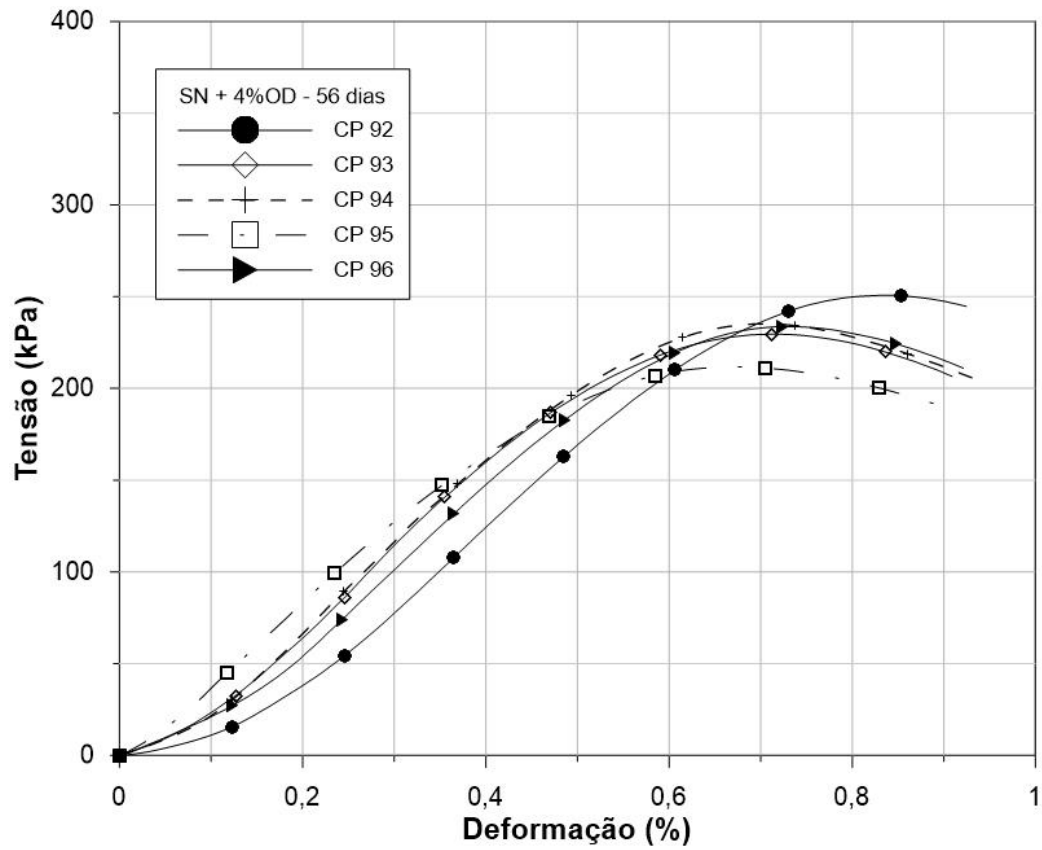
SOLO +4%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variação
109	7 dias	9,73%	-0,27%	1,893	101,80%	0,39	65,60%	28,04%	303,2	27,48	9,75
110	7 dias	9,99%	-0,01%	1,888	101,54%	0,39	66,80%	28,22%	302,81		
111	7 dias	10,31%	0,31%	1,852	99,60%	0,42	64,50%	29,60%	250,75		
112	7 dias	9,89%	-0,11%	1,867	100,41%	0,41	63,60%	29,03%	299,51		
113	7 dias	10,07%	0,07%	1,858	99,96%	0,42	63,80%	29,34%	252,78		
Média		10,09%	0,00%	1,871	100,66%	0,41	64,90%	28,85%	281,81		



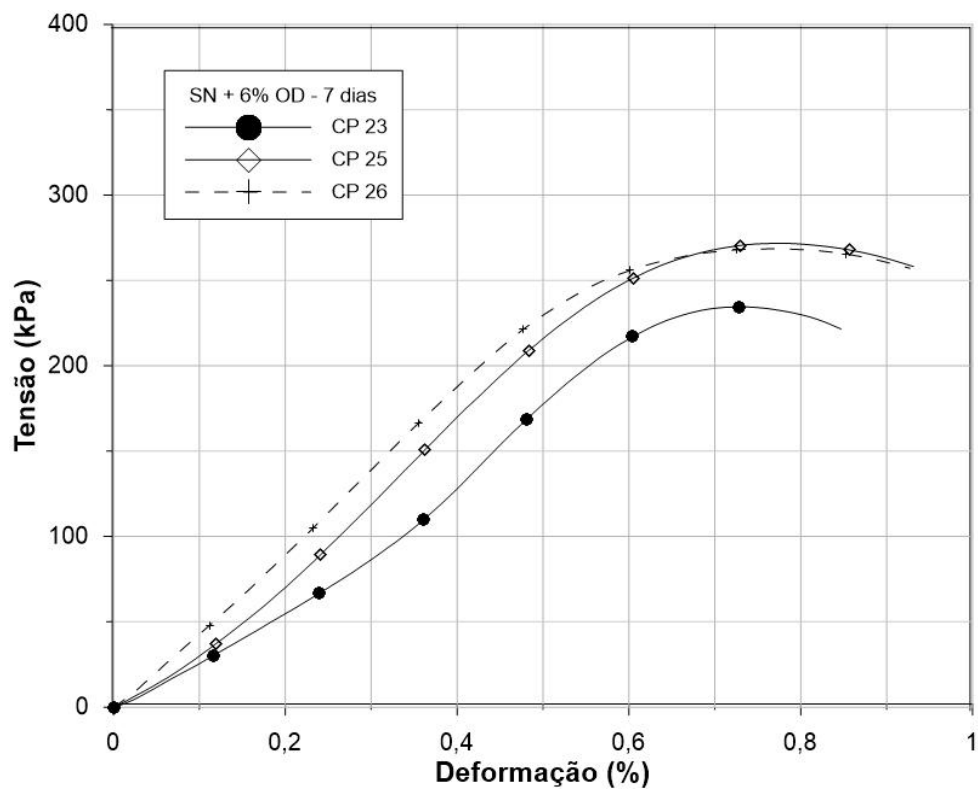
SOLO +4%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
37	28 dias	9,90%	-0,10%	1,859	99,98%	0,42	62,70%	29,33%	239,06	9,03	3,79
38	28 dias	9,76%	-0,24%	1,857	99,87%	0,42	61,60%	29,41%	232,56		
39	28 dias	9,65%	-0,35%	1,864	100,25%	0,41	61,70%	29,14%	230,86		
41	28 dias	9,89%	-0,11%	1,869	100,53%	0,41	63,90%	28,94%	250,77		
Média		9,80%	-0,20%	1,862	100,16%	0,41	62,50%	29,20%	238,31		



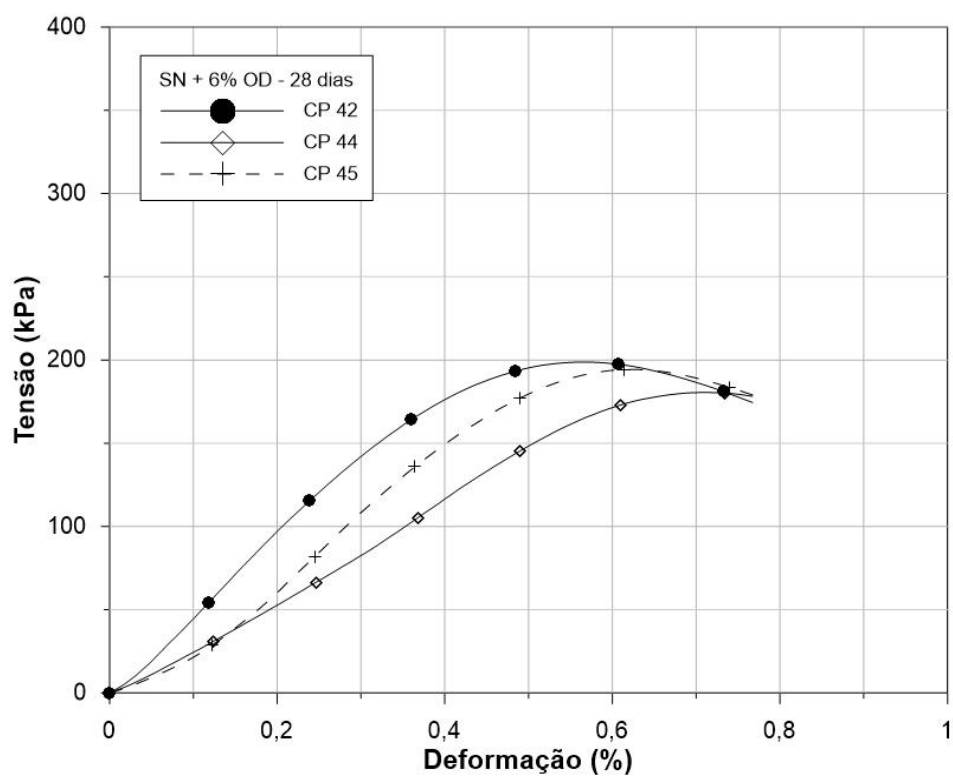
SOLO +4%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	pd(g/cm3)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variação
92	56 dias	9,90%	-0,10%	1,85	99,49%	0,42	61,70%	29,67%	250,77	13,98	5,98
93	56 dias	9,63%	-0,37%	1,871	100,66%	0,41	62,50%	28,85%	229,55		
94	56 dias	10,27%	0,27%	1,86	100,04%	0,41	65,20%	29,29%	235,19		
95	56 dias	10,24%	0,24%	1,846	99,28%	0,43	63,40%	29,82%	211,75		
96	56 dias	9,90%	-0,10%	1,861	100,11%	0,41	63,00%	29,24%	233,75		
Média		10,14%	0,14%	1,855	99,81%	0,42	63,90%	29,45%	226,89		



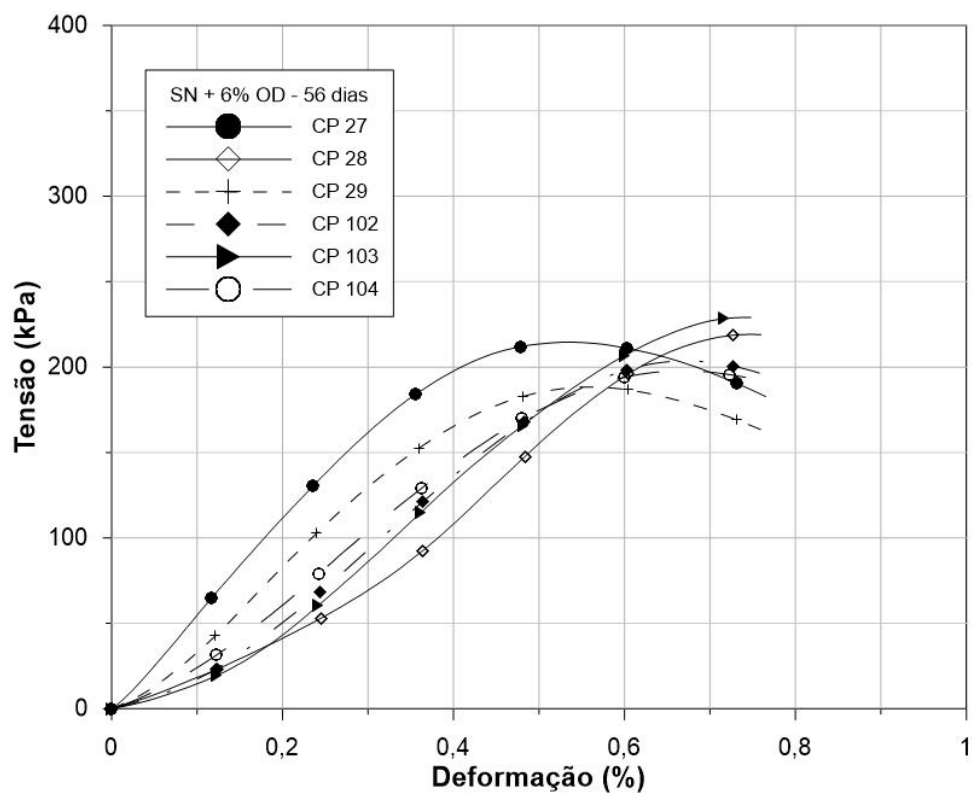
SOLO +6%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
23	7 dias	9,70%	-0,30%	1,855	99,78%	0,42	61,10%	29,47%	234,49	20,64	7,99
25	7 dias	9,83%	-0,17%	1,871	100,67%	0,41	63,80%	28,84%	271,75		
26	7 dias	9,64%	-0,36%	1,876	100,92%	0,4	63,10%	28,66%	268,52		
Média		9,72%	-0,28%	1,867	100,46%	0,41	62,60%	28,99%	258,25		



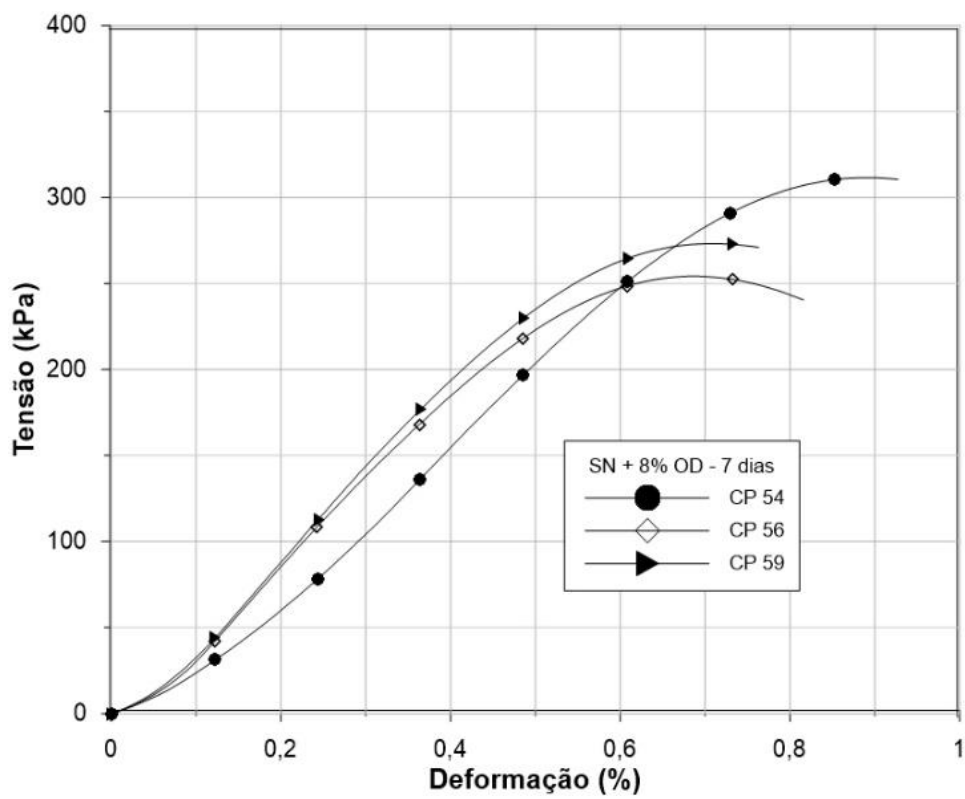
SOLO +6%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
42	28 dias	10,20%	0,20%	1,859	99,98%	0,42	64,70%	29,33%	198,74	9,53	4,99
44	28 dias	10,15%	0,15%	1,854	99,76%	0,42	63,80%	29,49%	180,46		
45	28 dias	9,81%	-0,19%	1,861	100,13%	0,41	62,50%	29,22%	194,32		
Média		10,05%	0,05%	1,858	99,95%	0,42	63,70%	29,35%	191,17		



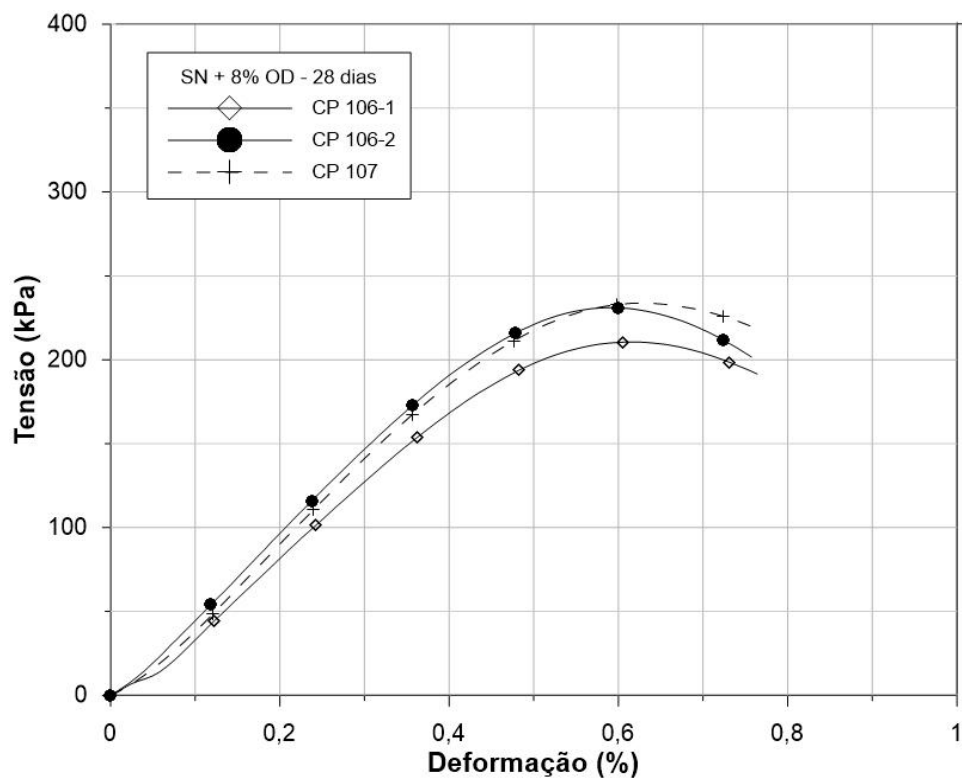
SOLO +6%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
27	56 dias	9,88%	-0,12%	1,877	100,98%	0,40	64,80%	28,62%	214,58	14,99	7,58
28	56 dias	9,58%	-0,42%	1,875	100,85%	0,40	62,60%	28,71%	219,16		
29	56 dias	9,65%	-0,35%	1,872	100,71%	0,40	62,70%	28,81%	188,31		
102	56 dias	10,06%	0,06%	1,83	98,45%	0,44	60,60%	30,41%	203,57		
103	56 dias	10,20%	0,20%	1,851	99,57%	0,42	63,70%	29,62%	229,15		
104	56 dias	10,09%	0,09%	1,849	99,47%	0,42	62,80%	29,69%	197,8		
Média		10,00%	0,00%	1,851	99,55%	0,42	62,50%	29,63%	204,71		



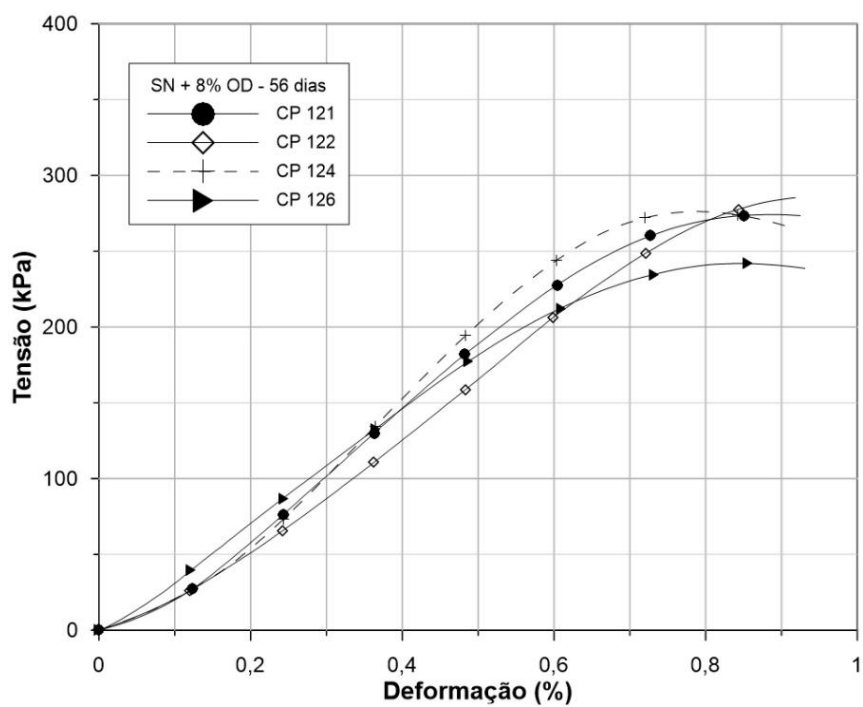
SOLO +8%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
54	7 dias	10,13%	0,13%	1,85	99,52%	0,42	63,20%	29,66%	311,5	29,19	10,44
56	7 dias	10,28%	0,28%	1,847	99,36%	0,42	63,80%	29,77%	254,21		
59	7 dias	10,15%	0,15%	1,846	99,31%	0,42	62,90%	29,80%	273,2		
Média		10,19%	0,19%	1,848	99,40%	0,42	63,30%	29,74%	279,64		



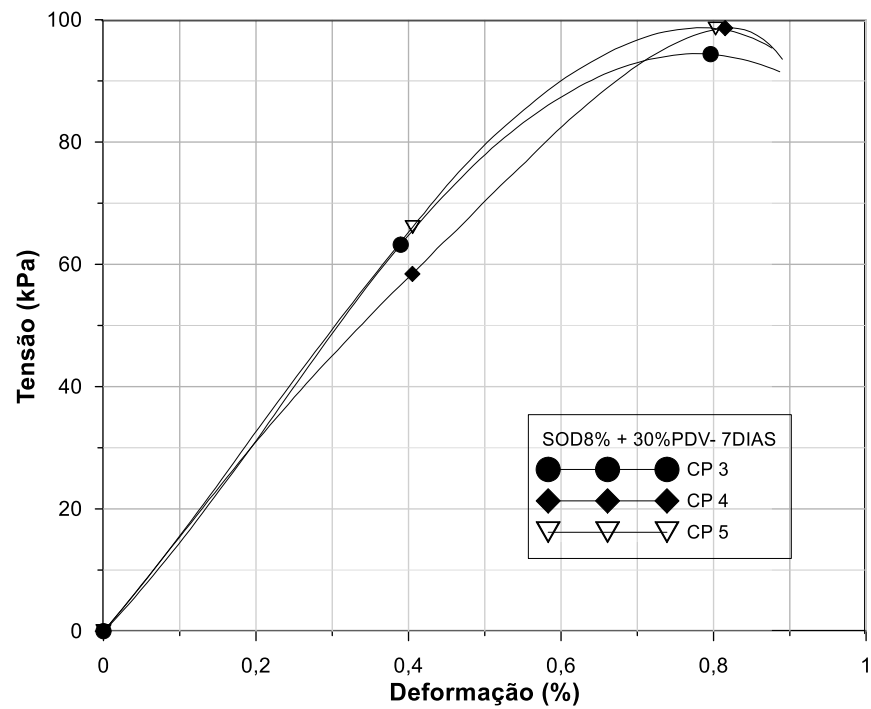
SOLO +8%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
106-2	28 dias	10,39%	0,39%	1,868	100,47%	0,41	67,00%	28,98%	231,04	12,65	5,62
106-1	28 dias	10,34%	0,34%	1,865	100,33%	0,41	66,30%	29,08%	210,59		
107	28 dias	10,10%	0,10%	1,865	100,33%	0,41	64,80%	29,08%	233,7		
Média		10,28%	0,28%	1,866	100,38%	0,41	66,00%	29,05%	225,11		



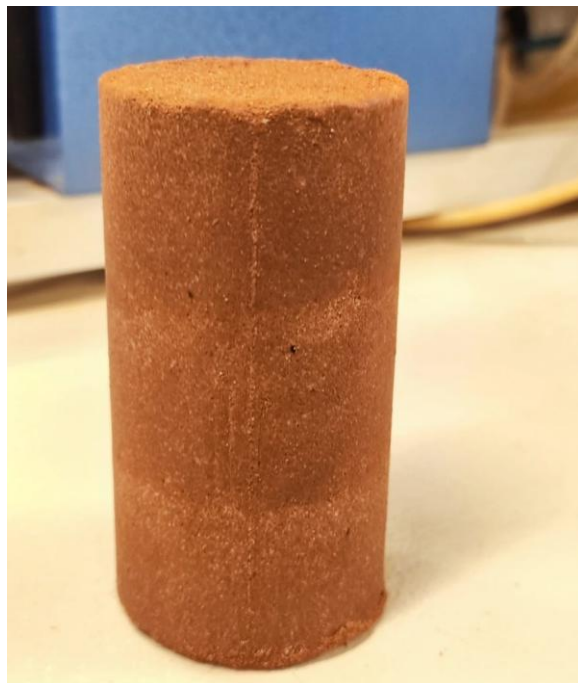
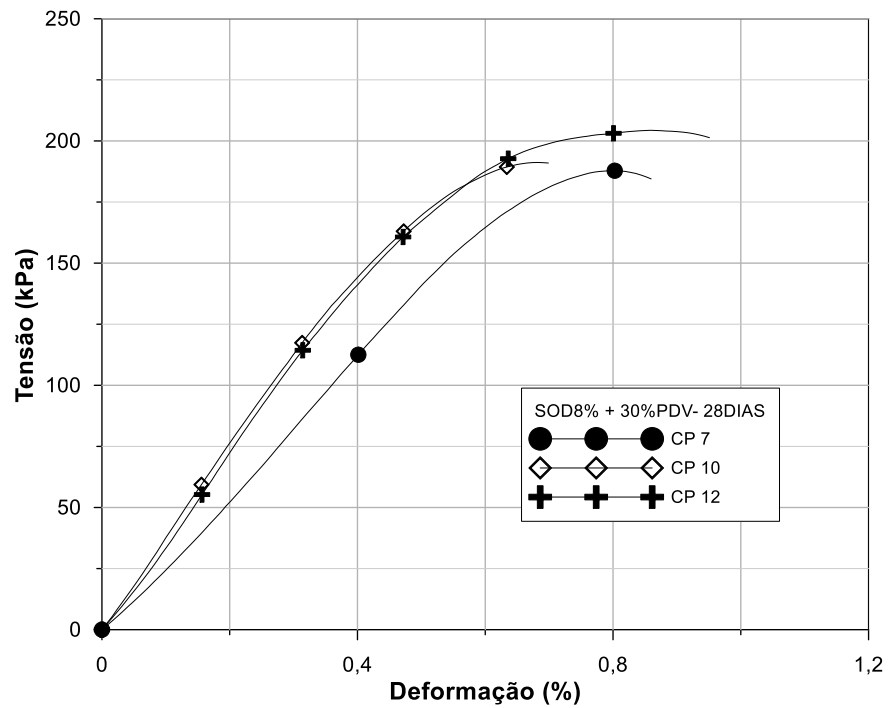
SOLO +8%OD											
CP	Tempo de Cura	W mold	ΔW	$\rho_d(g/cm^3)$	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
121	56 dias	10,47%	0,47%	1,857	99,92%	0,42	66,20%	29,38%	274,15	19,1	7,09
122	56 dias	10,35%	0,35%	1,858	99,97%	0,42	65,60%	29,34%	285,92		
124	56 dias	9,78%	-0,22%	1,867	100,41%	0,41	62,90%	29,03%	276,16		
126	56 dias	10,25%	0,25%	1,86	100,05%	0,41	65,10%	29,28%	241,95		
Média		10,21%	0,21%	1,861	100,09%	0,41	65,00%	29,26%	269,54		



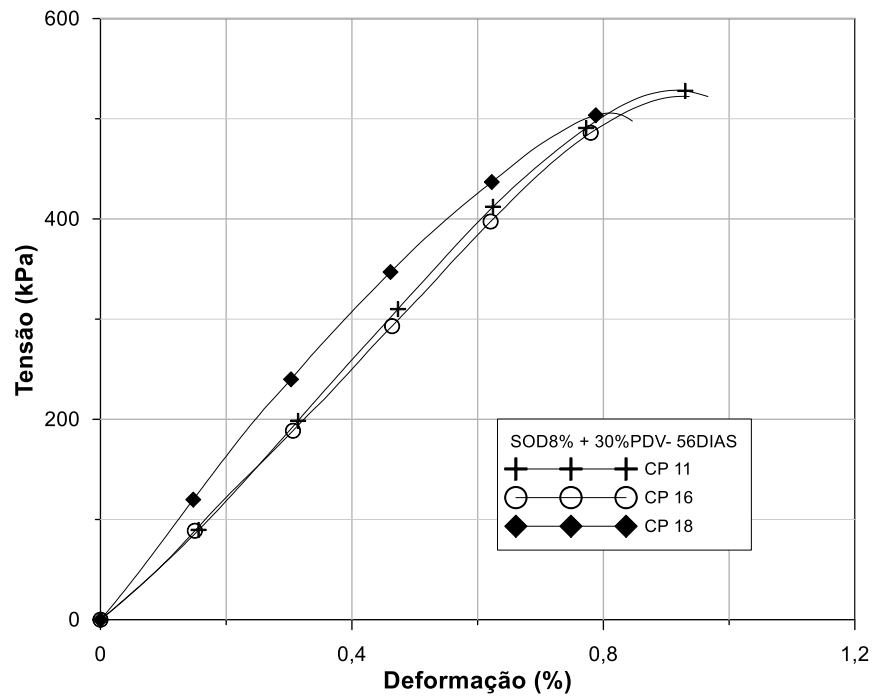
SOD8% + 30%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
3	7 dias	13,4%	2%	1,718	98%	0,5202	67%	34%	94,46	6,849	7%
4	7 dias	13,0%	2%	1,725	99%	0,5141	66%	34%	98,69		
5	7 dias	14,1%	3%	1,708	98%	0,5294	69%	35%	98,7		
Média		13,5%	2%	1,718	98%	0,5202	67%	34%	98,69		



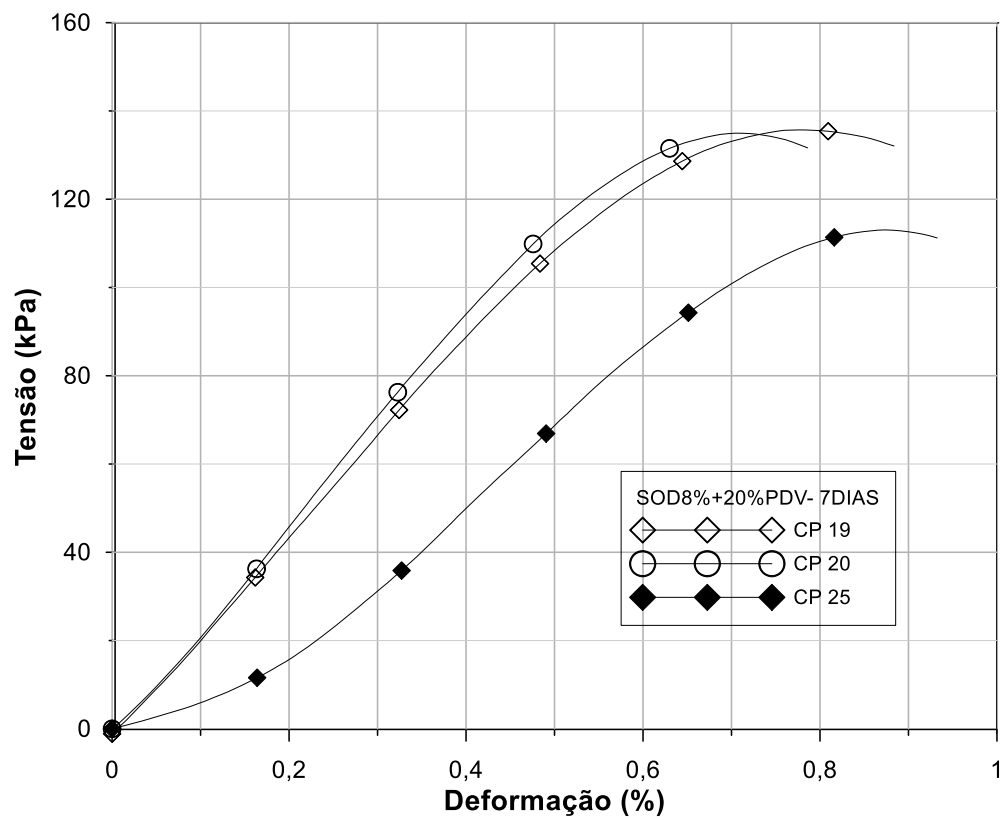
SOD8% + 30%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
7	28 dias	13,6%	2%	1,712	98%	0,5260	67%	34%	187,82	9,347	5%
10	28 dias	13,1%	2%	1,721	98%	0,5181	66%	34%	191,19		
12	28 dias	12,3%	1%	1,734	99%	0,5064	64%	34%	205,43		
Média		13,0%	2%	1,721	98%	0,5181	66%	34%	191,19		



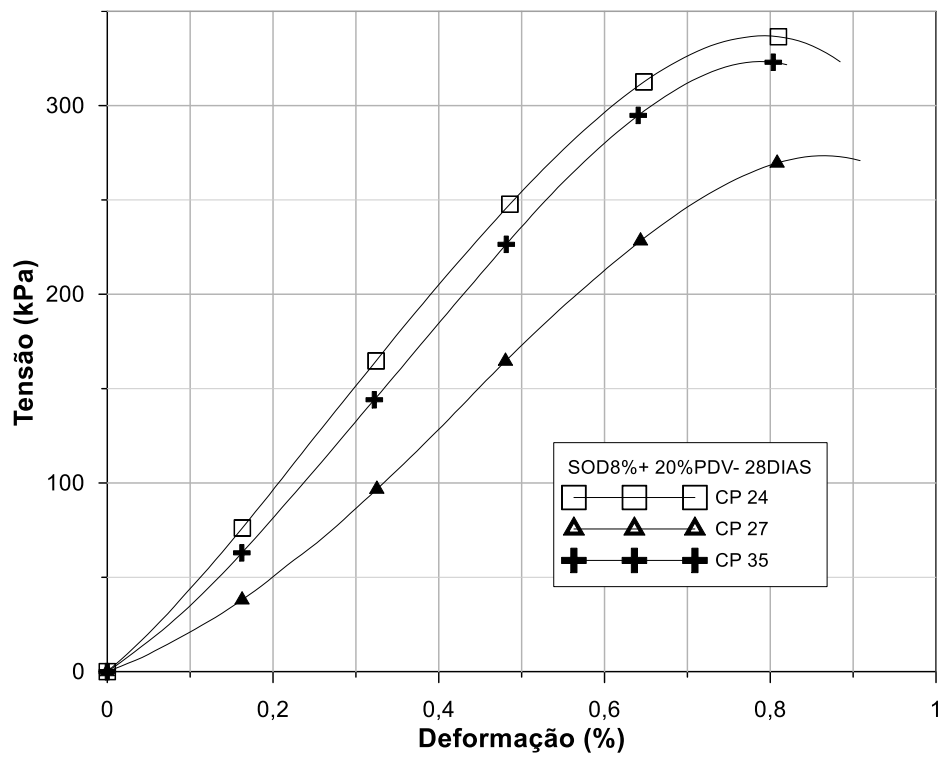
SOD8% + 30%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
11	56 dias	12,6%	1%	1,732	99%	0,5082	65%	34%	440,38	4,355	1%
16	56 dias	12,6%	1%	1,731	99%	0,5088	65%	34%	435,32		
18	56 dias	12,0%	1%	1,744	100%	0,4979	63%	33%	443,99		
Média		12,4%	1%	1,732	99%	0,5082	65%	34%	440,38		



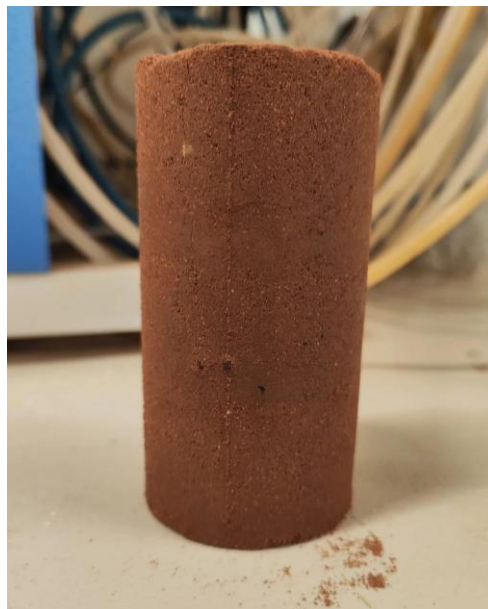
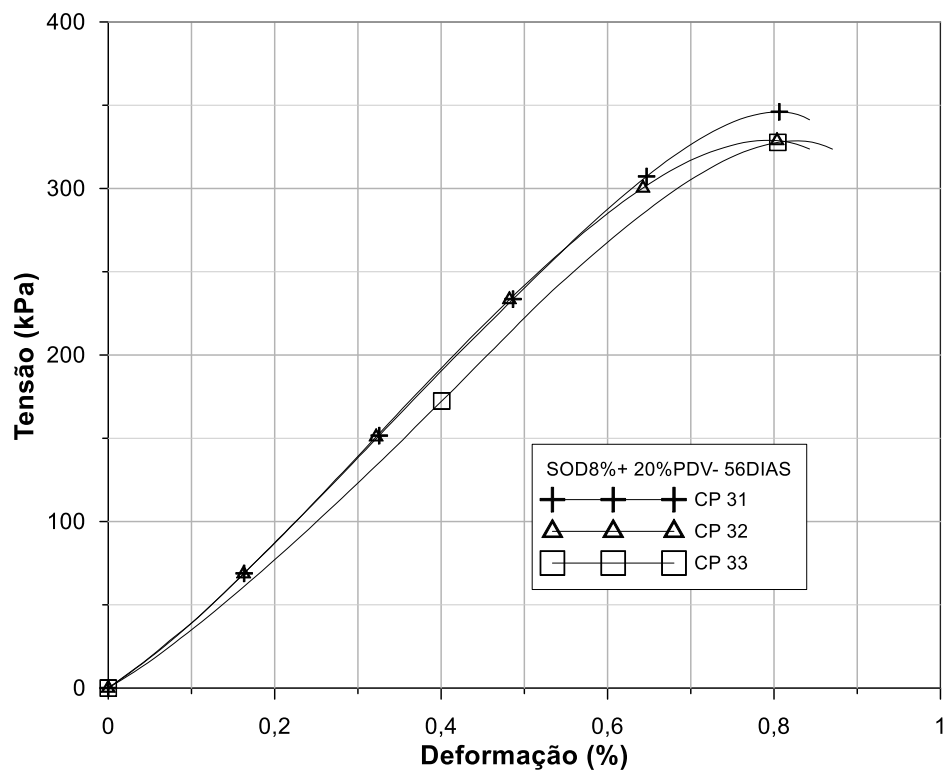
SOD8% + 20%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
19	7 dias	11,6%	1%	1,819	100%	0,4363	70%	30%	136,7	13,180	10%
20	7 dias	11,6%	1%	1,803	99%	0,4484	68%	31%	134,96		
25	7 dias	11,1%	1%	1,799	99%	0,4519	64%	31%	113,04		
Média		11,5%	1%	1,803	99%	0,4484	68%	31%	134,96		



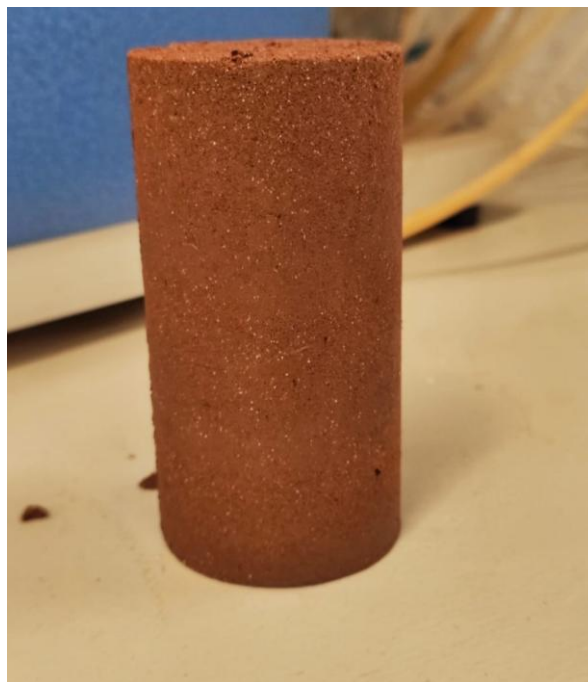
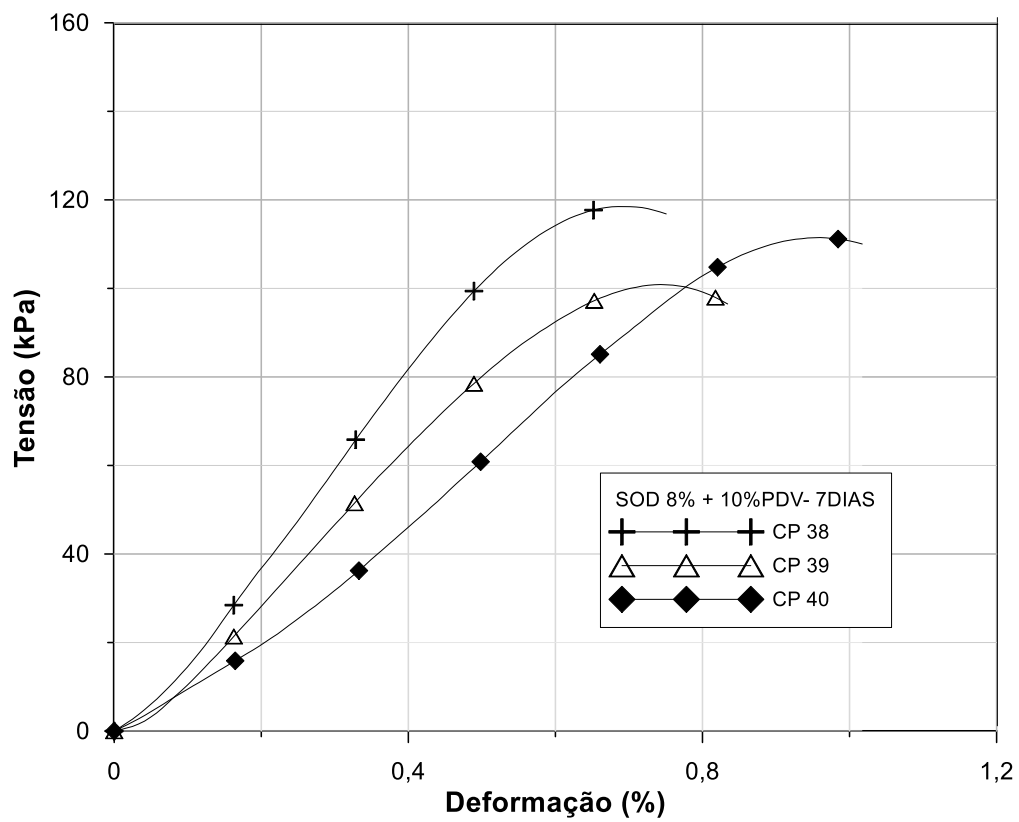
SOD8% + 20%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
24	28 dias	11,1%	1%	1,866	102%	0,3999	72%	29%	337,04	33,480	11%
27	28 dias	10,5%	0%	1,834	101%	0,4240	65%	30%	273,43		
35	28 dias	10,0%	0%	1,824	100%	0,4318	60%	30%	323,36		
Média		10,5%	0%	1,834	101%	0,4240	65%	30%	311,28		



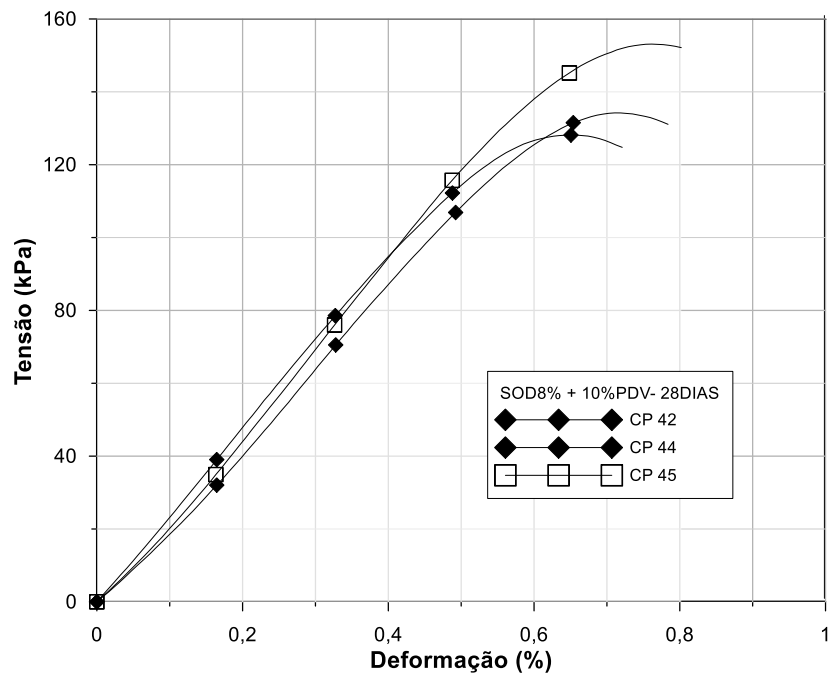
SOD 8% + 20%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
31	56 dias	11,7%	2%	1,799	99%	0,4521	68%	31%	346,05	9,984	3%
32	56 dias	12,2%	2%	1,789	98%	0,4601	69%	32%	328,91		
33	56 dias	10,6%	0%	1,813	99%	0,4411	63%	31%	328,61		
Média		11,5%	1%	1,799	99%	0,4521	68%	31%	334,52		



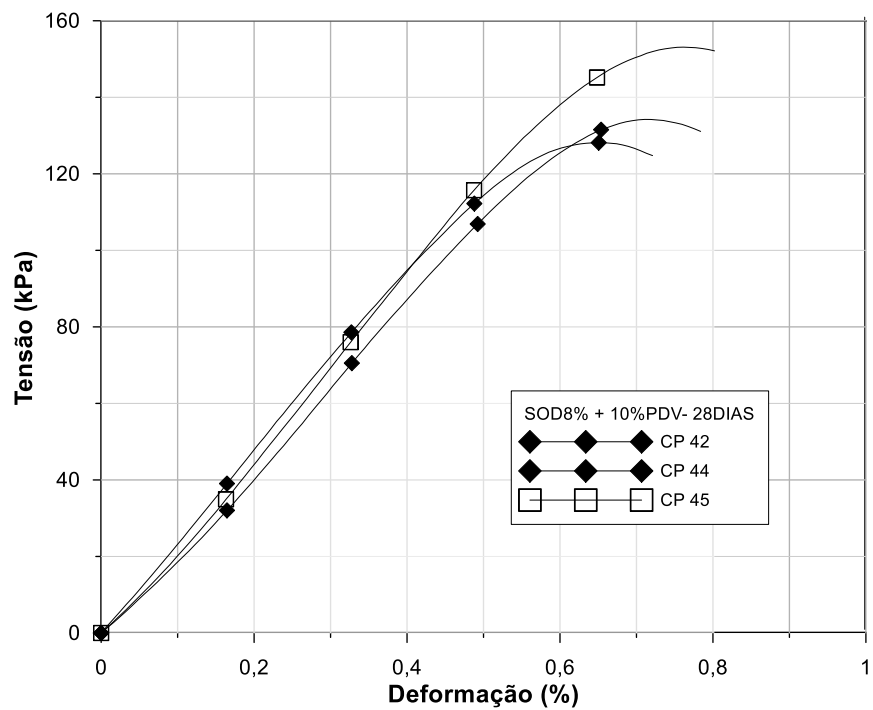
SOD8% + 10%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
38	7 dias	10,8%	2%	1,804	98%	0,4476	63%	31%	118,48	8,860	8%
39	7 dias	8,6%	-1%	1,846	101%	0,4147	54%	29%	100,88		
40	7 dias	11,8%	2%	1,791	98%	0,4585	67%	31%	111,49		
Média		10,4%	1%	1,804	98%	0,4476	63%	31%	110,2833		



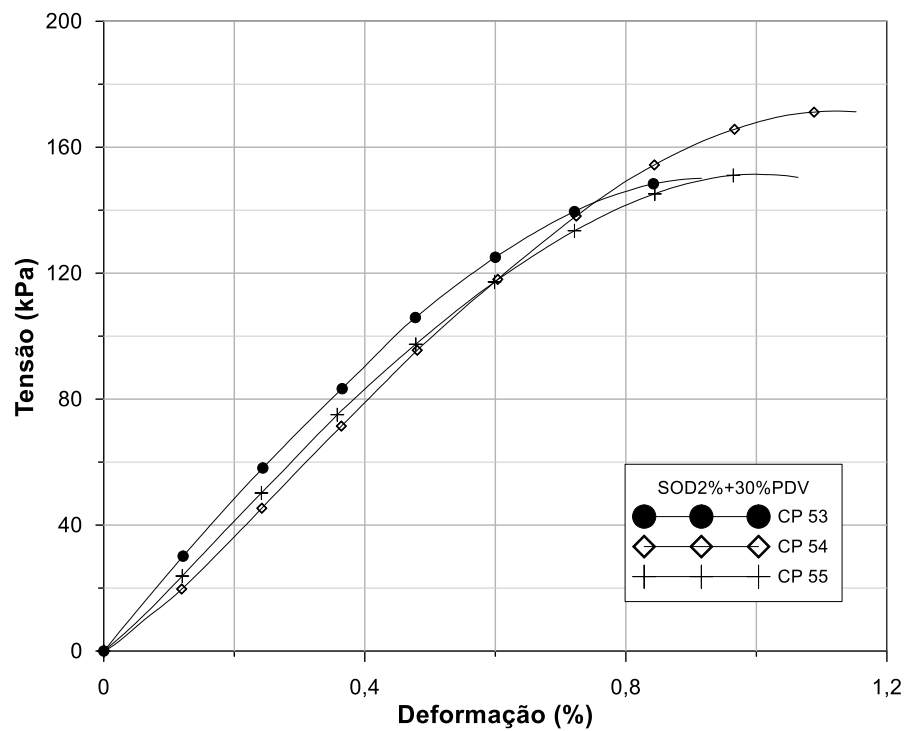
SOD8% 10%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
42	28 dias	9,1%	0%	1,839	100%	0,4207	56%	30%	134,22	10,225	8%
44	28 dias	10,5%	1%	1,803	98%	0,4484	61%	31%	136,88		
45	28 dias	9,6%	0%	1,826	99%	0,4306	58%	30%	153,11		
Média		9,7%	0%	1,826	99%	0,4306	58%	30%	141,4033		



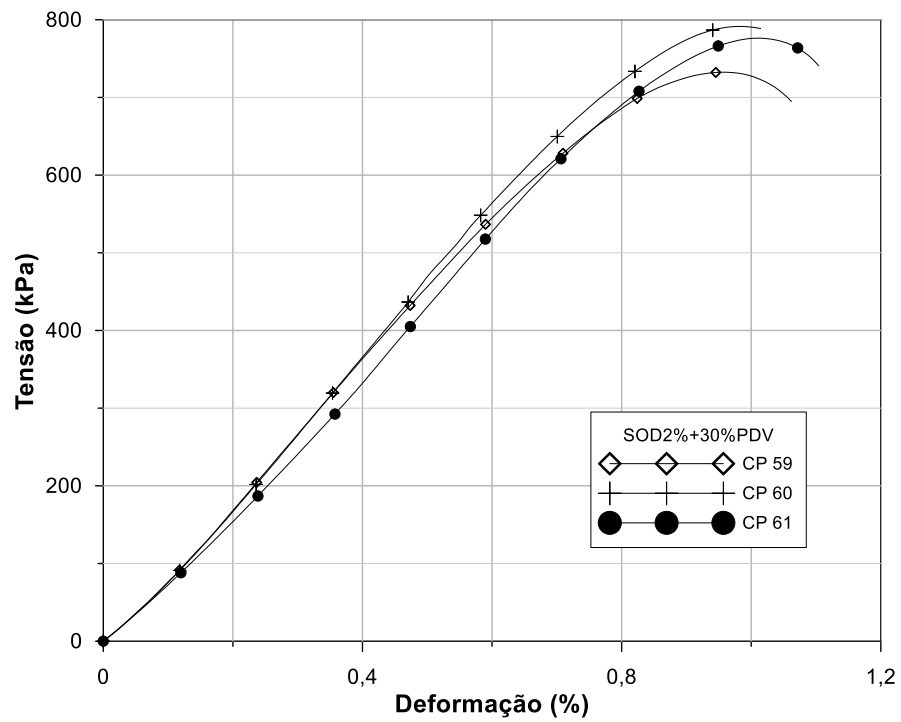
SOD8% + 10%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
48	56 dias	8,5%	-1%	1,849	101%	0,4130	54%	29%	164,1	9,437	5%
49	56 dias	9,7%	0%	1,818	99%	0,4365	58%	30%	182,91		
51	56 dias	9,3%	0%	1,834	100%	0,4243	57%	30%	172,16		
Média		9,2%	0%	1,834	100%	0,4243	57%	30%	173,06		



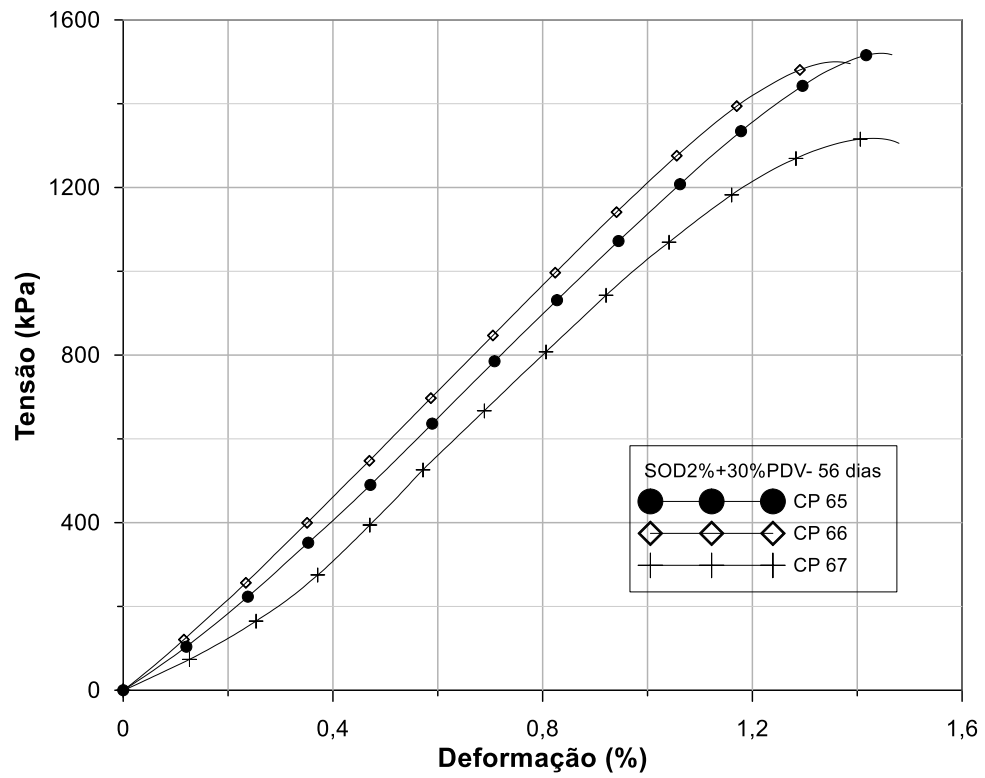
SOD2% + 30%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
53	7 dias	12,9%	0%	1,812	101%	0,4414	76%	31%	150,16	11,959	8%
54	7 dias	12,8%	0%	1,812	100%	0,4416	76%	31%	171,48		
55	7 dias	12,7%	0%	1,801	100%	0,4505	73%	31%	151,43		
Média		12,8%	0%	1,812	100%	0,4416	76%	31%	157,69		



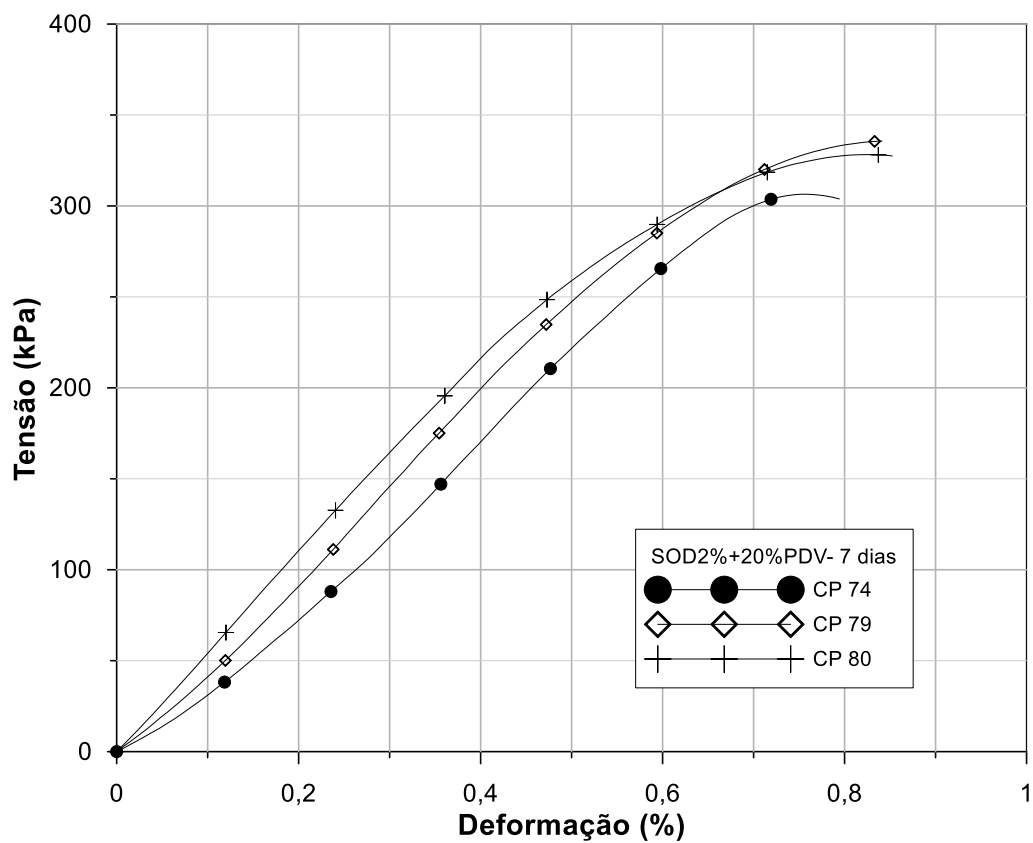
SOD2% + 30%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
59	28 dias	13,1%	13%	1,789	99%	0,4600	74%	32%	732,49	30,613	4%
60	28 dias	13,1%	13%	1,798	100%	0,4530	75%	31%	791,45		
61	28 dias	12,8%	13%	1,803	100%	0,4486	74%	31%	776,26		
Média		13,0%	13%	1,798	100%	0,4530	74%	31%	766,73		



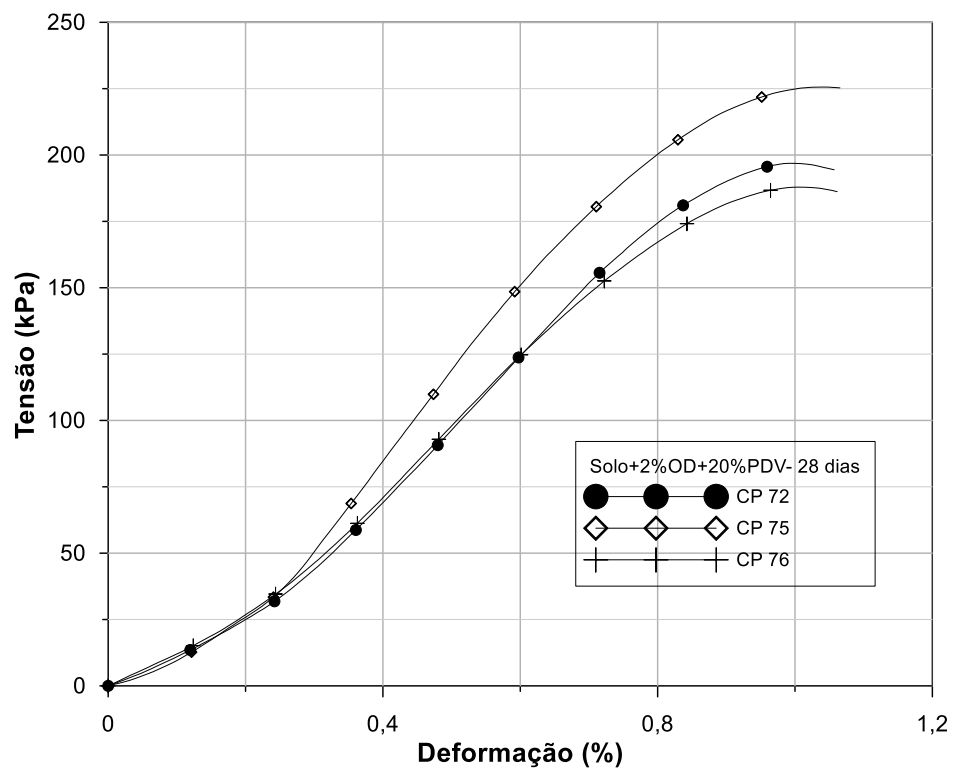
SOD2% + 30%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
65	56 dias	12,8%	0%	1,806	100%	0,4466	75%	31%	1520,3	15,241	8%
66	56 dias	12,8%	0%	1,808	100%	0,4447	75%	31%	1500,01		
67	56 dias	12,5%	0%	1,811	100%	0,4422	74%	31%	1317,29		
Média		12,7%	0%	1,808	100%	0,4447	75%	31%	1445,87		



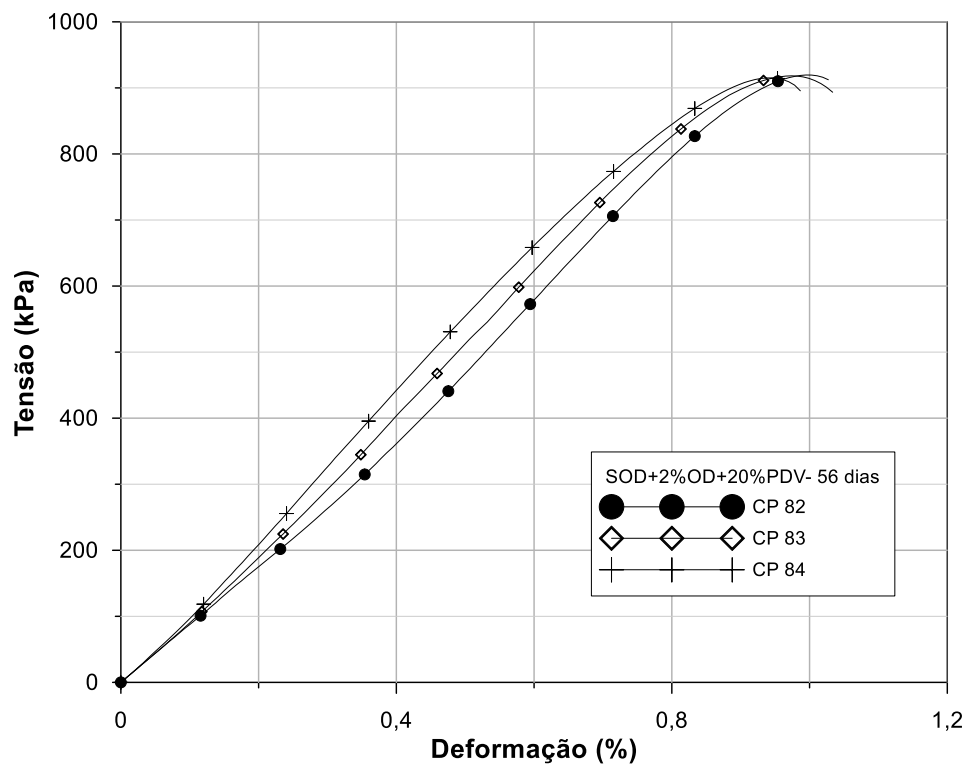
SOD2% +20%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
74	7 dias	13,7%	1%	1,819	100%	0,4361	82%	30%	306,46	111,812	5%
79	7 dias	12,3%	0%	1,814	100%	0,4401	73%	31%	335,83		
80	7 dias	12,9%	1%	1,831	100%	0,4264	79%	30%	328,22		
Média		13,0%	1%	1,819	100%	0,4361	79%	30%	323,50		



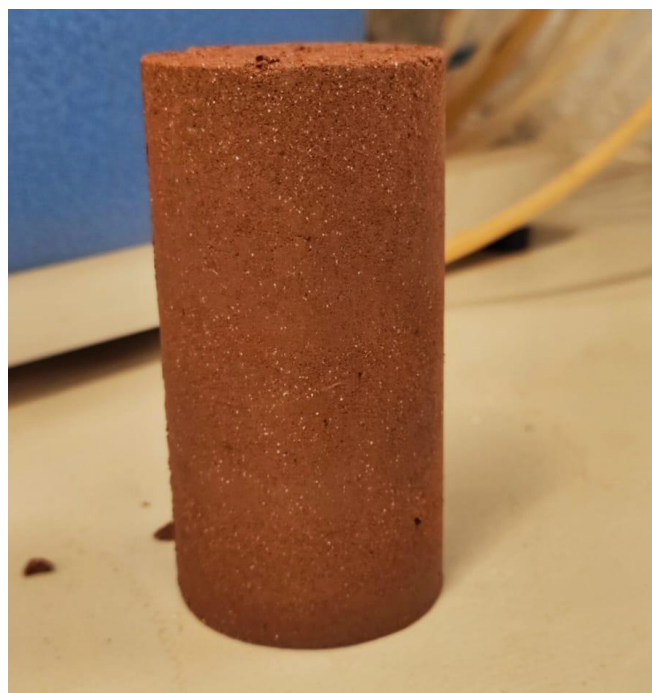
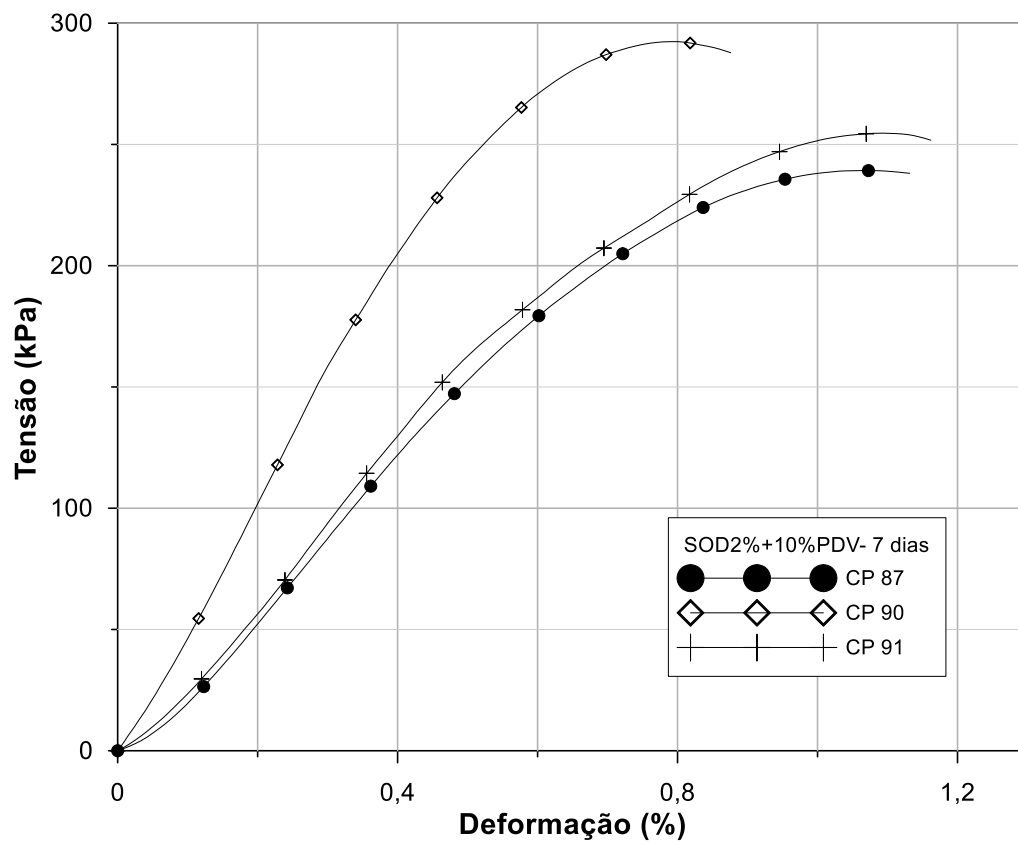
SOD2%+20%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
72	28 dias	12,0%	0%	1,836	100%	0,4225	74%	30%	162,02	2,284	0%
75	28 dias	12,4%	0%	1,836	100%	0,4224	77%	30%	198,41		
76	28 dias	11,7%	-1%	1,845	100%	0,4155	74%	29%	158,97		
Média		12,0%	0%	1,836	100%	0,4224	74%	30%	173,13		



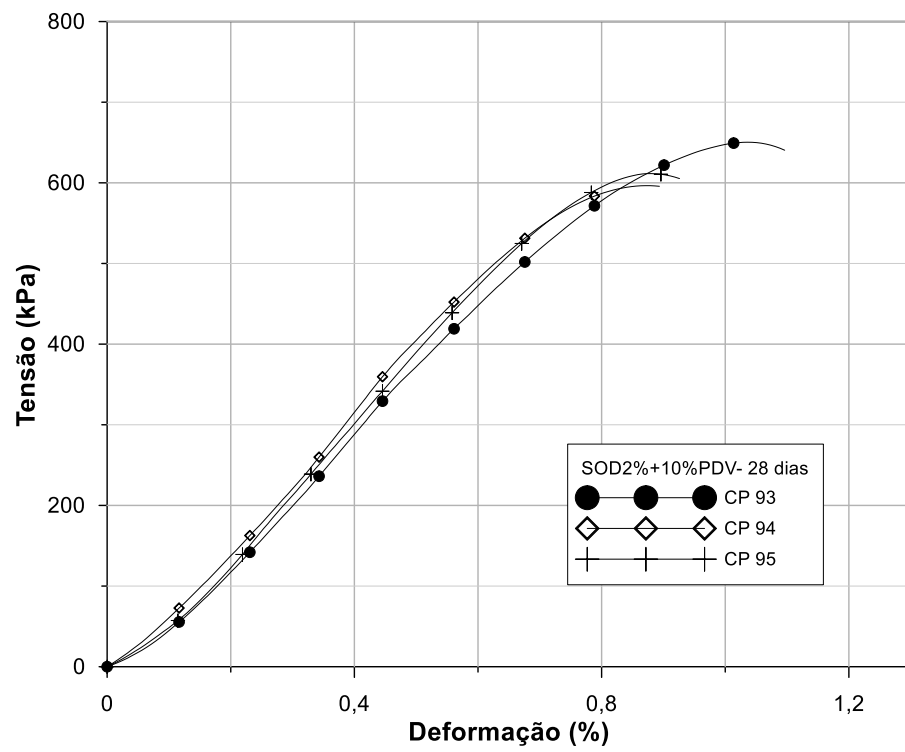
SOD2% +20%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
82	56 dias	11,5%	-1%	1,866	102%	0,3999	75%	29%	919,52	21,943	13%
83	56 dias	11,4%	-1%	1,860	101%	0,4043	73%	29%	918,27		
84	56 dias	11,3%	-1%	1,856	101%	0,4071	72%	29%	915,09		
Média		11,4%	-1%	1,860	101%	0,4043	73%	29%	917,63		



SOD2% +10%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
87	7 dias	11,5%	-1%	1,925	102%	0,3571	84%	26%	239,32	26,686	10%
90	7 dias	10,9%	-1%	1,845	98%	0,4154	69%	29%	292,39		
91	7 dias	8,9%	-3%	1,848	98%	0,4133	56%	29%	254,65		
Média		10,5%	-2%	1,848	98%	0,4133	69%	29%	262,12		



SOD2%10%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	ρ_d (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
93	28 dias	11,5%	-1%	1,902	101%	0,3732	80%	27%	650,37	52,262	10%
94	28 dias	11,6%	-1%	1,895	100%	0,3785	80%	27%	596,49		
95	28 dias	11,2%	-1%	1,905	101%	0,3711	79%	27%	611,45		
Média		11,4%	-1%	1,902	101%	0,3732	80%	27%	619,44		



SOD2%+10%PDV											
CP	Tempo de Cura	W mold.	Δw	pd (g/cm ³)	GC	e	Sr	n	RCS (kPa)	DP	Variância
97	56 dias	11,4%	-1%	1,901	101%	0,3740	80%	27%	527,99	51,053	9%
99	56 dias	10,8%	-2%	1,901	101%	0,3738	76%	27%	556,91		
100	56 dias	11,3%	-1%	1,899	100%	0,3755	79%	27%	483,00		
Média		11,2%	-1%	1,901	101%	0,3740	79%	27%	522,63		

