



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

RENAN ÍTALO LEITE GURJÃO

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO NORMAL APLICADA, PESO ESPECÍFICO E UMIDADE
DOS RESÍDUOS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS ATERRADOS**

Campina Grande - PB
março de 2021

RENAN ÍTALO LEITE GURJÃO

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO NORMAL APLICADA, PESO ESPECÍFICO E UMIDADE
DOS RESÍDUOS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS ATERRADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. William de Paiva

Campina Grande - PB

05 de março de 2021

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO NORMAL APLICADA, PESO ESPECÍFICO E UMIDADE
DOS RESÍDUOS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS ATERRADOS**

RENAN ÍTALO LEITE GURJÃO

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE – UFCG, EM CUMPRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

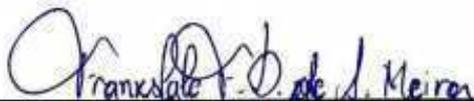
Examinada por:



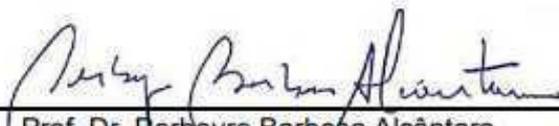
Prof^ª. Dr^ª. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Orientadora - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG)



Prof. Dr. William de Paiva
(Coorientador - Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)



Prof. Dr. Franklale Fabian Diniz de Andrade Meira
(Examinador externo - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB)



Prof. Dr. Perboyre Barbosa Alcântara
(Examinador externo - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE)

Campina Grande - PB

março de 2021

G979i

Gurjão, Renan Ítalo Leite.

Influência da tensão normal aplicada, peso específico e umidade dos resíduos na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos aterrados / Renan Ítalo Leite Gurjão. - Campina Grande, 2021.

62 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. William de Paiva".

Referências.

I. Aterros Sanitários. 2. Planejamento Fatorial. 3. Resistência ao Cisalhamento. 4. Resíduos Sólidos. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Paiva, William de. III. Título.

CDU 628.472.3(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por minha vida, minha família, minha saúde e tudo o que tenho.

Agradeço aos meus familiares, em especial ao meu pai Roberto e à minha mãe Mônica (*in memoriam*), por serem verdadeiros exemplos na minha vida e na vida dos meus irmãos.

À minha namorada Débora Laís, por todo incentivo e carinho.

Aos meus orientadores, Veruschka e William, pela oportunidade de fazer parte desta pesquisa e por toda a paciência e dedicação que tiveram comigo durante o período em que estive sob suas orientações.

Aos amigos do subgrupo de Ensaio Geotécnicos, em especial Cláudio, pela parceria e ajuda durante todas as etapas da pesquisa.

Agradeço ao Grupo de Geotecnia Ambiental, por toda a colaboração na realização das etapas necessárias à conclusão desse trabalho. Agradeço a todos os amigos que conheci durante a minha passagem no grupo de pesquisa.

Agradeço aos membros da banca examinadora, os professores Franklale e Perboyre, pela disponibilidade em contribuir com a melhoria deste trabalho.

Agradeço aos professores, funcionários e colaboradores da Universidade Federal de Campina Grande.

A todo o pessoal da empresa ECOSOLO e ao engenheiro João Azevedo, pela colaboração com o Grupo de Geotecnia Ambiental no desenvolvimento da pesquisa.

Ao povo brasileiro, que de maneira indireta sustentou esta pesquisa por meio da CAPES, órgão pelo qual me foi concedida a bolsa de incentivo ao longo dos anos de pesquisa.

RESUMO

A depender da dinâmica de operação de um aterro sanitário, da composição gravimétrica dos resíduos e das condições meteorológicas, fatores como a tensão atuante, umidade e peso específico dos resíduos variam em diversos pontos de um mesmo aterro sanitário, o que torna difícil a determinação de parâmetros de resistência que sejam constantes e que representem todos os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) aterrados, fazendo-se necessária a inclusão desses elementos nas análises de resistência ao cisalhamento. O objetivo desse trabalho foi determinar a resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos aterrados, considerando a variação de umidade e peso específico dos resíduos, bem como a tensão normal aplicada. O campo experimental para o desenvolvimento desse trabalho foi o Aterro Sanitário localizado em Campina Grande-PB, de onde foram retirados resíduos com idade de aterramento de um ano, para caracterização e realização de ensaios de cisalhamento direto seguindo um planejamento fatorial que possibilitou otimizar o processo de interação entre os fatores, analisar a influência desses na resistência ao cisalhamento dos resíduos e formular modelos estatísticos de tensão cisalhante. A tensão normal e o peso específico foram os fatores que mais exerceram influência sobre a tensão cisalhante das amostras estudadas, seguido da umidade. Os modelos gerados foram significativos para a determinação da tensão cisalhante dos RSU, levando em consideração a tensão normal aplicada, a umidade e peso específico dos resíduos. A variação da tensão normal aplicada, umidade e peso específico dos resíduos influenciou os parâmetros de resistência dos RSU aterrados.

Palavras-chave: aterros sanitários, planejamento fatorial, resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

Depending on the dynamics of a landfill operation, the gravimetric composition of the waste and weather conditions, factors such as the applied normal stress, moisture content and unit weight of the waste vary at different points in the same landfill, which makes it difficult to determine a single strength parameter to represent Municipal Solid Waste (MSW), making it necessary to include these elements in the shear strength analysis. The objective of this work was to determine the shear strength of landfilled municipal solid waste, considering the variation of moisture and unit weight of the waste, as well as the normal stress applied. The experimental field for the development of this work was the Sanitary Landfill located in Campina Grande-PB, from where waste was removed at the age of one year, for characterization and direct shear tests following a factorial planning that made it possible to optimize the process of interaction between the factors, analyze their influence on the shear strength of the residues and formulate statistical models of shear stress. The variation of the applied normal stress, moisture content and unit weight of the waste influenced the shear strength parameters of the grounded MSW. Normal stress and unit weight were the factors that most influenced the shear stress of the studied samples, followed by moisture content. The generated models were significant for the determination of the shear stress of the grounded MSW, considering the effects of normal applied stress, the moisture content and unit weight of the waste.

Palavras-chave: landfill, factorial design, shear strength.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS	11
2.1.	Objetivo geral	11
2.2.	Objetivos específicos	11
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1.	Caracterização dos resíduos sólidos urbanos	12
3.1.1.	Composição gravimétrica	12
3.1.2.	Peso específico <i>in situ</i>	12
3.2.	Resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos	14
3.2.1.	Fatores que afetam a resistência ao cisalhamento dos RSU	15
3.2.2.	Determinação da resistência ao cisalhamento em laboratório	20
3.3.	Planejamento fatorial	24
4.	METODOLOGIA	27
4.1.	Descrição do campo experimental	27
4.2.	Coleta e caracterização dos resíduos	29
4.2.1.	Caracterização Gravimétrica	30
4.2.2.	Peso específico dos RSU	31
4.3.	Planejamento fatorial do ensaio de cisalhamento direto	32
4.4.	Ensaio de cisalhamento direto	35
4.4.1.	Preparação dos corpos de prova	36
4.4.2.	Execução do ensaio de cisalhamento direto	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1.	Composição gravimétrica	39
5.2.	Peso específico	41
5.3.	Resistência ao cisalhamento	41
5.4.	Planejamento fatorial e análise estatística dos dados	45
5.4.1.	Determinação das envoltórias de ruptura	54
6.	CONCLUSÕES	58

1. INTRODUÇÃO

Existe uma variedade de situações que podem afetar a resistência dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros sanitários. Essas situações correspondem a cenários como: o aumento das cargas impostas pelo alteamento de uma célula do aterro sanitário, a variação de peso específico dos resíduos em decorrência do esforço de compactação e da profundidade, ou a variação de umidade e saturação entre as camadas de resíduos depositados. Situações como essas são comuns a aterros sanitários e devem ser consideradas em análises de resistência ao cisalhamento dos RSU. No entanto, poucos estudos foram realizados para investigar as propriedades de resistência de RSU sob variação de umidade e peso específico dos resíduos, bem como a influência da tensão normal aplicada.

A depender da dinâmica de operação de um aterro sanitário, da composição gravimétrica dos resíduos e das condições meteorológicas, fatores como a tensão atuante, umidade e peso específico dos resíduos variam em diversos pontos de um mesmo aterro sanitário, o que torna difícil a determinação de parâmetros de resistência que sejam constantes e representem todos os RSU aterrados, fazendo-se necessária a inclusão desses elementos nas análises de resistência ao cisalhamento.

Nesse sentido, é necessário desenvolver modelos de tensão cisalhante que contemplem, além da tensão normal aplicada, a variação da umidade e peso específico dos resíduos aterrados, uma vez que esses fatores se alteram após o aterramento dos resíduos. Para isso, é importante também que esses modelos sejam elaborados a partir de resultados obtidos em ensaios de resistência realizados em resíduos sólidos urbanos já aterrados, de forma a minimizar a variação de resistência em decorrência da diferença de composição gravimétrica entre resíduos antes e após o aterramento, causada biodegradação dos resíduos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Determinar a resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos aterrados, considerando a variação de umidade e peso específico dos resíduos, bem como a tensão normal aplicada.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar o efeito do aterramento na composição dos Resíduos Sólidos Urbanos;
- Verificar a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos em duas situações de níveis de líquidos: inundado e não inundado.
- Propor modelos estatísticos que representem a tensão cisalhante dos Resíduos Sólidos Urbanos segundo a variação da umidade e peso específico dos resíduos, bem como a tensão normal aplicada;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

3.1.1. Composição gravimétrica dos resíduos

Para projeto e definição da estrutura em aterros sanitários, é essencial o conhecimento das características dos materiais que são utilizados na sua construção. Segundo Pandey e Tiwari (2015), definir as propriedades geotécnicas dos resíduos sólidos urbanos contribui na concepção e avaliação do desempenho do aterro sanitário e na garantia de contenção segura de RSU a longo prazo para que a saúde humana e o meio ambiente não sejam expostos a riscos indevidos.

Os RSU são materiais heterogêneos, que variam sua composição dependendo da região em que são produzidos, o que torna necessário que seu estudo seja realizado para cada aterro em específico. Tendo por base a composição gravimétrica, o comportamento dos RSU dispostos em uma célula operacional pode ser mais bem compreendido, uma vez que, segundo Boscov (2008), as características gerais do maciço tendem a se assemelhar às do seu componente principal.

Muito além de sua utilidade operacional, a caracterização gravimétrica contribui no planejamento da gestão dos resíduos sólidos, pois as informações obtidas na composição do RSU possibilitam a implantação de serviços relacionados à reciclagem dos resíduos, além de servir como indicador dos padrões de consumo de uma determinada população (ARAÚJO NETO *et al.* 2019).

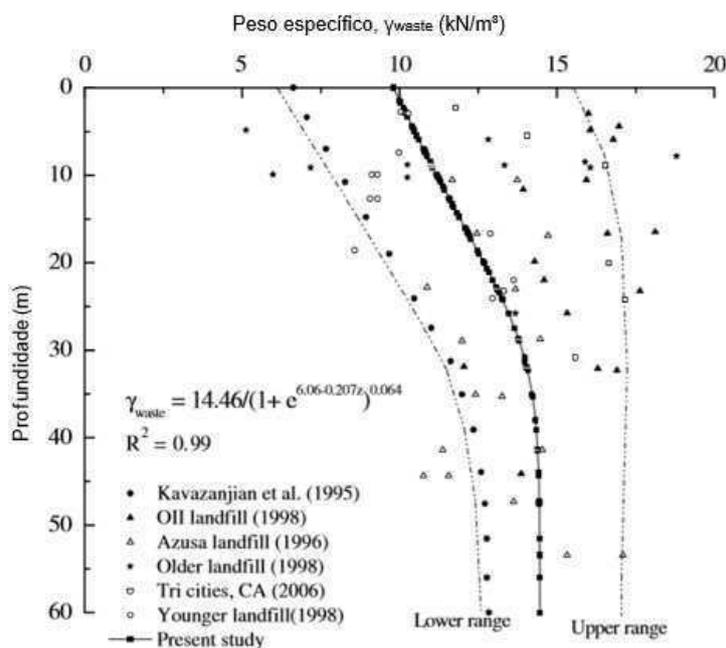
3.1.2. Peso específico *in situ* dos resíduos

O peso específico dos resíduos presentes em um aterro sanitário é uma propriedade importante para o projeto e análise de engenharia de um aterro, como a estabilidade de taludes, funcionamento de geomembranas, resistência de tubos internos ao sistema de drenagem e previsão da capacidade de contenção do aterro sanitário (ZEKKOS *et al.*, 2006). Dentre esses fatores, a tensão aplicada sobre as camadas inferiores, diretamente ligado ao peso específico dos RSU, tem o potencial de exercer influência direta na resistência ao cisalhamento.

Entre os estudos de peso específico em aterros sanitários, existe uma grande dispersão nos valores encontrados, decorrentes da natureza heterogênea presente na massa do aterro sanitário. Segundo Dixon e Jones (2005) o peso específico de um aterro sanitário varia significativamente, a depender de aspectos operacionais como controle de compactação, espessura da camada de cobertura e aspectos como a umidade e grau de decomposição dos resíduos.

Por tratar-se de um índice físico necessário à análise de estabilidade de aterros sanitários, diversos estudos foram realizados no sentido de analisar a sua variação com a profundidade, buscando, dentre outras coisas, uma tendência que permitisse a previsão dos valores de peso específico. Dentre esses autores, Zekkos *et al.* (2006) e Choudhury e Savoikar (2009) propuseram equações empíricas, calculadas a partir da coleta de dados em aterros sanitários, gerando curvas limites como as apresentadas na Figura 1.

Figura 1:Variação do peso específico de aterros sanitários com a profundidade

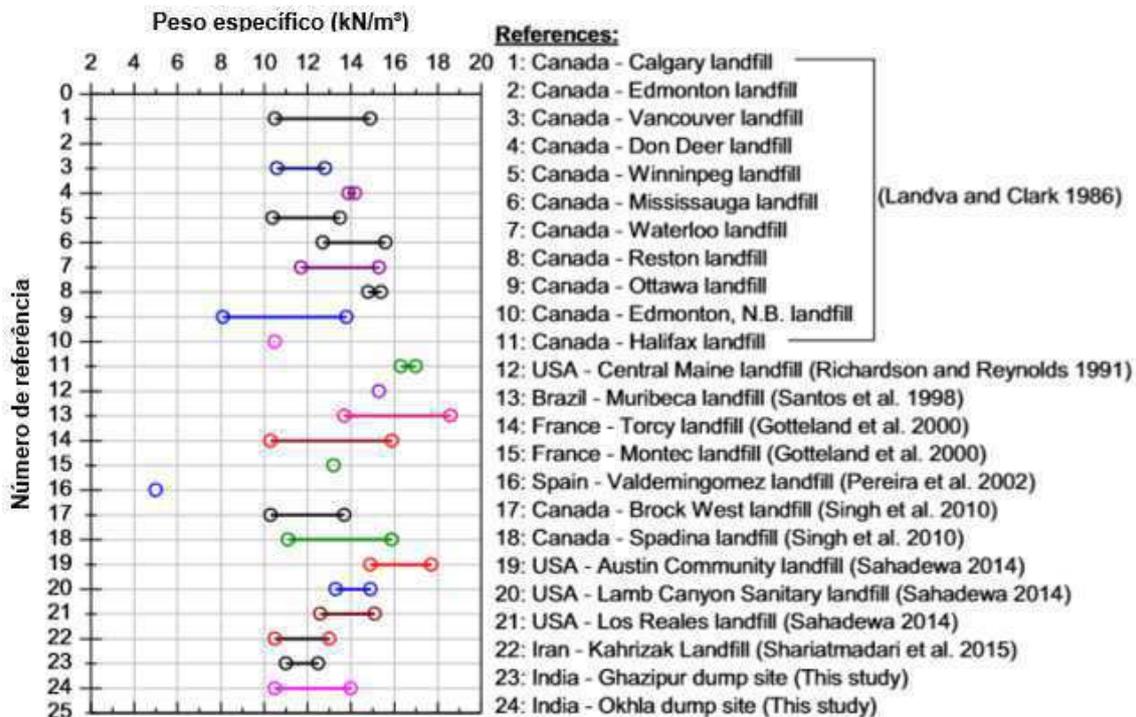


Fonte: Adaptado de Choudhury e Savoikar (2009)

O peso específico dos RSU de aterros sanitários é geralmente calculado por meio de ensaios que envolvem a escavação de valas ou furos com a pesagem dos RSU retirados. O cálculo do volume é realizado por meio de substituição por água ou outros materiais, conforme já realizado por Santos *et al.* (1998), Silveira (2004) Abreu (2015), Shariatmadari, Sadeghpour e Mokhtari (2015) e Ramaiah, Ramana e Datta (2017).

A técnica de escavação *in situ* em grandes volumes é, segundo Zekkos *et al.* (2006) o método mais confiável para avaliar o peso específico em aterros sanitários, pois envolve maiores dimensões de materiais, minimizando erros de alteração dos componentes, garantindo representatividade. Pela dificuldade na realização desse tipo de procedimento, maior parte dos estudos é realizada próximo à superfície dos aterros, e mesmo assim os resultados podem ser variados, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Comparativo de resultados de peso específico de RSU obtidos próximo à superfície



Fonte: adaptado de Ramaiah, Ramana e Datta (2017)

3.2. Resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

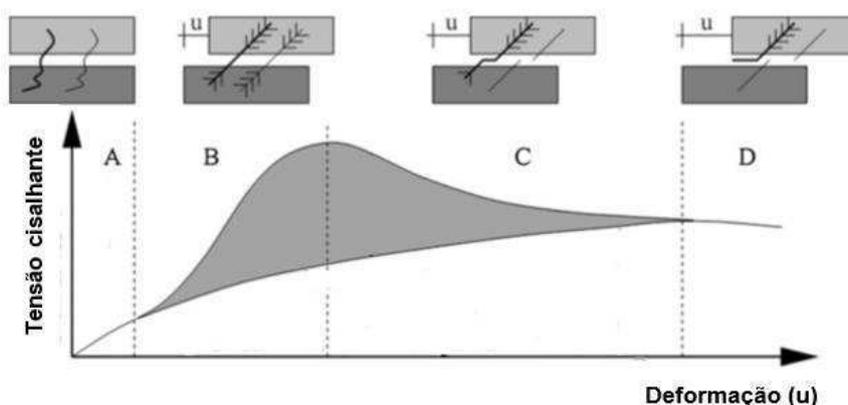
O comportamento dos RSU sob a aplicação de tensões é, segundo Kolsch (1996 *apud* Keramati *et al.*, 2019), função das forças de atrito e tração promovidas pela interação entre os componentes dos RSU. Machado *et al.* (2002) caracterizam o comportamento mecânico dos RSU como função da interação entre as duas frações “pasta” e “fibra”. Os elementos denominados como “fibra” são aqueles como plásticos moles, tecidos, papéis e papelões, ou seja, elementos que possuem uma determinada forma, capaz de ser envolvida por outros componentes e reforçar a matriz sólida de resíduos.

Apesar do comportamento dos RSU ser complexo, e não se resumir apenas à sua consideração em duas matrizes distintas, é comum sua interpretação ser realizada por meio desses critérios, utilizando também de parâmetros geotécnicos utilizados na mecânica dos solos. Sendo assim, no decorrer dessa pesquisa a resistência ao cisalhamento será compreendida por meio dos parâmetros denominados intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ).

3.2.1. Fatores que afetam a resistência ao cisalhamento dos RSU

Segundo Kolsch (1996 *apud* Keramati *et al.*, 2019), a interação entre as parcelas de força de atrito e tração atuantes entre componentes nos RSU pode ser dividida em 4 fases, conforme modelo descrito na Figura 3.

Figura 3: Modelo proposto por Kolsch para o mecanismo de resistência de RSU



Fonte: adaptado de Kolsch (1996) *apud* Keramati *et al.*, 2019

No modelo de Kolsch (1996), a mobilização das forças de atrito ocorre durante todo o processo de cisalhamento, no entanto essa mobilização atua de forma isolada quando submetida a pequenas deformações (A) e maiores deformações (D). A tração das fibras (B) ocorre em uma fase intermediária após a fricção inicial, com o aumento das deformações, a parcela das forças de tração aumenta até um determinado valor que corresponde à interação máxima com o restante do resíduo.

A redução gradual da contribuição das forças de tração (C) ocorre até que a resistência ao cisalhamento do resíduo seja sustentada apenas pela parcela das forças de atrito. Segundo o mesmo modelo, a mobilização da parcela de resistência da tração das fibras é maior quanto maior for a tensão aplicada, pois favorece a ligação entre os componentes.

Para Fucale (2005) e Zekkos *et al.* (2010), a presença de elementos fibrosos que compõem os RSU no aterro possui grande influência no comportamento do material. Conseqüentemente a estabilidade do aterro sanitário também é influenciada, pois como afirma Yamawaki, Doi e Omine (2017), aterros que contém materiais fibrosos tipo plásticos e similares, apesar de suscetíveis a recalques, possuem resistência à fricção e à tração, contribuindo na prática para a construção de taludes mais íngremes.

Os aterros sanitários são majoritariamente formados por resíduos sólidos urbanos, sendo seu comportamento mecânico responsável em grande parte pela estabilidade do maciço. Sendo assim, a resistência ao cisalhamento dos RSU têm sido

alvo de estudo de vários pesquisadores com o intuito de analisar o comportamento tensão-deformação dos resíduos.

A complexidade do estudo da tensão-deformação de RSU é ainda mais abrangente em função da sua heterogeneidade e da variação das condições impostas aos resíduos no interior de aterros sanitários. Por serem os RSU constituídos em boa parte de matéria orgânica, sofrem no interior das células de um aterro sanitário processos físico-químicos e biodegradativos, o que os torna passíveis de alterações em sua composição ao longo do tempo.

Embora muitos estudos tenham sido realizados no sentido de verificar a influência do tempo de aterramento nas propriedades dos RSU, entre eles não existe um consenso no que diz respeito ao comportamento da resistência ao cisalhamento com o tempo de aterramento. Dentre esses estudos, observou-se resultados em que se constatou aumento de resistência (Bareither, Benson e Edil, 2012; Keramati *et al.*, 2019), enquanto em outros estudos afirmou-se perda de resistência com o tempo de aterramento (Hossain e Haque, 2009; Karimpour-Fard *et al.*, 2013; Datta, Fei e Zekkos, 2017).

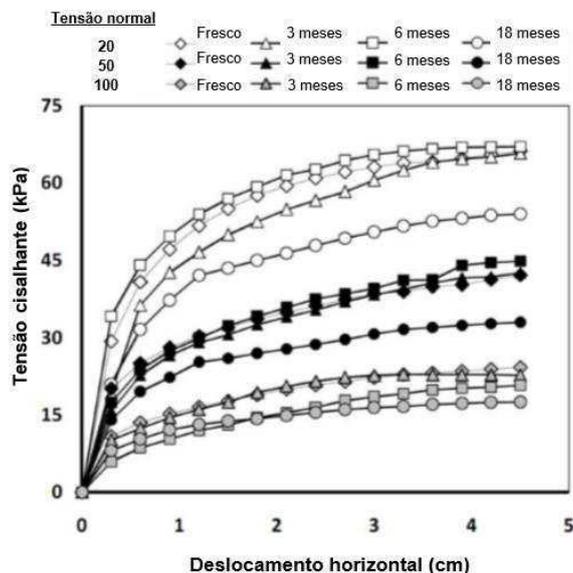
Hossain e Haque (2009) realizaram ensaios de compressão triaxial com RSU em 4 estágios diferentes de decomposição, variando o percentual de solo de camada de cobertura diária (20 a 30% sob o peso total) e constatou que para todas as amostras, a resistência ao cisalhamento aumentou com a adição de solo, sendo maiores do que as amostras sem adição de solo. Para o autor, embora a resistência de resíduos aterrados tenda a diminuir com a idade, devido a decomposição e à consequente mudança de composição, a presença de materiais inertes como as camadas de solo de cobertura diária pode fornecer maior atrito, em função do tipo de solo.

Bareither, Benson e Edil (2012) verificaram amostras em resíduos sólidos degradadas em laboratório, extraídos de um aterro em operação e de uma estação de transbordo, localizados nos estados de Wisconsin e North Carolina. Os autores constataram uma correlação entre a diminuição do valor de sólidos voláteis (SV) e o ângulo de atrito, indicando que os resíduos aumentaram a resistência com o tempo de aterramento. No entanto, os mesmos autores verificaram que o ângulo de atrito das amostras aumentou para altas quantidades de material inerte, e diminuiu para altas frações de papel, papelão e plástico.

Quando analisada a influência da umidade e do peso específico dos resíduos no ângulo de atrito e na coesão das amostras de RSU, Bareither, Benson e Edil (2012) não encontraram correlação entre os dados analisados, apenas uma ligeira tendência de aumento da resistência com o peso específico.

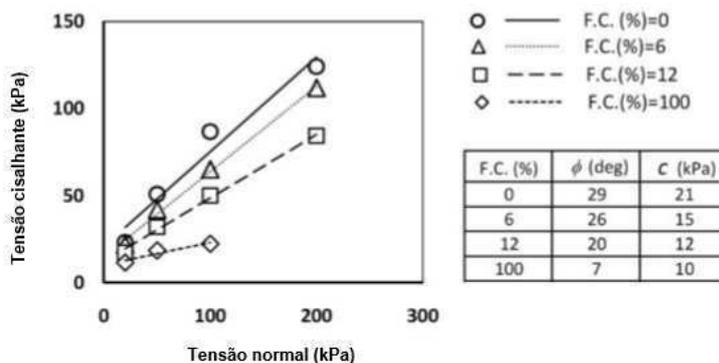
Karimpour-Fard *et al.* (2013) realizaram ensaios de cisalhamento direto com amostras envelhecidas entre 6 e 18 meses retiradas do aterro sanitário de Kahrizak (Teerã) e constataram que com o tempo de aterramento os parâmetros de ângulo de atrito e coesão sofreram redução (Figura 4). No mesmo estudo, foram variados os percentuais de fibra (6 e 12%), os ângulos de orientação das fibras (0, 30, 60 e 90°) e a velocidade de cisalhamento do ensaio. Os autores observaram que em amostras com fibras orientadas na direção do plano de cisalhamento (horizontal), a resistência ao cisalhamento diminuía na medida que se aumentava o percentual de fibras (Figura 5). No entanto, quando as fibras eram posicionadas em um ângulo de 60° em relação ao plano de cisalhamento, a resistência aumentava para todos os percentuais de fibra, o que condiz com resultados anteriormente obtidos por Bray *et al.* (2009).

Figura 4: Resultados do ensaio de cisalhamento direto para amostras de RSU com diferentes idades de aterramento



Fonte: adaptado de Karimpour-Fard *et al.* (2013)

Figura 5: Envoltória de resistência de resíduos com diferentes percentuais de fibra



Fonte: adaptado de Karimpour-Fard *et al.* (2013)

Keramati *et al.* (2019) estudaram amostras frescas e envelhecidas (6 meses) de RSU retirados do aterro sanitário de Kahrisak e avaliaram também a relação entre a presença de fibras e sua orientação em relação ao plano de cisalhamento. Os autores verificaram que o envelhecimento das amostras aumentou a resistência ao cisalhamento, o que é justificado pelo fato de a quantidade de matéria orgânica diminuir aumentando a presença em percentual de plásticos (fibras). Os autores constataram que o incremento no percentual de fibras e a variação do seu posicionamento aumentou a resistência das amostras.

Embora Karimpour-Fard *et al.* (2013) e Keramati *et al.* (2019) tenham observado resultados semelhantes no tocante à influência das fibras na resistência ao cisalhamento, obtiveram resultados diferentes no que diz respeito à influência da idade dos RSU. Para Hossain e Haque (2009) e Bareither, Benson e Edil (2012), amostras com menor teor de fibras e maior percentual de materiais inertes como o solo, tendem a apresentar maior resistência, pois a matriz sólida contribui significativamente para o atrito dos resíduos.

É possível perceber, portanto, que as análises diferem quanto a parcela de influência que a interação das duas matrizes (matriz sólida e fibrosa) apresentadas por Kolsch (1996) e Machado (2002) exercem, pois para os casos apresentados uma ou outra se sobressaiu.

Para alguns estudos realizados com resíduos de idades específicas retirados de aterros, os resultados foram por vezes divergentes, uma vez que as amostras utilizadas, por serem retiradas de locais distintos, apresentavam variações na composição gravimétrica ou das condições de aterramento que tornavam a correlação entre a idade de aterramento e a resistência ao cisalhamento difícil.

Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014) estudaram 4 amostras de RSU de idades distintas (0, 5, 14 e 21 anos), retiradas do aterro sanitário de Kahrizaki, analisadas por meio de ensaios triaxiais (CU). Segundo os autores, não foi possível estabelecer nenhuma correlação entre idade de aterramento e a resistência, porém utilizando da relação OC (*organic content*), que leva em consideração a quantidade de matéria orgânica presente, constatou-se que para menores valores de OC, houve aumento do ângulo de atrito e redução da coesão nas amostras.

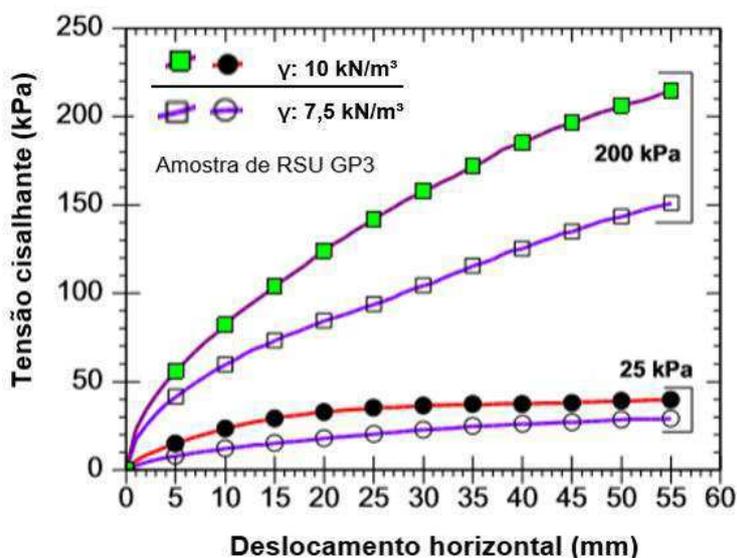
Os autores fazem notar a influência da composição dos resíduos, uma vez que as amostras de 5 anos, com maior teor de plásticos, foram as que apresentaram maiores resultados de resistência para todas as tensões confinantes aplicadas. No entanto, apesar das amostras com 21 anos de aterramento apresentarem teor de plásticos superior às amostras de 14 anos, apresentaram resistência ao cisalhamento menor. Para Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014) essa diferença pode ser explicada

pela redução do módulo de Young dos materiais plásticos com a idade de aterramento, já observado por Machado *et al.* (2006).

Abreu e Vilar (2017) realizaram ensaios de cisalhamento direto com amostras de RSU com idades variando entre 2 e 25 anos de aterramento, retiradas de um aterro sanitário experimental, de um lixão e de um aterro sanitário localizado na cidade de São Carlos. Apesar não terem identificado uma relação clara entre a idade de aterramento e a degradação dos resíduos, verificaram aumento do ângulo de atrito e diminuição da coesão de amostras com maior grau de degradação. Para os autores, a idade de aterramento e grau de degradação não foram correlacionadas, uma vez que encontram resíduos de aterramento recente mais degradados que resíduos mais antigos.

Ramaiah, Ramana e Datta (2017) estudaram amostras de RSU com idades de 3 a 12 anos de aterramento de dois aterros localizados em Delhi, e verificaram aumento do ângulo de atrito e redução da coesão com o aumento da idade de aterramento. Os autores também realizaram ensaios de cisalhamento direto, utilizando das mesmas composições encontradas nos aterros sanitários, variando o peso específico inicial das amostras. Constatou-se que as amostras apresentaram maiores tensões cisalhantes conforme o aumento da tensão normal e do peso específico (Figura 6).

Figura 6: Efeito do peso específico na curva tensão x deformação de RSU



Fonte: adaptado de Ramaiah, Ramana e Datta, 2017

Para Ramaiah, Ramana e Datta (2017), fatores operacionais, como a compactação de aterros sanitários podem resultar no aumento do peso específico inicial e por consequência da resistência ao cisalhamento de RSU, permitindo com segurança

a construção de taludes mais inclinados, promovendo o aumento da capacidade de armazenamento de RSU e vida útil das unidades de aterros sanitários implantadas.

Os estudos realizados de resistência ao cisalhamento que envolvem a influência do tempo de aterramento apresentam geralmente resultados que não levam a uma correlação adequada, o que é suficiente para crer que a variação da resistência nos resíduos sólidos se dá muito mais por sua composição e pelos fatores ou condições que os cercam.

Nos aterros sanitários a variabilidade dos parâmetros de resistência não se encontra apenas enquadrada em função da alteração de sua composição ao longo do tempo, mas principalmente pela variação espacial das amostras, pois sendo os aterros sanitários compostos por materiais heterogêneos e anisotrópicos, dos quais a própria interação entre os componentes que os constituem seja ainda pouco elucidada, é compreensível que a sua determinação necessite de uma abordagem local, na qual sejam levados em consideração as características dos RSU que constituem o aterro, bem como as condições operacionais envolvidas no aterramento.

3.2.2. Determinação da resistência ao cisalhamento dos resíduos em laboratório

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento para RSU são geralmente obtidos em ensaios especiais construídos em maiores dimensões, como o ensaio de cisalhamento direto (GABR, HOSSAIM E BARLAZ, 2007; ZEKOS, 2010; ABREU E VILAR, 2017; PULAT E YUKSELEN-AKSOY, 2019) e compressão triaxial (SHARIATMADARI, SADEGHPOUR & RAZAGHIAN, 2014; RAMAIAH E RAMANA, 2017).

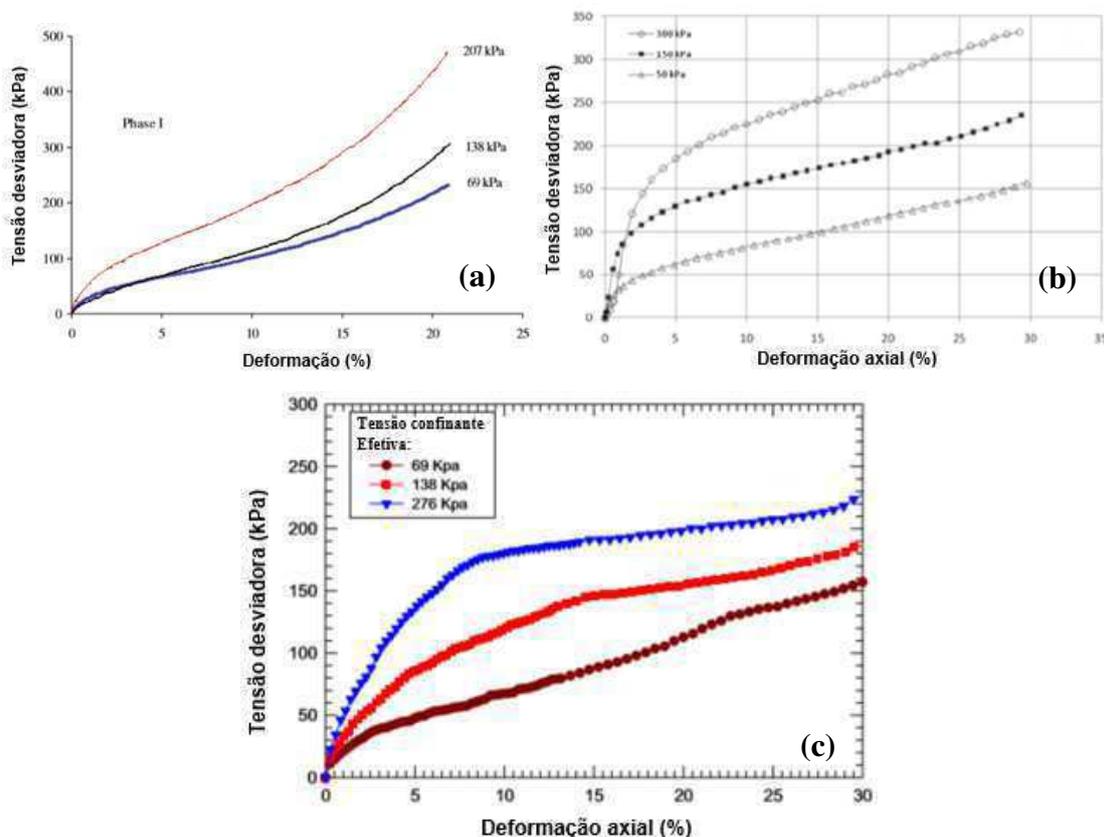
Em virtude das características próprias de cada ensaio empregado, os parâmetros obtidos apresentam em muitos casos variações que são decorrentes das limitações impostas por cada método. Todavia, os ensaios de resistência realizados em RSU apresentam uma característica em comum, que é o seu comportamento de tensão cisalhante crescente e dependente da deformação. Segundo Stark, Huvaj-Sarihan e Li (2009), esse comportamento é possível porque os RSU atuam como um material que sob grandes deformações mobiliza o efeito de reforço de materiais tido como fibrosos.

Essa característica que os RSU possuem de apresentar tensão cisalhante crescente, leva à necessidade de se determinar a sua tensão máxima a partir de deformações preestabelecidas. Segundo Stark, Huvaj-Sarihan e Li (2009), isso advém do fato que o aterro sanitário está associado a outros materiais de menor resistência, como geossintéticos e camadas de solo compactado dos quais a tensão resistente exige limites de deformação muito inferiores aos dos RSU.

Reddy *et al.* (2015) afirmam que para ensaios geotécnicos seja comum assumir a deformação específica de 15 a 20 % para selecionar a tensão cisalhante máxima para o cálculo dos parâmetros de resistência. Stark, Huvaj-Sarihan e Li (2009) e Eid *et al.* (2000) sugerem deformações específicas de 10% por serem compatíveis com o comportamento tensão-deformação de geossintéticos e camadas de base presentes em aterros sanitários. Sendo assim, percebe-se que embora seja recorrente a finalização de um ensaio de resistência ao cisalhamento de RSU sem atingir um pico de ruptura definido, sua análise deve ser subordinada à observância de outros materiais que estão associados a ele no aterro sanitário.

Dentre os tipos de ensaio, existe diferença entre resultados de curva tensão x deformação obtidos por meio de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. Nos ensaios triaxiais, é comum na literatura a descrição de um comportamento crescente da curva tensão desviadora x deformação, sem indício de pico de resistência, que por vezes torna-se em uma curva de concavidade voltada para cima (convexa), como nos exemplos apresentados na Figura 7.

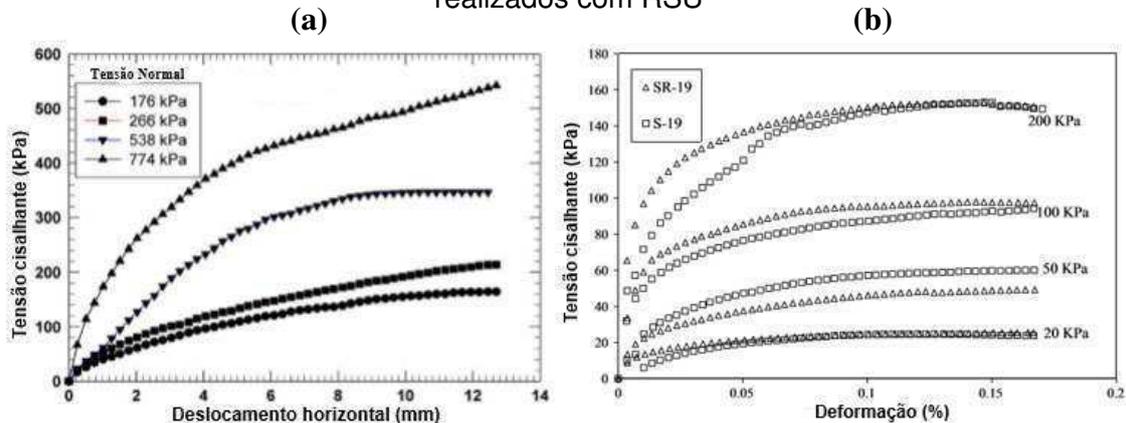
Figura 7: Exemplos de curva tensão desviadora x deformação de ensaios triaxiais realizados com RSU. Dimensões dos corpos de prova: a) 71x145mm; b) 150x300mm; c) 50x100mm



Fonte: a) Hossain e Haque (2009); b) Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014); c) Reddy *et al.* (2015)

Em ensaios de cisalhamento direto, as curvas características também não apresentam pico de ruptura definido, embora tenham um comportamento crescente de tensão cisalhante em que boa parte dos estudos apresenta uma curva que tende a uma assíntota, como apresentado na Figura 8.

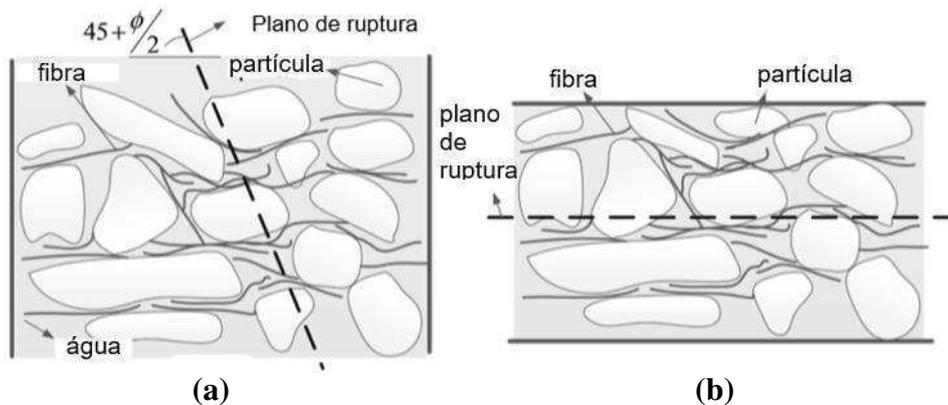
Figura 8: Exemplos de curvas tensão x deformação de ensaios cisalhamento direto realizados com RSU



Fonte: Reddy *et al.* (2008); Keramati *et al.* (2019)

Zekkos *et al.* (2010), Karimpour-Fard *et al.* (2013) e Asadi *et al.* (2017) atribuem essa diferença de comportamento ao reforço que as fibras promovem durante o cisalhamento, pois o plano de ruptura nos ensaios triaxial e de cisalhamento direto não ocorre da mesma forma, como pode ser visto na Figura 9. No ensaio triaxial (Figura 9a), o plano de ruptura inclinado mobiliza as fibras que são geralmente orientadas no sentido do plano, o que justifica tensões desviadoras crescentes sem presença de pico ou assíntotas.

Figura 9: Orientação entre plano de ruptura e posição das fibras: (a) ensaio triaxial; (b) cisalhamento direto



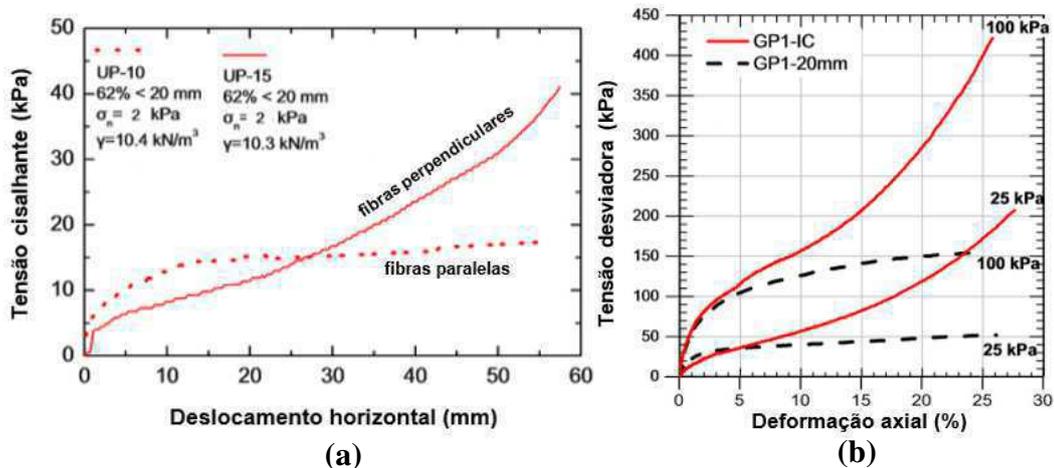
Fonte: adaptado de Asadi *et al.* (2017)

No ensaio de cisalhamento direto, a orientação das fibras é geralmente paralela ao plano de ruptura (Figura 9b), que segundo Shariatmadari, Asadi e Karimpor-Fard (2017) facilita o deslizamento dos componentes de forma que não oferece resistência adicional ao cisalhamento, o que justifica o comportamento característico das curvas tensão x deformação já apresentadas na Figura 8.

Resultados encontrados por Bray *et al.* (2009) confirmam essa hipótese, uma vez que ao comparar ensaios de cisalhamento direto realizados em corpos de prova com orientação das fibras no sentido paralelo e perpendicular à linha de cisalhamento, verificou comportamentos completamente distintos (Figura 10a).

Nota-se, ainda, a semelhança no comportamento da curva tensão x deformação entre a amostra montada com fibras no sentido perpendicular, realizado por Bray *et al.* (2009), e as amostras obtidas por meio de ensaios triaxiais, já apresentadas na Figura 7.

Figura 10: Comparação entre ensaio: (a) cisalhamento direto com fibras orientadas perpendicular e paralelo ao plano de cisalhamento; (b) ensaio triaxial CU com e sem presença de fibras



Fonte: adaptado de Bray *et al.* (2009); Ramaiah e Ramana (2017)

Da mesma forma, em ensaios triaxiais CU, realizados por Ramaiah e Ramana (2017), onde foram comparadas amostras com elementos fibrosos (GP1-IC) e não fibrosos (GP1-20mm), é possível perceber comportamento semelhante entre as amostras realizadas sem elementos fibrosos (Figura 10b) e por ensaios de cisalhamento direto, como os que foram apresentados na Figura 8.

As semelhanças constatadas nas curvas tensão x deformação, apresentadas entre dois ensaios com mecanismos diferentes de cisalhamento, reforçam a influência

que o ângulo da ruptura e a presença e orientação das fibras exerce no comportamento dos ensaios realizados.

Os ensaios de cisalhamento direto são, segundo Fei e Zekkos (2018), Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) e Keramati *et al.* (2019), os mais utilizados para determinar a resistência ao cisalhamento. Dessa forma, grande parte dos estudos realizados em cisalhamento direto são executados em equipamentos de grandes dimensões (dimensões que variam de 30 a 50 cm), sendo alguns poucos realizados em equipamento menores convencionais para estudos de solos, como Gabr e Valero (1995), Gabr, Hossain e Barlaz (2007), Cho *et al.* (2010) e Reddy *et al.* (2015).

No que diz respeito aos ensaios em pequenas dimensões, é possível observar pelos estudos realizados, que as curvas tensão x deformação apresentam características semelhantes quando comparadas a de ensaios de grandes dimensões, ou seja, apresentam comportamento de ganho contínuo de resistência com a deformação horizontal. No entanto, a literatura ainda carece de análises que comparem resultados advindos de ensaios realizados em equipamentos de pequenas e grandes dimensões.

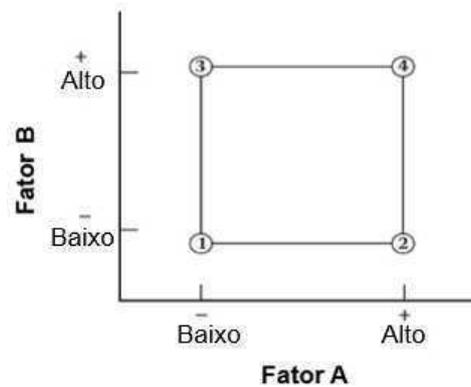
3.3. Planejamento fatorial

Quando se estuda processos em que existam mais de uma variável independente, das quais especula-se a sua interferência na variável dependente, é necessário que seja estudado quais dessas variáveis exercem efeito sobre determinada variável dependente, bem como os valores máximos e mínimos para a sua mobilização.

Para realizar um planejamento fatorial, deve-se fixar um número de níveis (máximo e mínimo) correspondentes a cada fator (variável independente) para então executar os experimentos em todas as combinações possíveis de forma a causar interação entre todos os fatores existentes. O resultado de cada experimento realizado é usualmente chamado de resposta (variável dependente).

Segundo Montgomery (2017), o efeito de um fator pode ser definido como a mudança na resposta produzida pela alteração do seu nível, sendo que em alguns experimentos o efeito de um fator pode depender do nível escolhido para o outro fator, o que demonstra que existe uma interação entre esses fatores. Conforme apresentado na Figura 11, em um experimento fatorial de dois níveis, o efeito do fator A pode ser estimado pela diferença entre a média das respostas obtidas nos seus níveis máximos (4 e 2) e mínimos (3 e 1), obtidos por meio da interação entre os fatores A e B.

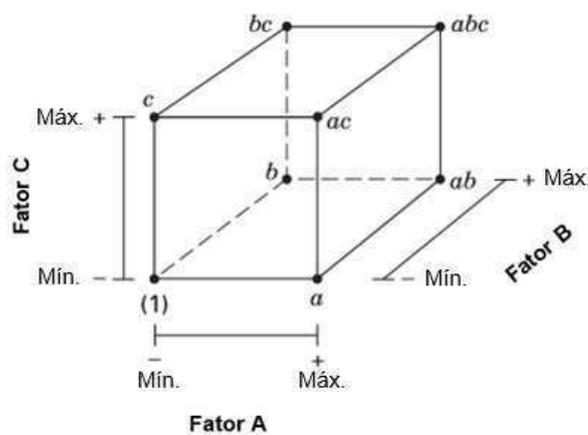
Figura 11: Representação geométrica de experimento fatorial em dois níveis



Fonte: Adaptado de Anderson e Whitcomb (2016) e Montgomery (2017)

O mesmo raciocínio pode ser estendido para experimentos quando possuem 3 fatores, nesse caso a interação entre eles pode ser expressa por meio de um cubo (Figura 12a), de onde os níveis máximos e mínimos interagem conforme a sua matriz de planejamento (Figura 12b).

Figura 12: Experimento fatorial em três níveis: (a) representação geométrica; (b) matriz de planejamento



(a)

Ensaio	Fator		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

(b)

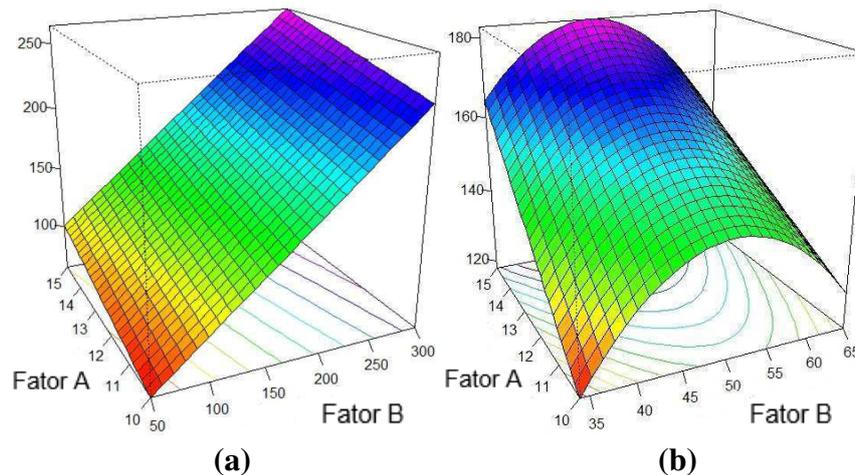
Fonte: adaptado de Montgomery (2017)

A interação entre os fatores é uma vantagem do planejamento fatorial, pois ao contrário de experimentos que são executados com um fator por vez, permite verificar o efeito de cada fator sem fixar as condições dos demais (ANDERSON E WHITCOMB, 2016; MONTGOMERY, 2017; BOX, HUNTER E HUNTER, 2005).

Uma outra forma de ilustrar o conceito de interação é por meio do gráfico de superfície resposta (RSM), apresentado na Figura 13a. Esse gráfico é gerado a partir de um modelo de regressão, obtido pelos efeitos dos fatores estudados no planejamento

fatorial. O objetivo do RSM é substituir uma função de resposta complexa por outra função aproximada, estudando a significância relativa de diversos fatores que se supõe ter influência na variável resposta (MONTGOMERY, 2017; ZANGENEH *et al.*, 2002), dessa maneira é possível estudar a relação entre a variável resposta e os fatores experimentados.

Figura 13: Superfície resposta: (a) linearidade entre os fatores; (b) não linearidade



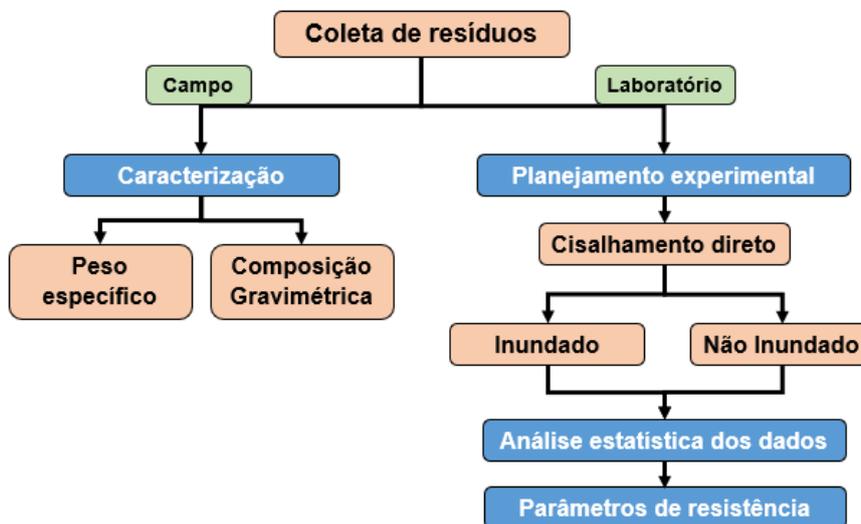
Fonte: o próprio autor

No planejamento fatorial, quando se analisa a interação entre os fatores, é necessário verificar se existe uma relação de linearidade, pois ocorre que muitas vezes a mudança na variável resposta não é proporcional ao nível do fator utilizado, como é o caso apresentado na Figura 13b. Para detectar esse comportamento da resposta, são utilizados os chamados pontos centrais, que são experimentos realizados nos quais os níveis apresentados para os fatores (+, -) se situam apenas em valores médios, representados pelo número 0. Segundo Montgomery (2017), o planejamento fatorial realizado com a inclusão de pontos centrais permite verificar a presença de curvatura, além de fornecer uma estimativa de erro adicional ao projeto, ainda mais quando o experimento não dispõe de réplicas.

4. METODOLOGIA

A execução dessa pesquisa foi dividida em duas partes, uma em campo e outra em laboratório. As etapas da pesquisa estão apresentadas na Figura 14.

Figura 14: Etapas realizadas na pesquisa

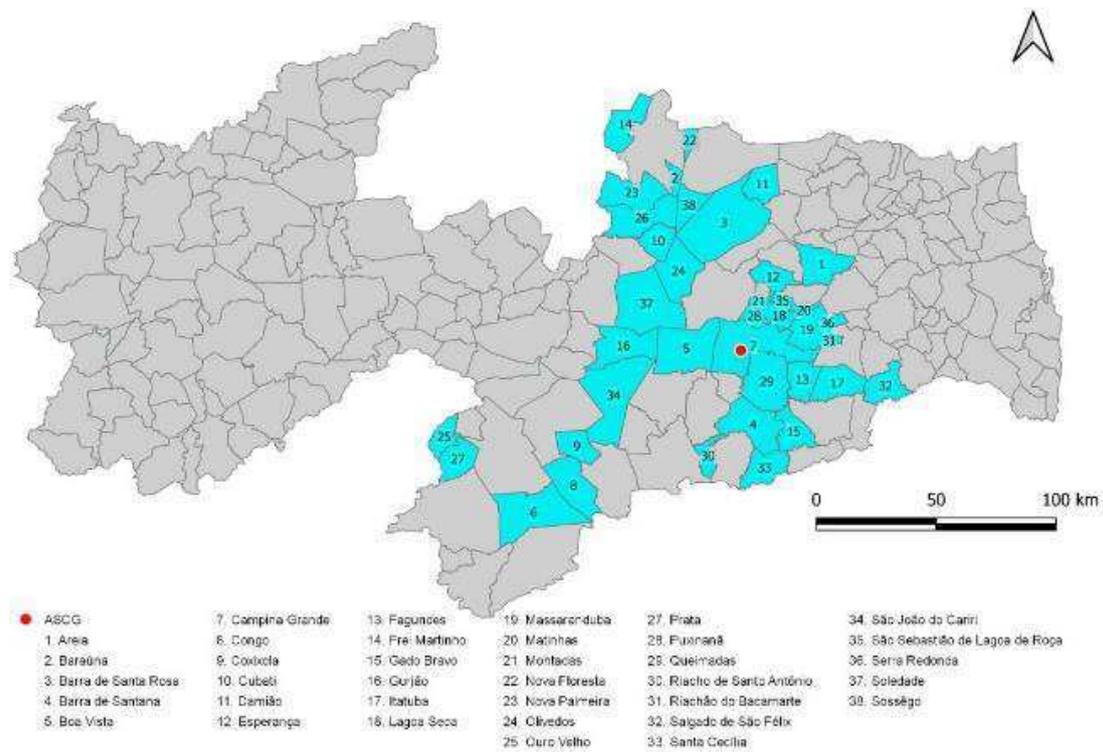


4.1. Descrição do campo experimental

A área de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa foi o Aterro Sanitário em Campina Grande (ASCG), situado nas coordenadas UTM 829172 e 9194834. O ASCG possui uma extensão territorial de 64 ha, dos quais 40 ha correspondem à área destinada à construção de células para a disposição de RSU.

O ASCG recebe aproximadamente 500 t/dia de resíduos, onde durante o ano de 2018, 95% desses resíduos eram oriundos do município de Campina Grande e 5% de outras 17 cidades. A localização do aterro e dos municípios que contribuem na disposição dos resíduos está apresentada na Figura 15.

Figura 15: Localização do ASCG e municípios que depositam resíduos.



Fonte: Grupo de Geotecnia Ambiental - GGA (2020)

A imagem de satélite apresentada na Figura 16 mostra o Aterro Sanitário durante o período da pesquisa.

Figura 16: Vista de satélite do ASCG em setembro de 2018



Fonte: Google Earth

4.2. Coleta e caracterização dos resíduos

A coleta dos RSU foi realizada em local correspondente à berma do aterro, onde os resíduos tinham idade de aterramento de 1 ano (Figura 17).

Figura 17: Local de coleta dos RSU



A coleta foi realizada por meio de abertura de vala, com auxílio de retroescavadeira, atendendo aos seguintes critérios:

- A remoção da camada de cobertura de solo compactado até que a camada de RSU fosse alcançada (Figura 18a);
- Após inspeção, foram retirados os resíduos e colocados em caminhão basculante para posterior pesagem (Figura 18b).

Figura 18. (a) Escavação da camada de cobertura; (b) Remoção dos RSU escavados.



(a)

(b)

A camada de cobertura no local de escavação apresentava espessura de aproximadamente 1,2m de solo compactado. Foi verificada a presença de fragmentos

de rocha na camada de cobertura durante a sua remoção. Foram extraídos 770 kg de resíduos da célula do Aterro sanitário.

Os RSU retirados foram levados a um galpão localizado no ASCG, e depois quarteados (Figura 19) com auxílio de retroescavadeira. Após o quarteamento, os 590,2kg de resíduos restantes foram cobertos com uma lona por 24h. Após esse período deu-se início à caracterização gravimétrica.

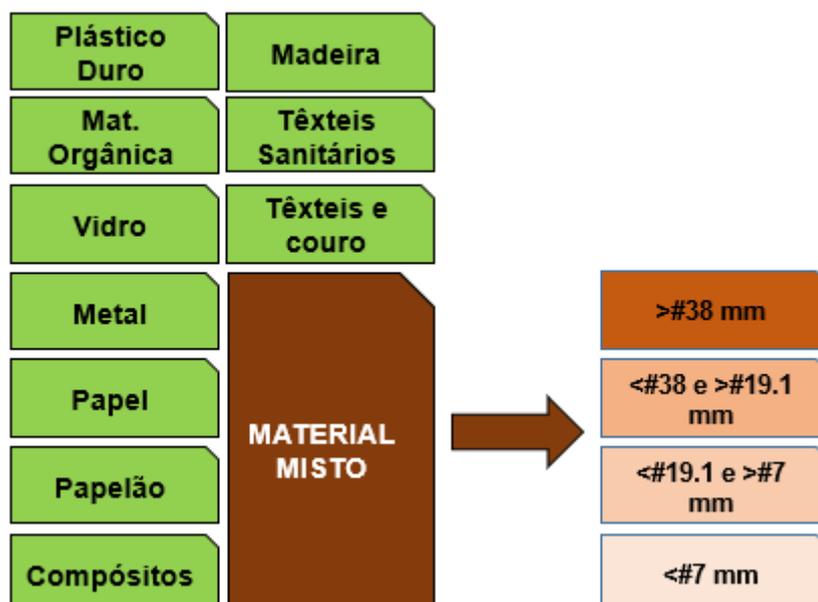
Figura 19: Quarteamento dos RSU.



4.2.1. Composição Gravimétrica dos resíduos

A caracterização gravimétrica dos RSU foi realizada a partir de adaptações da GDA E1-7 (DGGT, 1994), que divide os resíduos nos grupos de materiais apresentados na Figura 20.

Figura 20: Classificação dos materiais que compõem os RSU



O material misto corresponde à parcela de materiais de difícil identificação visual. Esse material é caracterizado pela granulometria, apresentando 4 subdivisões: componentes com dimensões maiores que 40mm, dimensões menores que 40mm e maiores que 20mm, dimensões menores que 20mm e maiores que 8 mm e componentes com dimensões menores que 8mm.

Nessa pesquisa, como forma de adaptação à norma, foram utilizadas peneiras com malhas equivalentes a 38, 19,1 e 7mm em substituição ao proposto pela GDA E1-7 (DGGT, 1994).

4.2.2. Peso específico dos RSU

A determinação do peso específico foi realizada por meio de substituição de volume por água, no mesmo local em que foram escavados os resíduos para a composição gravimétrica. Na cava de onde foram retirados os resíduos estudados foi revestida uma lona de forma a cobrir e acomodar os cantos do interior da vala (Figura 21a). O nível máximo dos resíduos da cava foi demarcado com fitas para delimitar o limite máximo de água a ser inserido em seu interior.

Figura 21. (a) Acomodação da lona na cava; (b) Preenchimento da cava com água.



O preenchimento da cava foi realizado com emprego de dois recipientes previamente calibrados, com capacidade de 60 litros cada. Realizou-se o preenchimento desses recipientes com água (Figura 21b) e em seguida foram despejados no interior da cava, até que atingissem as marcações de altura predeterminadas, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22: Cava preenchida até o nível de resíduos coletados.

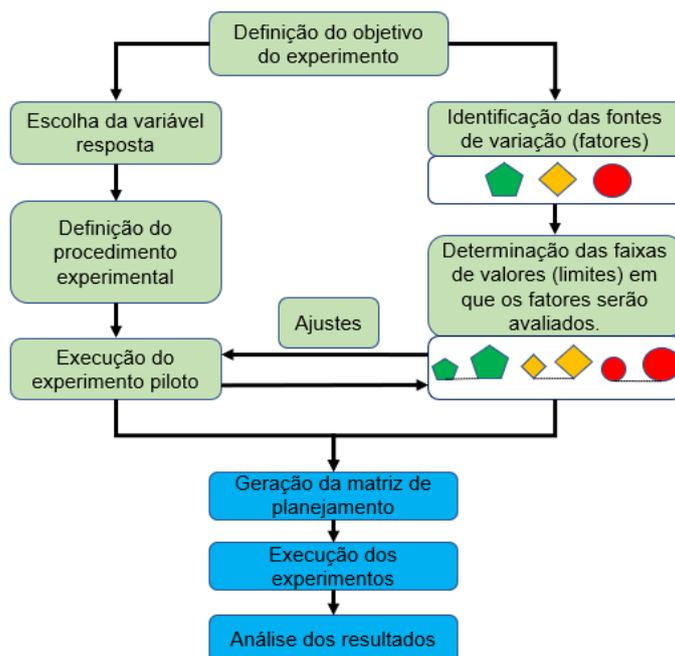


A determinação do peso específico foi realizada pela contagem da quantidade de recipientes necessários ao preenchimento da vala. Após o procedimento, antes do seu fechamento, a manta foi removida e a água presente na vala escoou para o interior do aterro de forma rápida.

4.3. Planejamento fatorial do ensaio de cisalhamento direto dos resíduos

Para realizar o planejamento fatorial, foram seguidas as etapas descritas na Figura 23. As análises dos resultados foram realizadas por meio do software STATISTICA 10 ®.

Figura 23: Planejamento experimental.



Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012) e Dean, Voss e Draguljic (2017)

Foi definido como variável dependente desse estudo, a resistência ao cisalhamento de RSU com idade de aterramento de um ano. A resistência ao cisalhamento teve como variáveis independentes escolhidas a tensão normal aplicada, e umidade e peso específico dos resíduos. O procedimento experimental adotado foi o ensaio de cisalhamento direto.

O delineamento experimental utilizado foi o delineamento composto com pontos centrais (DCC), no qual a quantidade de ensaios realizada foi definida pela Equação 1.

$$n = a^k + Pc \quad (1)$$

Onde:

n = número de ensaios para o planejamento;

a = número de níveis estudados;

k = número de fatores;

Pc = número de pontos centrais.

O planejamento fatorial apresentou dois níveis e três fatores com três pontos centrais (C). Ao total, foram determinados 11 ensaios, no entanto, o experimento foi replicado na condição inundada, utilizando os mesmos fatores e limites apresentados nas Tabelas 1 e 2. Sendo assim, foram programados ao todo 22 ensaios de cisalhamento direto.

Os fatores e níveis propostos, estão apresentados na Tabela 1. Os limites inferiores (-1) e superiores (+1) compreendem as faixas experimentais de valores mínimos e máximos, enquanto o ponto central (0) corresponde ao valor médio dos limites.

Tabela 1: Delineamento da pesquisa com fatores e níveis propostos

Variáveis	Nível		
	-1	0	1
Peso específico (kN/m ³)	10	12,5	15
Teor de umidade (%)	34	49,5	65
Tensão Normal (kPa)	50	175	300

Tabela 2: Matriz de planejamento para obtenção dos resultados de tensão de cisalhamento dos RSU.

Experimento	Peso específico (kN/m³)	Teor de umidade (%)	Tensão normal (kPa)	Tensão de cisalhamento (kPa)
1	10	34	50	R1
2	15	34	50	R2
3	10	65	50	R3
4	15	65	50	R4
5	10	34	300	R5
6	15	34	300	R6
7	10	65	300	R7
8	15	65	300	R8
9 (C)*	12,5	49,5	175	R9
10 (C)*	12,5	49,5	175	R10
11 (C)*	12,5	49,5	175	R11

*Pontos centrais

Os níveis determinados para a variação do peso específico foram baseados por valores verificados na literatura, como os levantamentos realizados por Choudhury e Savoikar (2009) e Ramaiah, Ramana e Datta (2017), que apresentaram nos intervalos entre 5 e 10 kN/m³ e 10 e 15 kN/m³ a maior parte dos dados observados.

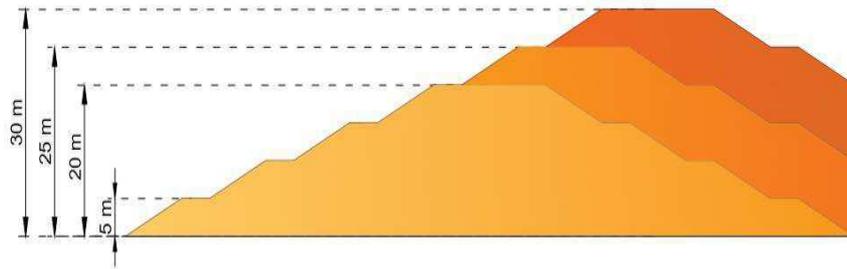
A princípio, seria adotado como limite inferior ao valor de 5 kN/m³ para a variável peso específico. No entanto, durante os ensaios teste, esse limite demonstrou ser inviável para tensões normais mais elevadas (300kPa), e, portanto, decidiu-se utilizar como limite inferior 10 kN/m³ e limite superior 15 kN/m³, tendo como ponto central 12,5 kN/m³.

Os níveis determinados para a variação do teor de umidade dos resíduos foram definidos a partir de um estudo realizado por Ribeiro (2012), que analisou durante o período de um ano a variação de umidade de uma célula experimental de aterro sanitário localizada no município de Campina Grande. Em estudo, a autora constatou que as médias dos valores mínimos e máximos do teor de umidade dos resíduos aterrados foram de 34 e 65%, respectivamente.

A escolha dos limites de teor de umidade dos resíduos se dá em função do estudo de Ribeiro (2012) ser situado na mesma região geográfica, o que compactua com a premissa geral do presente estudo, de que as análises de resistência sejam realizadas respeitando ao máximo as características da área de estudo.

Para as tensões normais, foi primeiro estabelecido um cenário previsto para variação da altura do aterro, relacionado a sua operação, prevendo alturas de 5 e 30 m (Figura 24), que correspondem à altura da berma inferior e a altura total do aterro no final da operação.

Figura 24: Alturas correspondentes a cenários de construção durante operação do aterro sanitário



Os limites estabelecidos para tensão normal compreenderam um cenário equivalente a 5 m e 30 m de altura do maciço sanitário, considerando um peso específico de 10 kN/m^3 , que segundo Zekkos (2006) e Boscov (2008) corresponde ao valor médio do peso específico aparente para resíduos coletados na superfície.

A tensão cisalhante (variável resposta) foi selecionada pela deformação horizontal de 10%, conforme sugerido por Stark, Huvaj-Sarihan e Li (2009) e Eid et al. (2000).

4.4. Ensaio de cisalhamento direto dos resíduos

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com adaptações da norma D3080 (ASTM, 2011) em razão da natureza do material analisado e da diferença de tamanho entre os componentes dos RSU e o solo. O equipamento utilizado foi a prensa de cisalhamento direto (Figura 25) convencional, utilizada para solos, fabricada pela ELE *International*.

Figura 25: Prensa de cisalhamento direto utilizada na pesquisa.



A tensão vertical foi aplicada por meio de pesos suspensos. As leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram realizadas através de extensômetros com sensibilidade de $0,00125 \text{ cm}$ e $0,00254 \text{ cm}$. As leituras da força horizontal foram

realizadas por meio de um anel dinamométrico de constante igual a 0,154 kgf/div e capacidade de carga de 184,8 kgf.

A velocidade do ensaio foi definida como a menor velocidade disponível no equipamento, para que fosse garantida a condição drenada do cisalhamento. Dessa forma, a velocidade de cisalhamento dos ensaios foi de 0,3 mm/min.

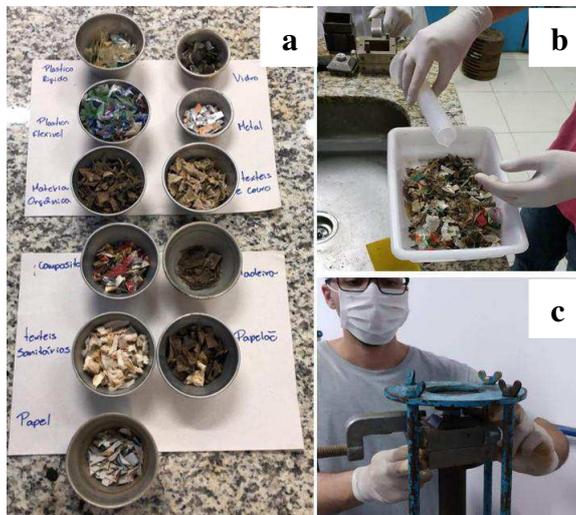
4.4.1. Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios, os RSU coletados passaram por um processo de picotagem para redução do tamanho de seus componentes (Figura 26a). Após a picotagem, cada material constituinte dos RSU foi adicionado à amostra conforme a composição gravimétrica obtida em campo, dessa forma, foi possível obter a representatividade necessária do material coletado segundo a sua composição. O peso específico de cada amostra foi controlado por meio da massa de resíduos em relação ao volume da caixa de cisalhamento (136,8 cm³). A umidade das amostras foi controlada por meio da massa de resíduos, em acréscimo à umidade natural das amostras.

A preparação da amostra foi realizada de acordo com a seguinte metodologia:

- Os RSU que compõem a amostra são pesados de acordo com o seu percentual gravimétrico, teor de umidade e o peso específico, definidos para cada ensaio no planejamento fatorial;
- Os resíduos picotados são misturados em um recipiente à parte (Figura 26b). No cálculo da umidade dos resíduos é considerada a umidade natural já existente na amostra, de onde é acrescentada água para chegar à umidade necessária para o ensaio, segundo o planejamento fatorial.
- Após a mistura, os resíduos são colocados no interior da caixa bipartida do equipamento de cisalhamento direto e compactados estaticamente com auxílio de um extrator de amostras (Figura 26c) para que haja a sua acomodação no interior da caixa. Todas as amostras são compactadas até uma determinada altura da caixa de cisalhamento, necessária para manter o volume das amostras constante.

Figura 26: (a) Materiais picotados separados por categoria; (b) Homogeneização e acréscimo de umidade dos resíduos preparados; (c) compactação dos resíduos na caixa de cisalhamento.



Após a preparação do corpo de prova, a caixa bipartida era levada ao equipamento de cisalhamento direto para ser iniciado o ensaio.

4.4.2. Execução do ensaio de cisalhamento direto

Foram realizados ao todo 22 ensaios de cisalhamento direto para o estudo, dos quais 11 ensaios foram realizados sob condição não inundada e 11 sob condição inundada. Os ensaios foram montados de forma a obter a variável resposta (tensão de cisalhamento) por meio da interação entre os fatores propostos (peso específico, teor de umidade e tensão normal).

Após a preparação do corpo de prova, com a caixa de cisalhamento já preparada, o procedimento era iniciado com a aplicação da carga normal necessária ao ensaio, por um período de 5 minutos, após o qual se dava início ao ensaio de cisalhamento. Esse procedimento inicial foi adotado para padronizar os ensaios realizados.

Para os ensaios na condição inundada, foi utilizado como líquido imersor o ácido acético, ideal para a inibição de atividade biodegradativa. Após a preparação do corpo de prova a caixa bipartida era imersa no equipamento de cisalhamento direto (Figura 27), onde o ensaio era realizado após o acréscimo de uma carga de assentamento equivalente à 1/12 da carga estabelecida para o ensaio.

Essa carga de assentamento foi necessária após ter-se constatado, por meio dos testes realizados, um comportamento expansivo das amostras quando imersas em ácido acético, que dificultava a realização do ensaio. Dessa forma, a carga de assentamento era mantida durante todo o período de imersão das amostras, até o início

do ensaio. As amostras eram imersas por um período mínimo de 24 horas, tempo necessário para que o ácido acético permeasse a caixa de cisalhamento e fluísse pelos resíduos.

Figura 27: Caixa bipartida imersa em ácido acético.

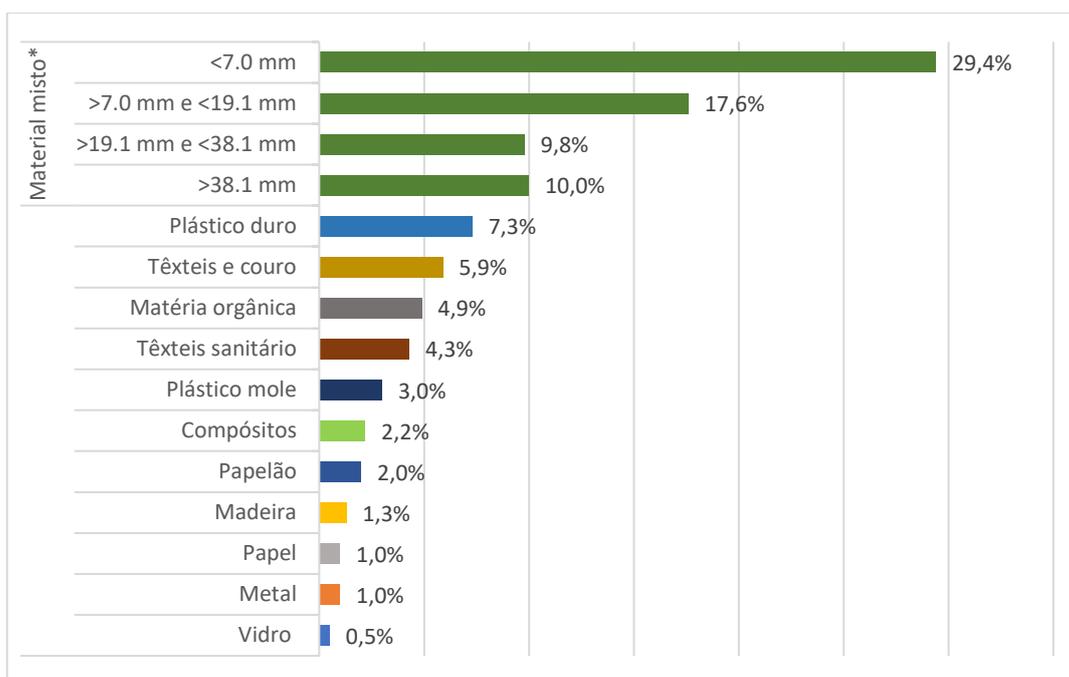


5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Composição gravimétrica dos resíduos

Os resíduos com um ano de aterramento coletados no ASCG apresentaram a composição gravimétrica descrita na Figura 28.

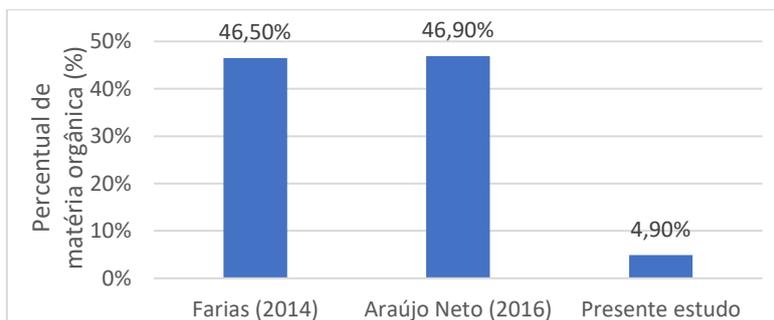
Figura 28: Composição gravimétrica dos RSU.



*valores referentes ao diâmetro da peneira usada na segregação

De acordo com a Figura 28, percebe-se que a maior parte dos resíduos é composta de material misto (66,7%), e dentre esses materiais o maior percentual se concentra na fração mais fina (<#7,0 mm). O baixo percentual de matéria orgânica presente na composição (aproximadamente 5%), quando comparado ao valor atribuído a resíduos frescos da cidade de Campina Grande (Figura 29), apresentado por Araújo Neto (2016) e Farias (2014), é um indicativo de que cerca de 40% desse material tenha sido degradado durante o período de aterramento.

Figura 29: Comparação entre os valores coletados de matéria orgânica em RSU para o município de Campina Grande e a amostra do ASCG

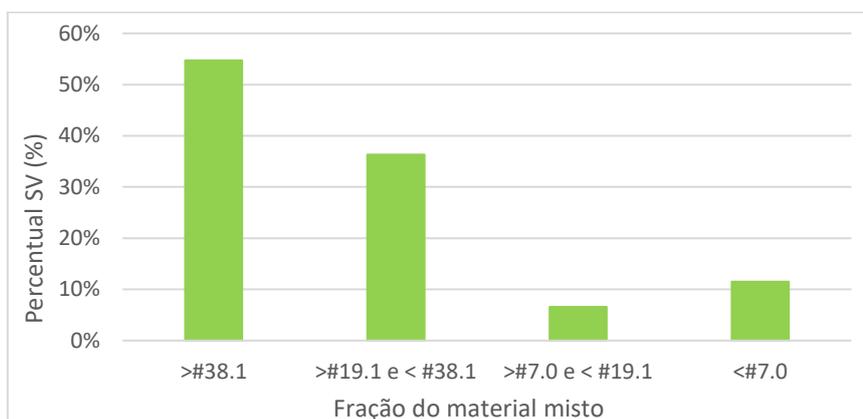


Fonte: Adaptado de Farias (2014) e Araújo Neto (2016)

Existe a possibilidade de que o elevado percentual de material misto provavelmente seja decorrente da presença de solo no material coletado, presente na camada intermediária para evitar a proliferação de vetores nos resíduos do aterro, o que contribui para que também não haja a identificação e segregação dos resíduos que compõem esse material durante a composição gravimétrica. Ao analisar visualmente porções desse material, percebe-se a presença de matéria orgânica putrescível, plásticos e outros componentes inertes, como o vidro e o próprio solo.

A partir da análise de sólidos voláteis (SV), foi possível inferir indiretamente a quantidade de material orgânico presente no material misto, descrito na Figura 30.

Figura 30: Percentual de sólidos voláteis presente nas frações do material misto



A fração de material misto de maior dimensão (>#38.0) apresentou a maior quantidade de sólidos voláteis, o que indica que parte da matéria orgânica ainda esteja presente nessa fração. Os menores percentuais de SV encontrados para as menores frações do material misto confirmam que esse material seja majoritariamente composto por matéria inerte, em sua maioria solo e pedregulho. Pelas análises do material misto, e levando em consideração os resultados de composições gravimétricas realizadas por

Farias (2015) e Araújo Neto (2016), subtende-se que, apesar da presença de matéria orgânica, grande parte desse material já tenha sido decomposto e convertido em subprodutos (gases e líquidos), o que a princípio, pode indicar a eficiência na degradação de compostos presentes no aterro sanitário.

5.2. Peso específico dos resíduos

O peso específico dos resíduos retirados do aterro sanitário foi de aproximadamente 19 kN/m^3 . Quando comparado a diversos estudos já realizados, percebe-se que, para um peso específico determinado próximo à superfície, o valor encontrado é superior aos valores já apresentados na Figura 2, compilados por Ramaiah, Ramana e Datta (2017). No entanto, resultados semelhantes de peso específico de RSU foram obtidos por Santos *et al.* (1998) no aterro controlado da Muribeca (19 kN/m^3) e Silveira (2004) para o aterro de Gramacho ($19,74 \text{ kN/m}^3$) e o aterro sanitário de Santo André ($19,54 \text{ kN/m}^3$).

Para o caso de Santos *et al.* (1998), os elevados valores de peso específico encontrados se justificaram pela presença de uma espessa camada de solo de cobertura e da alta energia de compactação empregada na operação do aterro sanitário. Segundo Silveira (2004), a presença de matacões e entulho nas amostras contribui decisivamente nos valores encontrados de peso específico.

O valor do peso específico obtido pode ser justificado em função da quantidade de material inerte, como solo e eventuais pedregulhos encontradas no RSU, que, por serem materiais de elevada massa específica, acabam por contribuir no aumento do peso específico. Outros fatores que podem explicar o elevado peso específico obtido neste trabalho são: a espessura da camada de cobertura de solo encontrada (cerca de 1,2 m), e o local de escavação, que ao ser situado em uma berma de tráfego de caminhões e maquinários, contribui para acelerar a consolidação dos RSU na área onde foi executado o ensaio, aumentando ainda mais o peso específico dos resíduos.

5.3. Resistência ao cisalhamento dos resíduos

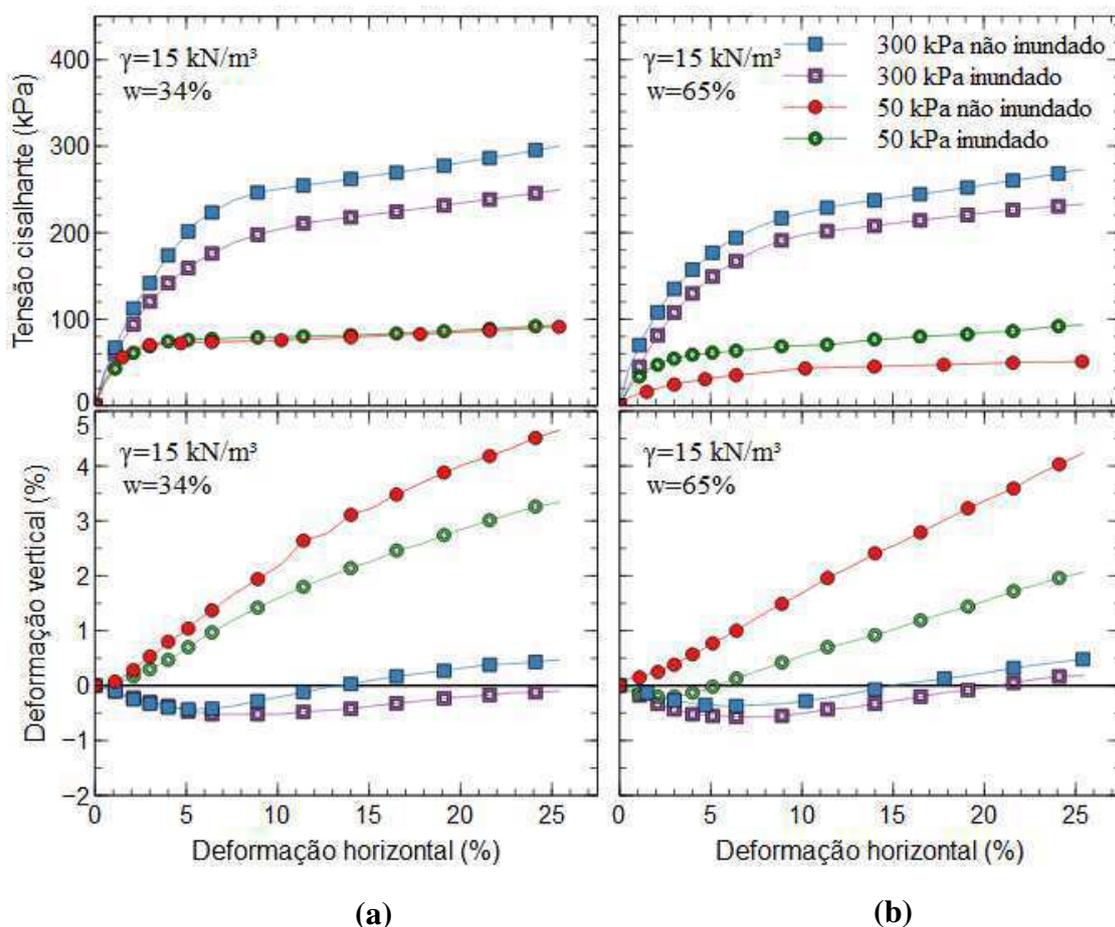
Serão apresentados resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados nas condições inundada e não inundada. Seguindo o planejamento fatorial, os resultados nas Figuras 31 e 32 estão agrupados pelo peso específico das amostras (10 e 15 kN/m^3), onde são apresentados em cada coluna os resultados com níveis de umidade das amostras de 34 e 65%.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 31 e 32, pode-se verificar que as amostras demonstraram comportamento de tensão cisalhante crescente sem tendência de pico, como já relatado por diversos estudos (GABR E VALERO (1995),

BAREITHER *et al.* (2012), REDDY *et al.* (2015), FENG *et al.* (2016), RAMAIAH, RAMANA e DATA, 2017). Esse comportamento mostrou-se independente da variação de umidade e peso específico dos resíduos, tornando-se mais evidente sob as maiores tensões normais aplicadas (175 e 300 kPa).

Quanto à variação de volume, foi constatado comportamento expansivo em amostras de RSU com peso específico de 15 kN/m^3 (Figura 31a e 31b) submetidas à menor tensão normal (50 kPa), independentemente da umidade dos resíduos (34% ou 65%). Nos ensaios realizados em amostras com peso específico de 10 kN/m^3 (Figura 32a) observou-se uma leve compressão inicial, seguida de expansão apenas para as amostras com menor umidade (34%). Já para a amostra de maior umidade (65%), apresentada na Figura 32b, apenas o comportamento compressivo foi observado.

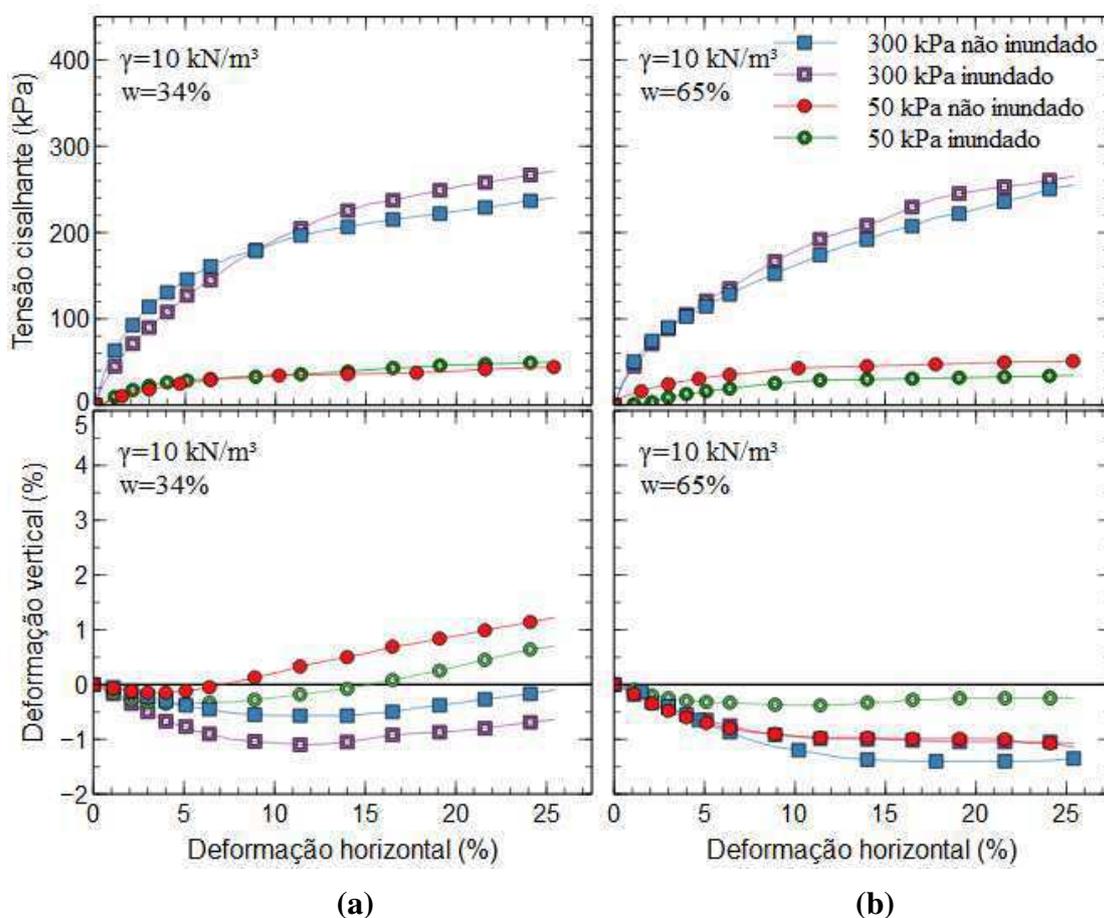
Figura 31: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto de RSU inundados e não inundados para amostras com peso específico (γ) de 15 kN/m^3 : a) amostras com umidade (w) de 34%; b) amostras com umidade (w) de 65%



Pelos resultados expostos nas Figuras 31 e 32, é possível sugerir que o peso específico tenha influência no comportamento expansivo das amostras, uma vez que a expansividade diminuiu à medida que o peso específico inicial reduziu. As amostras,

quando submetidas a baixas tensões normais (50 kPa), tendem a realocar os seus componentes no interior da caixa de cisalhamento, permitindo a expansão, similar ao que acontece em solos arenosos bem compactados. No entanto, maiores tensões normais (300 kPa) impossibilitam a expansão da amostra pois, diferentemente do comportamento de solos arenosos, os RSU são compostos de materiais de maior compressibilidade, que limitam essa condição expansiva à baixas tensões.

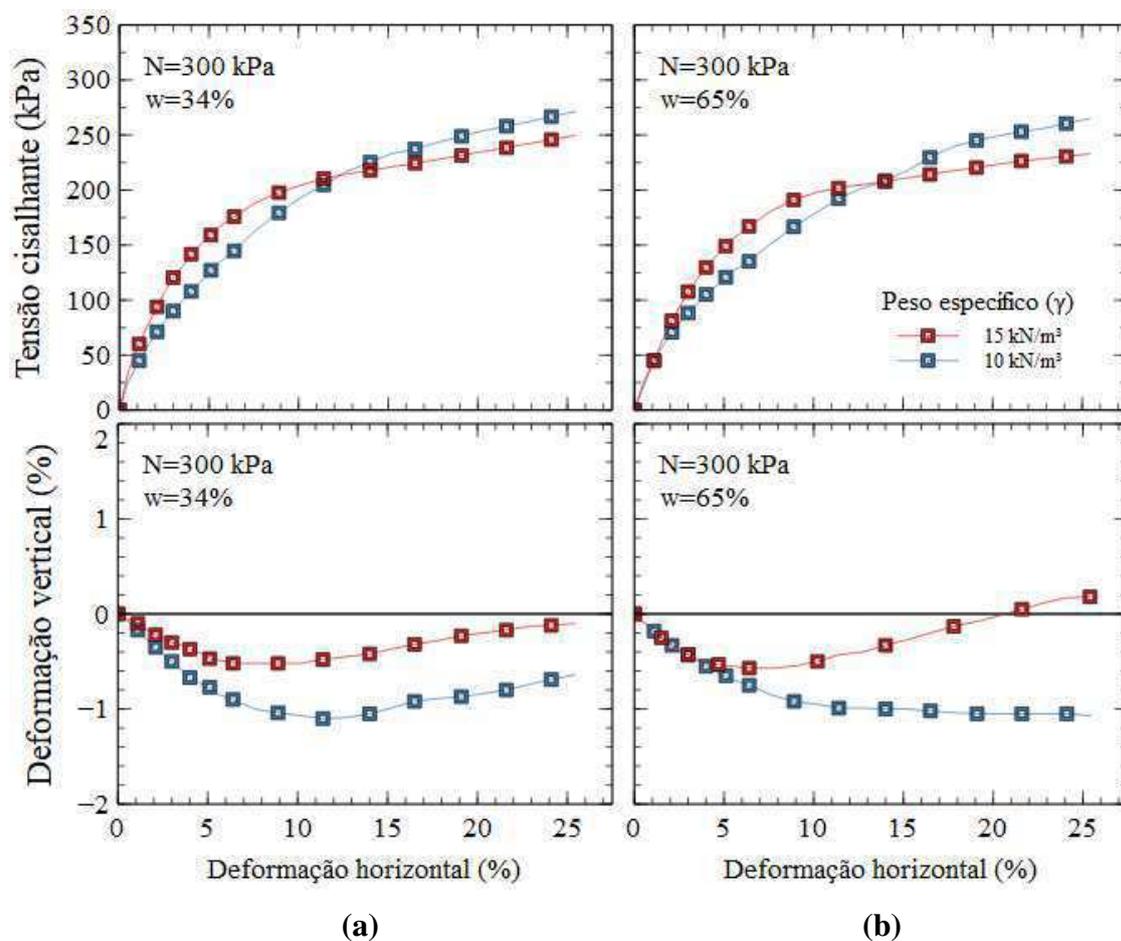
Figura 32: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto de RSU inundados e não inundados para amostras com peso específico (γ) de 10 kN/m³: a) amostras com umidade (w) de 34%; b) amostras com umidade (w) de 65%



Ao comparar as amostras de menor peso específico (10 kN/m³), apresentadas na Figura 32, não é possível perceber diferença significativa entre as curvas tensão x deformação para os casos inundado e não inundado, que apresentaram valores muito próximos, embora as amostras inundadas no final do ensaio tenham apresentado maiores valores de tensão cisalhante. No que diz respeito à deformação vertical, verifica-se que as amostras inundadas tendem a apresentar menores valores de expansão que as amostras não inundadas, no entanto, esse comportamento não é verificado nas amostras quando a umidade do resíduo é de 65%.

Ao término dos ensaios inundados realizados sob a tensão normal de 300 kPa (Figura 33), as amostras de menor peso específico (10 kN/m^3) alcançaram valores de tensão cisalhante máxima maiores que as amostras de maior peso específico (15 kN/m^3). Esse comportamento não foi registrado para os ensaios não inundados, indicando que o processo de inundação das amostras tenha influência no comportamento da curva tensão x deformação.

Figura 33: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto de RSU inundados com tensão normal (N) de 300 kPa: a) amostras com umidade de 34%; b) amostras com umidade de 65%



O comportamento de maiores tensões cisalhantes descrito na Figura 33 pode ser explicado pelo fato das amostras de menor peso específico (10 kN/m^3) sofrerem maiores deformações, durante todo o ensaio, além de apresentarem deformações superiores na fase de carregamento, após a aplicação da carga de 300 kPa. Essa deformação vertical dos corpos de prova foi suficiente para proporcionar um aumento do peso específico.

5.4. Planejamento fatorial e análise estatística dos dados

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento dos RSU para as condições não inundada e inundada. O planejamento fatorial forneceu 11 resultados para cada condição de ensaio. Esses resultados foram selecionados de acordo com a tensão cisalhante correspondente à deformação horizontal de 10%, conforme sugerido por Stark, Huvaj-Sarihan e Li (2009) e Eid et al. (2000).

Tabela 3: Resultados de tensão cisalhante para cada experimento

Experimento	Fatores			Tensão cisalhante (kPa)	
	Tensão Normal (kPa)	Peso Específico (kN/m ³)	Umidade (%)	Não inundado	Inundado
1	300	15	65	223,32	198,08
2	300	10	65	163,32	179,99
3	300	10	34	189,51	193,8
4	300	15	34	250,93	204,75
5	50	15	34	75,7	79,52
6	50	10	65	42,85	27,14
7	50	15	65	79,04	69,52
8	50	10	34	34,28	35,23
9 (C)*	175	12,5	49,5	136,65	130,46
10 (C)*	175	12,5	49,5	142,84	127,13
11 (C)*	175	12,5	49,5	128,56	112,85

*Pontos centrais

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados (Figuras 34 e 35) mostra a importância e magnitude relativa dos efeitos de cada fator analisado no resultado obtido de tensão cisalhante. É possível constatar, para um nível de significância de 5%, que a tensão normal e o peso específico exercem maior influência sobre os resultados de tensão cisalhante para as condições não inundada e inundada de ensaio. Sendo assim, é possível dizer que esses dois fatores são significativos para o processo.

Figura 34: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial não inundado

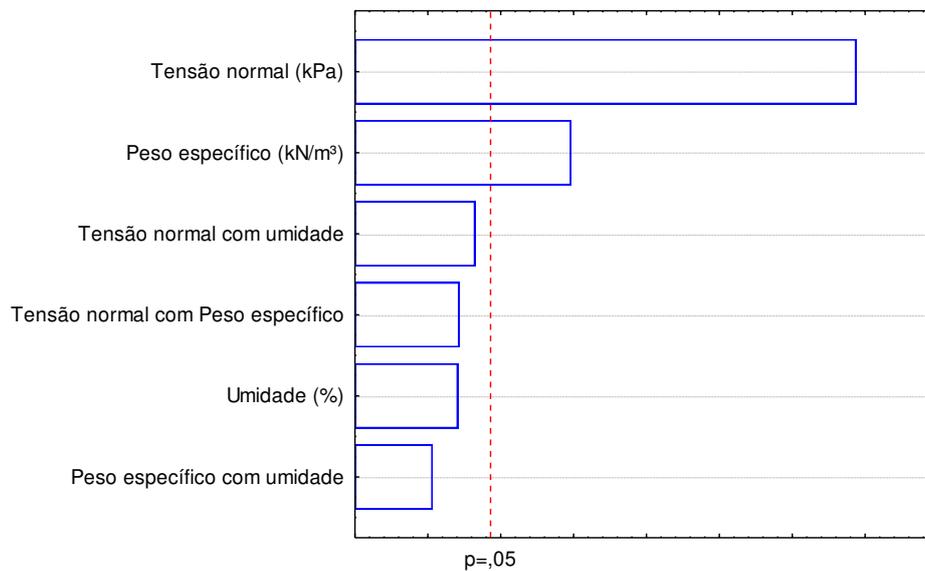
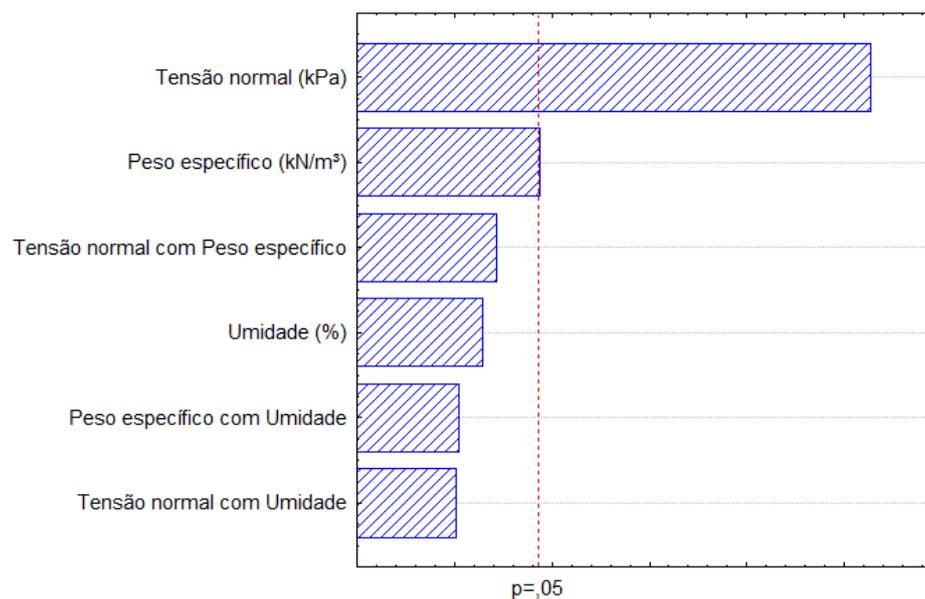


Figura 35: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial inundado



A Tabela 4 apresenta os p-valores obtidos por meio da análise de variância (Anova) realizada para os resultados dos planejamentos fatoriais inundado e não inundado. O coeficiente de determinação (R^2) do modelo não inundado foi de 0,997 para um nível de significância de 5%, indicando que 99,7% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado. Como o p-valor observado para a tensão normal e peso específico foi menor que o nível de significância (0,05), pode-se inferir que esses fatores afetam significativamente a resposta tensão cisalhante.

Tabela 4: P-valor para modelo do planejamento fatorial não inundado e inundado

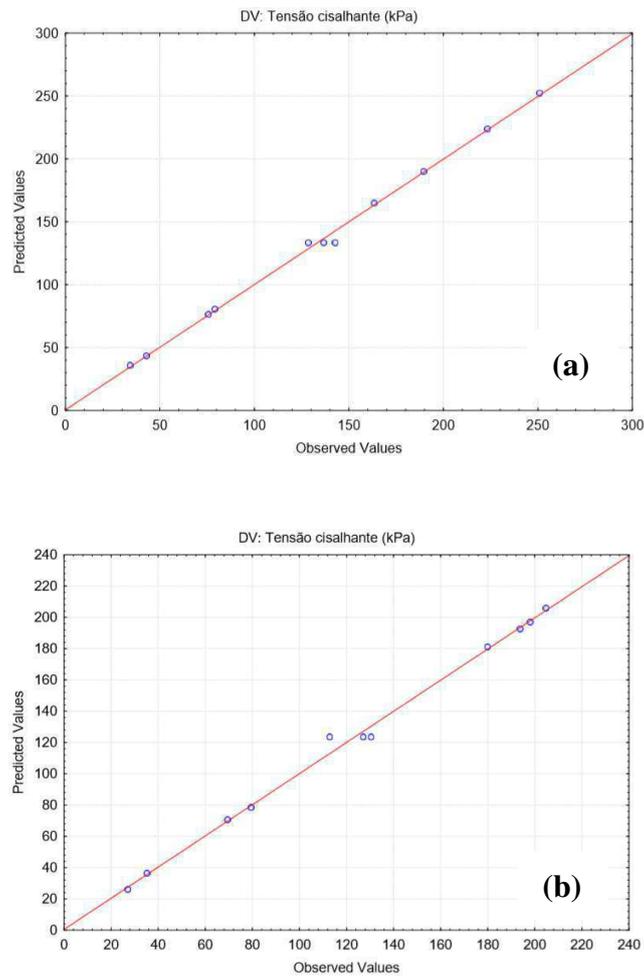
Fator	Grau de liberdade	p-valor	
		Não inundado	Inundado
Tensão normal (kPa)	1	0,001156	0,002185
Peso específico (kN/m ³)	1	0,010198	0,048520
Umidade (%)	1	0,174533	0,282282
Tensão normal com peso específico	1	0,163023	0,161299
Tensão normal com umidade	1	0,083311	0,936262
Peso específico com umidade	1	0,773855	0,861584
Falta de ajuste	2	0,768767	0,944737

O coeficiente de determinação (R^2) do modelo inundado foi de 0,995 para um nível de significância de 5%, indicando que 99,5% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado. Como o p-valor observado para a tensão normal e peso específico foi menor que o nível de significância (0,05) pode-se inferir que esses fatores afetam significativamente a resposta tensão cisalhante.

Para avaliar a adequação do modelo gerado para cada caso, é preciso testar o quanto do erro presente nos resultados previstos é devido à falta de ajuste do modelo. O teste de “Falta de ajuste” indica se o modelo está ajustado ou não. Para isso, o p-valor deve ser maior que o nível de significância (0,05) para que a hipótese nula seja aceita, o que significa dizer que não existe falta de ajuste no modelo.

Para o caso da análise apresentada na Tabela 4, como não houve falta de ajuste, há a expectativa de que os modelos gerados expliquem a variação do processo. Os resultados apresentados na Figura 36 indicam a relação entre os dados preditos e os dados observados, confirmando o ajustamento dos modelos.

Figura 36: Resultados de Valores preditos x Valores observados para Resistência cisalhante em ensaios: a) não inundados; b) inundados



Nas Figura 37 e 38 estão apresentadas as superfícies de resposta obtidas para cada modelo do planejamento fatorial (não inundado e inundado), envolvendo as variáveis tensão normal e peso específico, com a umidade sendo fixada em 49,5% (ponto central).

Figura 37: Superfície de resposta do planejamento fatorial não inundado para tensão normal x peso específico

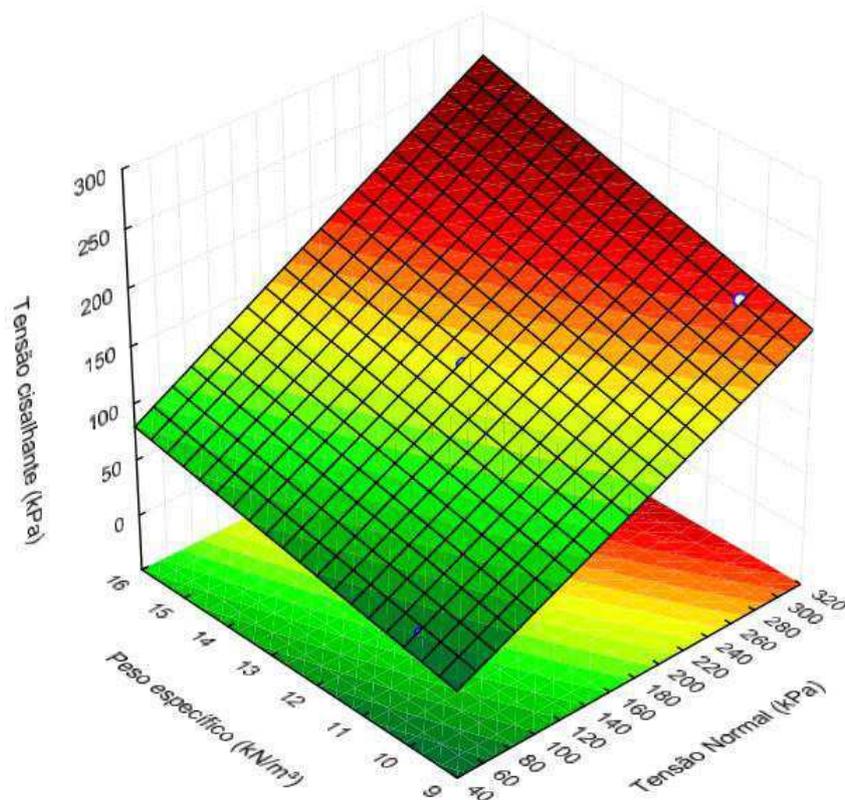
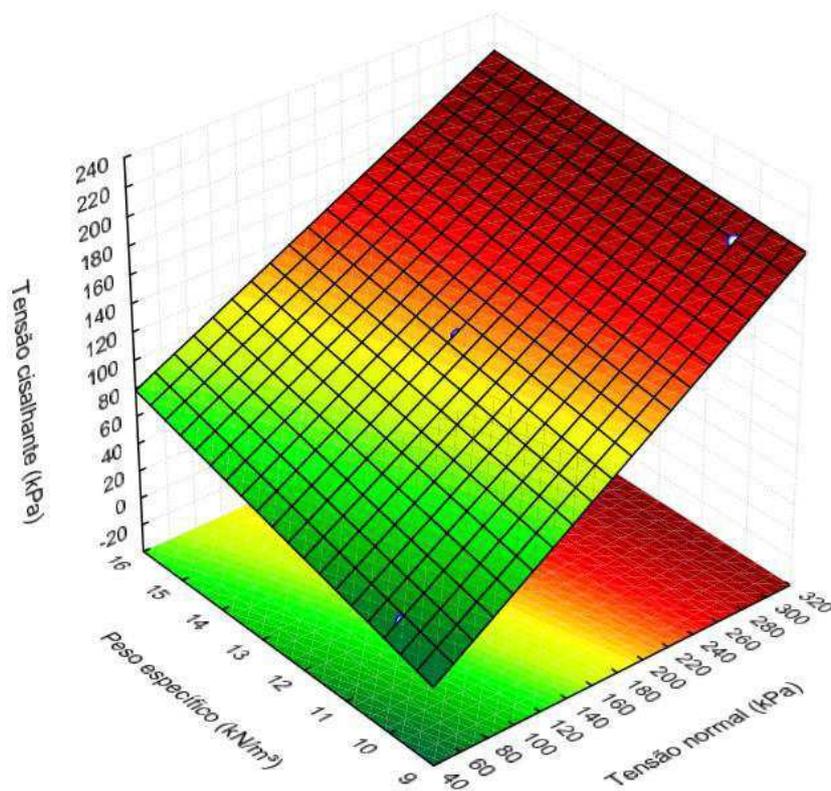


Figura 38: Superfície de resposta do planejamento fatorial inundado para tensão normal x peso específico



Verifica-se na Figura 37 que o aumento no nível dos fatores tensão normal e peso específico promove o aumento da tensão cisalhante. Percebe-se que embora ambos os fatores afetem a variável resposta de uma maneira aditiva, a tensão normal possui influência maior, como já observado na Figura 34 e na Tabela 4. Sob os níveis mínimos e máximos de peso específico (10 e 15kN/m³) é possível notar a evolução da tensão cisalhante com a variação da tensão normal. Essa evolução também é observada quando variado o peso específico sob os níveis mínimos e máximos da tensão normal (50 e 300kPa). Os resultados obtidos confirmam a pequena influência do peso específico dos RSU na resistência ao cisalhamento, já observada por BRAY *et al.* (2009), BAREITHER *et al.* (2012) e FENG *et al.* (2016).

Para o caso do ensaio inundado (Figura 38), observa-se que ambos os fatores apresentam influência na variável resposta de uma maneira aditiva, com maior participação da tensão normal. O aumento da tensão cisalhante não ocorre na mesma intensidade quando a variação de peso específico é verificada nos níveis mínimos e máximos da tensão normal (50 e 300 kPa), mostrando que o peso específico tem sua influência reduzida quando a amostra é saturada e submetida a maiores tensões normais, como já observado nas Figura 32 e 33.

No ASCG, conforme já relatado por Gurjão *et al.* (2019) é comum a presença de níveis de líquidos acima do recomendado. Embora seja possível assumir uma tendência consistente de aumento do peso específico com a profundidade em aterros sanitários (KAVANZANJIAN *et al.*, 1995; ZEKOS *et al.*, 2006), a saturação pode reduzir a contribuição da parcela de resistência atribuída ao peso específico, conforme observado nos resultados expostos nas Figuras 37 e 38. Logo, em maiores profundidades pode ocorrer a redução da resistência ao cisalhamento, em decorrência da saturação das camadas mais baixas.

Nas Figuras 39 e 40 estão apresentadas as superfícies de resposta para o as variáveis tensão normal e umidade, tendo como peso específico o valor fixado em 12,5 kN/m³ (ponto central).

Figura 39: Superfície de resposta para tensão normal x umidade (não inundado)

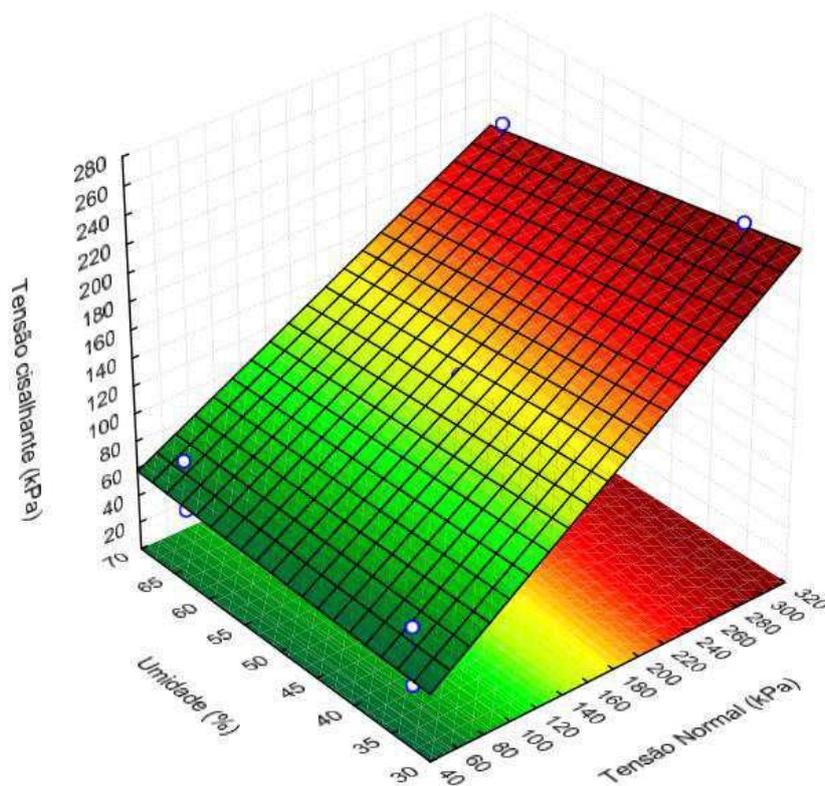
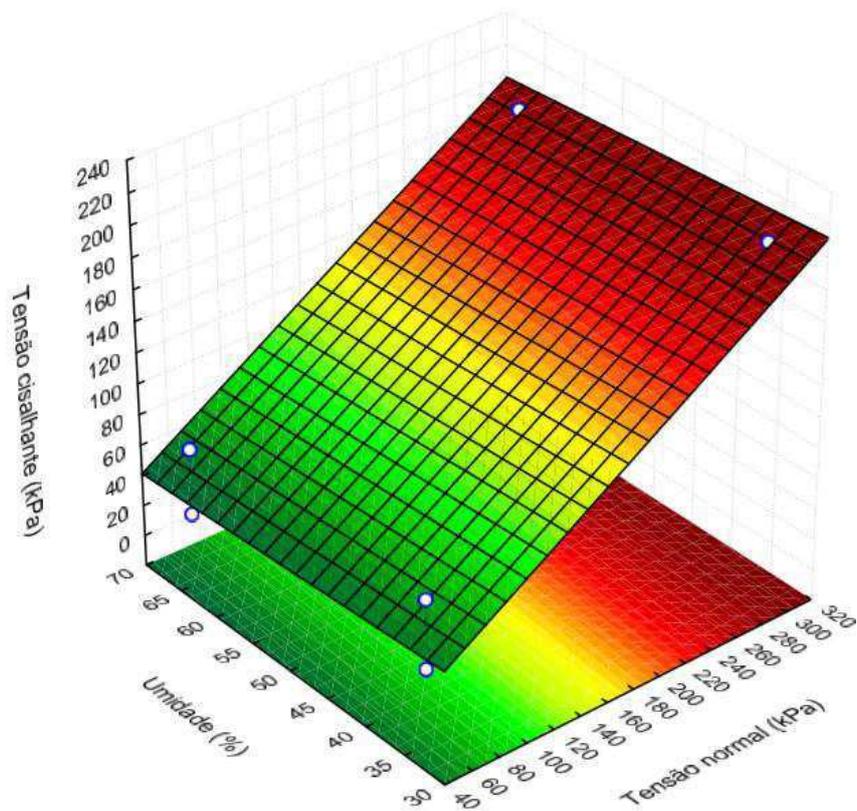


Figura 40: Superfície de resposta para tensão normal x umidade (inundado)



A partir dos modelos apresentados nas Figuras 39 e 40, percebe-se a influência da tensão normal na tensão cisalhante, como já observado nas superfícies resposta apresentadas nas Figuras 37 e 38. A variação da umidade no resíduo, além de não promover alterações significativas na variável resposta, possui efeitos distintos quando submetida às tensões mínimas (50kPa) e máximas (300kPa), corroborando com a análise de variância da Tabela 4, quanto à influência da umidade no processo.

Nas Figuras 41 e 42 estão apresentadas as superfícies de resposta para as variáveis peso específico e umidade, com a tensão normal fixada em 175 kPa (ponto central).

Figura 41: Superfície de resposta para peso específico x umidade (não inundado)

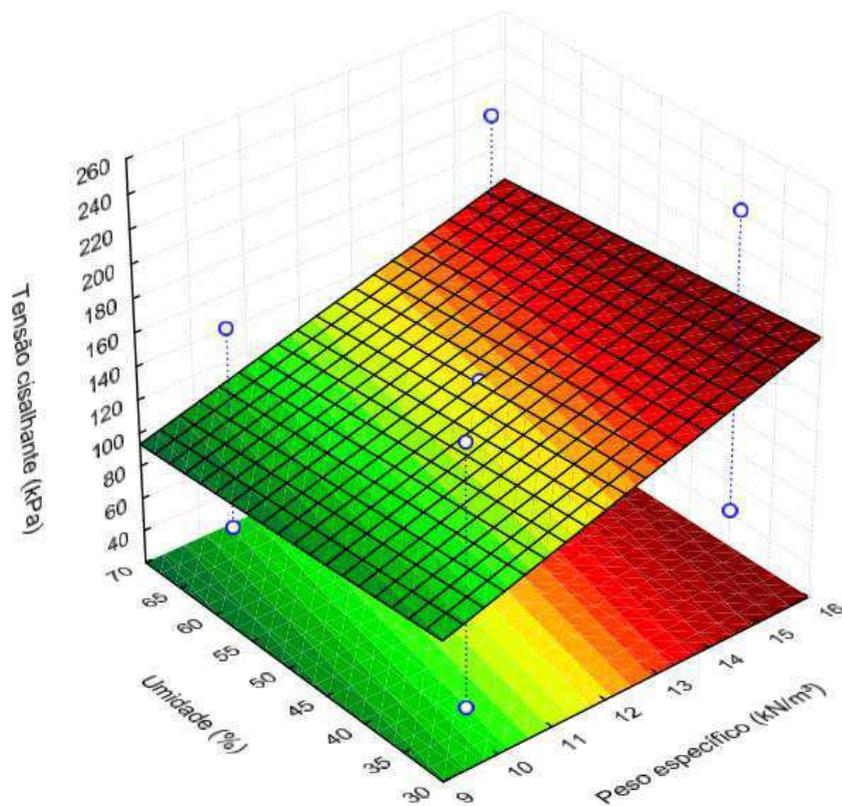
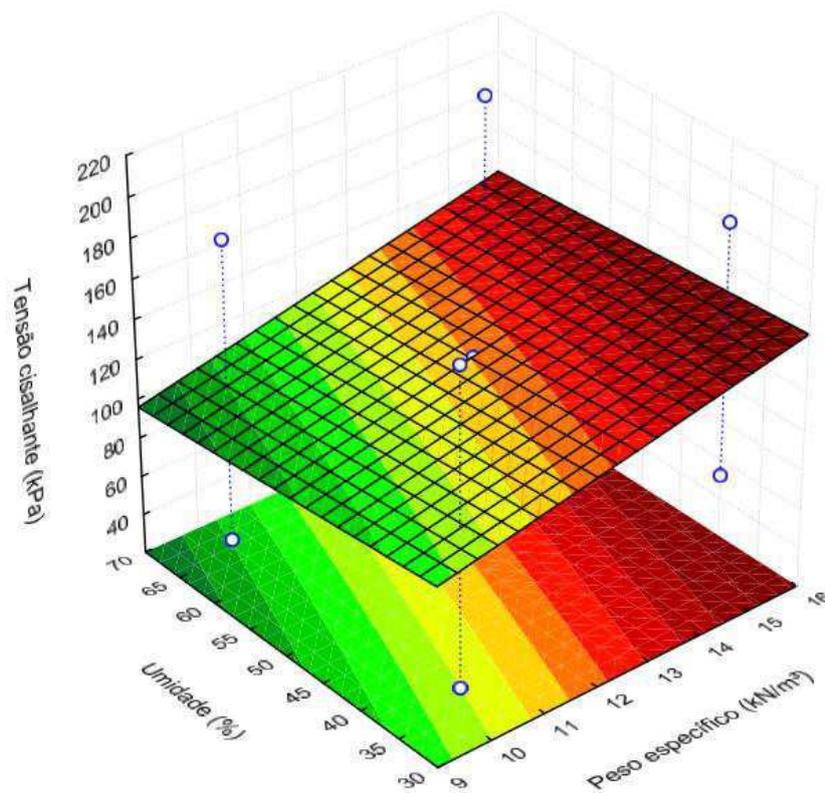


Figura 42: Superfície de resposta para peso específico x umidade (inundado)



Nas superfícies resposta apresentadas nas Figuras 41 e 42 é possível perceber que os maiores valores de tensão cisalhante acontecem sob maiores níveis de peso específico e menores níveis de umidade do resíduo. De maneira análoga à superfície resposta apresentada na Figura 41, a variação dos níveis de peso específico da amostra influencia mais do que a variação do teor de umidade, embora que em menor intensidade, como é possível perceber pela inclinação dos planos das superfícies nas Figuras 41 e 42.

Como visto nas superfícies resposta já apresentadas, o teor de umidade possui menor influência nos modelos apresentados, o que se aproxima das análises de Bray *et al.* (2009), Reddy *et al.* (2009) e Bareither, Benson e Edil (2012) que não encontraram correlação entre o teor de umidade e os parâmetros de resistência de RSU.

Segundo Bray *et al.* (2009), percentuais de umidade de resíduos abaixo da capacidade de campo não são significativos para provocar tendência de alteração na resistência ao cisalhamento dos RSU, entretanto, condições de saturação, comuns a aterros que funcionam como biorreatores, são suficientes para gerar excesso de poropressão durante o cisalhamento, reduzindo a resistência. Apesar dos ensaios realizados nesse estudo serem drenados e não apresentaram a capacidade de permitir a formação de poropressões, percebe-se que a inundação dos corpos de prova provocou alterações nos valores de resistência ao cisalhamento.

5.4.1. Determinação das envoltórias de ruptura dos resíduos

De acordo com o que foi discutido na análise do planejamento fatorial, os fatores cujos efeitos são estatisticamente mais importantes são a tensão normal e o peso específico. Esses efeitos podem ser considerados nos modelos estatísticos gerados para determinar os valores de tensão cisalhante dos RSU para os casos específicos.

Entretanto, com a exclusão do fator umidade e demais interações de segunda ordem, o coeficiente de determinação (R^2) do modelo não inundado passou de 0,997 para 0,977, enquanto o R^2 do modelo inundado passou de 0,995 para 0,981. Apesar de ambos os modelos não apresentarem evidência de que haja falta de ajuste, a remoção do fator umidade e demais efeitos de segunda ordem provocou o efeito “sombra”, pois quando comparados aos valores apresentados na Tabela 4, nota-se que houve redução do coeficiente de determinação (R^2) e no p-valor da análise de Falta de ajuste, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5: P-valores dos modelos gerados sem a inclusão da umidade e demais interações de segunda ordem

Fator	Grau de liberdade	p-valor	
		Não inundado	Inundado
Tensão normal (kPa)	1	0,001156	0,002185
Peso específico (kN/m ³)	1	0,010198	0,04852
Falta de ajuste	6	0,246751	0,528042

A escolha do modelo estatístico de melhor ajuste aos dados experimentais foi realizada tendo como critério aquele que apresentasse maior poder preditivo. Por meio da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) foram comparadas as magnitudes dos erros gerados entre os dois modelos: Modelo 1 (com inclusão de todos os fatores e interações de segunda ordem) e Modelo 2 (sem inclusão da umidade e demais interações de segunda ordem). Os resultados do RMSE estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Escolha do modelo com melhor ajuste

Condição de ensaio	Não inundado		Inundado	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
Raiz do erro quadrático médio	3,48	10,17	4,10	8,48

Modelo 1: modelo gerado com a inclusão de todos os fatores e interações de segunda ordem

Modelo 2: modelo gerado sem a inclusão da umidade e demais e interações de segunda ordem

O RMSE é uma medida de precisão para comparar erros de previsão de diferentes modelos para um mesmo conjunto de dados. Quanto mais próximo de zero o

seu resultado, melhor o ajuste do modelo aos dados. Sendo assim, o modelo estatístico que teve o melhor ajuste foi o Modelo 1 para as duas condições de ensaio (inundada e não inundada).

As equações que descrevem os modelos resultantes do planejamento fatorial para os casos inundado e não inundado estão apresentadas nas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\tau = -90,1325 + 0,586 * \sigma + 7,9467 * \gamma + 0,6722 * w + 0,0175 * \sigma * \gamma - 0,0042 * \sigma * w - 0,0215 * \gamma * w \quad (2)$$

$$\tau = -73,6594 + 0,8610 * \sigma + 8,9845 * \gamma + 0,4950 * w + 0,0231 * \sigma * \gamma - 0,0002 * \sigma * w - 0,0169 * \gamma * w \quad (3)$$

Sendo:

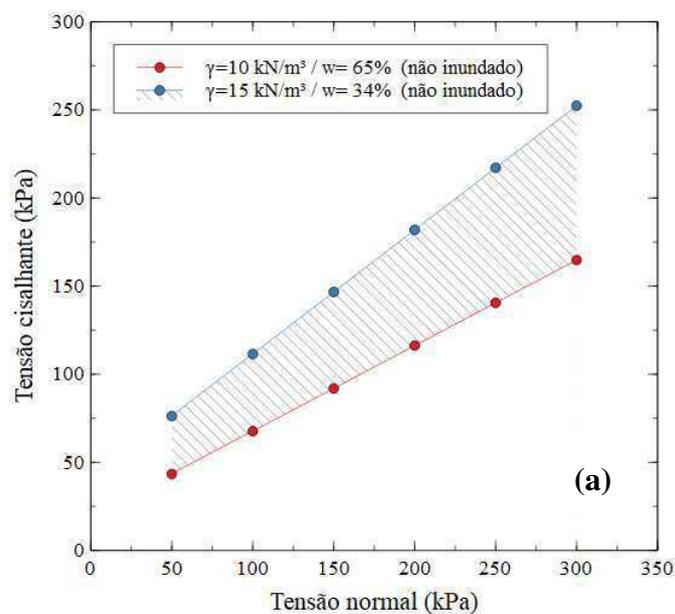
σ = Tensão Normal

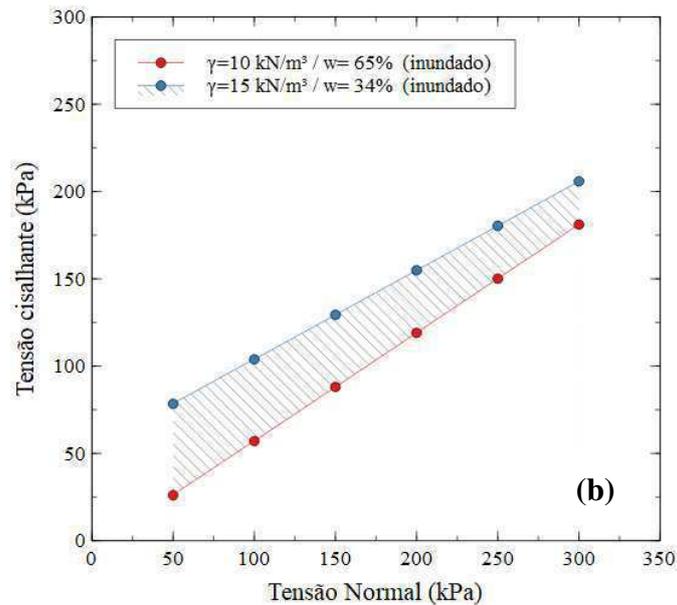
γ = Peso específico do resíduo

w = Umidade do resíduo

As Equações 2 e 3 apresentadas podem ser utilizadas para determinar a tensão cisalhante dos RSU entre os intervalos de 50 a 300 kPa de tensão normal aplicada, 10 a 15 kN/m³ do peso específico e 34 a 65% da umidade. A partir das equações propostas, foi possível obter as envoltórias de ruptura máxima e mínima para os casos inundado e não inundado, apresentadas na Figura 43.

Figura 43 Envoltórias de ruptura mínima e máxima para os casos: a) não inundado; b) inundado





Verifica-se na Figura 43 que a amplitude das envoltórias de resistência para o caso inundado é menor que a das amostras não inundadas. A inundação dos corpos de prova sob maiores tensões normais (300 kPa) diminuiu as tensões cisalhantes das amostras de maior peso específico (15 kN/m³), enquanto aumentou as tensões cisalhantes máximas das amostras de menor peso específico (10 kN/m³). Essa diferença de comportamento nos ensaios de inundação pode ser explicada pelo fato de que as amostras de menor peso específico apresentaram deformações verticais superiores durante a fase de carregamento de 300 kPa. Essas deformações foram suficientes para aumentar o peso específico das amostras durante o ensaio de cisalhamento.

Os parâmetros de resistência (c e ϕ) para cada combinação de umidade e peso específico dos resíduos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros de resistência

Condição de ensaio	Peso específico (kN/m ³)	Umidade (%)	ϕ (°)	c (kPa)
Não inundado	10	34	32	5
	10	65	26	19
	15	34	35	41
	15	65	30	52
Inundado	10	34	32	5
	10	65	32	0
	15	34	27	53
	15	65	27	45

Como pode ser visto na Tabela 7, nos modelos não saturados, amostras de menor umidade (34%) apresentaram uma variação positiva do ângulo de atrito (ϕ) e amostras de maior peso específico (15 kN/m^3) apresentaram aumento dos dois parâmetros de resistência (ϕ e c). Para as amostras inundadas, a umidade é inversamente proporcional enquanto o peso específico é diretamente proporcional no aumento da coesão.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7, a umidade e o peso específico dos resíduos possuem influência nos parâmetros de resistência de RSU aterrados. Tendo em vista a alteração do estado de umidade que os RSU se encontram no interior de um aterro sanitário, pode-se inferir que a resistência desses materiais seja variável em um curto espaço de tempo. Sendo assim, torna-se necessário o uso de faixas de envoltórias de ruptura para determinar a resistência de RSU em aterros sanitários.

6. CONCLUSÕES

- A técnica de aterramento altera a composição original dos resíduos, pois além da decomposição da matéria orgânica, ocorre entrada de material inerte, constituído por solo, comum à operação.
- Os modelos gerados foram significativos para a determinação da tensão cisalhante dos resíduos, levando em consideração a tensão normal aplicada, a umidade e peso específico dos resíduos.
- A variação da tensão normal aplicada, umidade e peso específico dos resíduos influenciou os parâmetros de resistência dos RSU aterrados. A tensão normal e o peso específico foram os fatores que mais exerceram influência sobre a tensão cisalhante das amostras estudadas, seguido da umidade e condição de inundação.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. E. S. **Investigação Geofísica e Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos de Diferentes Idades**. 2015. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 68, p. 263-274, 2017.

ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. **DOE simplified: practical tools for effective experimentation**. Productivity press, 2016.

ARAÚJO NETO, C. L. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão de deformações de aterros sanitários**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

ARAÚJO NETO, C. L.; GURJÃO, R. Í. L.; VIEIRA, E. M. S.; OLIVEIRA, J. K. L.; MONTEIRO, V. E. D. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos depositados no aterro sanitário em Campina Grande-PB. In: I Congresso internacional de meio ambiente e sociedade e III congresso internacional da diversidade do semiárido, 2019, Campina Grande. **Anais do I CONIMAS e III CONIDIS**. Campina Grande: Realize Editora, 2019. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/63363>. Acesso em 01/03/2020.

ASADI, M.; SHARIATMADARI, N.; KARIMPOUR-FARD, M.; NOORZAD, A. Validation of hyperbolic model by the results of triaxial and direct shear tests of municipal solid waste. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 35, n. 5, p. 2003-2015, 2017.

BAREITHER, C. A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Effects of waste composition and decomposition on the shear strength of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 138, n. 10, p. 1161-1174, 2012.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. Oficina de textos, 2008.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J.S.; HUNTER W.G. **Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery**. New York: John Wiley and sons, 2005.

BRAY, J. D.; ZEKOS, D.; KAVAZANJIAN JR. E.; ATHANASOPOULOS, G. A.; RIEMER, M. F. Shear strength of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 6, p. 709-722, 2009.

CHO, Y. M.; KO, J. H.; CHI, L.; Townsend, T. G. Food waste impact on municipal solid waste angle of internal friction. **Waste management**, v. 31, n. 1, p. 26-32, 2010.

CHOUDHURY, D.; SAVOIKAR, P. Simplified method to characterize municipal solid waste properties under seismic conditions. **Waste management**, v. 29, n. 2, p. 924-933, 2009.

DATTA, S.; FEI, X.; ZEKOS, D. Large-Scale Experimental Assessment of the Effect of Degradation on Shear Strength of Municipal Solid Waste from a Texas Landfill. In: **Geoenvironmental Practices and Sustainability**. Springer, Singapore, 2017. p. 13-19.

DEAN, A.; VOSS, D.; DRAGULJIC, D. Planning Experiments. In: **Design and Analysis of Experiments**. Springer, Cham, 2017. p. 7-30.

DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (1994). Empfehlungen der Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten". GDA E 1-7: Identifizierung und Beschreibung von Abfällen (Entwurf). Bautechnik 71, Helf 9, Berlin: Wilhelm Ernst e Sohn.

DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 3, p. 205-233, 2005.

EID, H. T.; STARK, T. D.; EVANS, W. D.; SHERRY, P. E. Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 5, p. 397-407, 2000.

FARIAS, R. M. de S. **Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem estatística e experimental**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

FEI, X.; ZEKKOS, D. Comparison of direct shear and simple shear responses of municipal solid waste in USA. **Environmental Geotechnics**, v. 5, n. 3, p. 158-167, 2017.

FENG, S. J.; GAO, K. W.; CHEN, Y. X.; LI, Y.; ZHANG, L. M.; CHEN, H. X. Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China. **Waste Management**, v. 63, p. 354-365, 2016.

FUCALE, S. P. (2005). **Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

GABR, M. A.; VALERO, S. N. Geotechnical properties of municipal solid waste. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. 2, p. 241-251, 1995.

GABR, M. A.; HOSSAIN, M. S.; & BARLAZ, M. A. Shear strength parameters of municipal solid waste with leachate recirculation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 4, p. 478-484, 2007.

GURJÃO, R. Í. L.; ARAÚJO NETO, C. L.; SILVA, J. H. G.; OLIVEIRA, J. K. L.; PAIVA, W. Análise de níveis de líquidos em um aterro sanitário do semiárido. Anais do 10^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 2019.

HOSSAIN, M. S.; HAQUE, M. A. The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills. **Waste management**, v. 29, n. 5, p. 1568-1576, 2009.

KARIMPOUR-FARD, M.; SHARIATMADARI, N.; KERAMATI, M.; JAFARI K. H. An experimental investigation on the mechanical behavior of MSW. **International Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 4, p. 292-303, 2013.

KAVAZANJIAN, E., MATASOVIC, N., BONAPARTE, R., & SCHMERTMANN, G. R. (1995). Evaluation of MSW properties for seismic analysis. In *Proceedings of the Specialty Conference on Geotechnical Practice in Waste Disposal. Part 1 (of 2)* (pp. 1126-1141). ASCE.

KERAMATI, M.; GOODARZI, S.; MOGHADAM, H. M.; RAMESH, A. Evaluating the stress–strain behavior of MSW with landfill aging. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 11, p. 6885-6894, 2019.

KÖLSCH, F. (1996). **The influence of fibrous constituents on shear strength of municipal solid waste**. Ph.D. thesis, Leichtweiss-Institut, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany.

LÜ, X.; ZHAI, X.; HUANG, M. Characterization of the constitutive behavior of municipal solid waste considering particle compressibility. **Waste Management**, v. 69, p. 3-12, 2017.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. Constitutive model for municipal solid waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 11, p. 940-951, 2002.

MACHADO S.L.; CARVALHO M.F.; NASCIMENTO J.C.F.; DOURADO K.A. Aging effect on MSW mechanical behaviour. In: **5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics: Proceedings of the ISSMGE's fifth international congress organized by the Geoenvironmental Research Centre, Cardiff University and held at Cardiff City Hall on 26–30th June 2006**. Thomas Telford Publishing, 2006. p. 1439-1446.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & sons, 2017.

PANDEY, R. K.; TIWARI, R. P. Physical characterization and geotechnical properties of municipal solid waste. **J. Mech Civil Eng**, v. 12, n. 1, p. 15-21, 2015.

PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y. Factors affecting the shear strength behavior of municipal solid wastes. **Waste Management**, v. 69, p. 215-224, 2017.

PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y. Compressibility and shear strength behaviour of fresh and aged municipal solid wastes. *Environmental Geotechnics*, p. 1-9, 2019.

RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V. Study of stress-strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing. **Waste management**, v. 63, p. 366-379, 2017.

RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V.; DATTA, M. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. **Waste Management**, v. 68, p. 275-291, 2017.

REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; PARAKALLA, N. S.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 952-959, 2008.

REDDY, K. R.; GANGATHULASI, J.; PARAKALLA, N. S.; HETTIARACHCHI, H.; BOGNER, J. E.; LAGIER, T. Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. **Waste Management & Research**, v. 27, n. 6, p. 578-587, 2009.

REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; GIRI, R. K.; GANGATHULASI, J. Effects of degradation on geotechnical properties of municipal solid waste from Orchard Hills Landfill, USA. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 1, n. 3, p. 24, 2015.

RIBEIRO, L. S. **Estudo da degradação dos Resíduos sólidos urbanos através dos parâmetros físicos e físico-químicos em um biorreator de escala experimental**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil e ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SANTOS, S. M.; JUCÁ, J. F. T.; ARAGAO, J. M. S. Geotechnical properties of a solid waste landfill: Muribeca's case. In: **Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics**. 1998. p. 181-184.

SHARIATMADARI, N.; SADEGHPOUR, A. H.; MOKHTARI, MJIJCE. Aging effect on physical properties of municipal solid waste at the Kahrizak Landfill, Iran. **International Journal of Civil Engineering**, v. 13, n. 1, p. 126-136, 2015.

SHARIATMADARI, N.; SADEGHPOUR, A. H.; RAZAGHIAN, F. Effects of aging on the shear strength behavior of municipal solid waste. **International Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 3, p. 226-237, 2014.

SHARIATMADARI, N.; ASADI, M.; KARIMPOUR-FARD, M. Investigation of fiber effect on the mechanical behavior of municipal solid waste by different shearing test apparatuses. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 10, p. 2239-2248, 2017.

SILVEIRA, A. M. de M. **Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004. Tese, (Mestre em Ciências) Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

A.S.T.M., STANDARD D3080/D3080M-11 (2011). **Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**.

STARK, T. D.; HUVAJ-SARIHAN, N.; LI, G. Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. **Environmental geology**, v. 57, n. 8, p. 1911-1923, 2009.

YAMAWAKI, A.; DOI, Y.; OMINE, K. Slope stability and bearing capacity of landfills and simple on-site test methods. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 7, p. 730-738, 2017.

Zangeneh, N., Azizian, A., Lye, L., & Popescu, R. Application of response surface methodology in numerical geotechnical analysis. In: **Proc. 55th Canadian Society for Geotechnical Conference, Hamilton**. 2002.

ZEKKOS, D.; BRAY, J. D.; KAVAZANJIAN Jr, E.; MATASOVIC, N.; RATHJE, E. M.; RIEMER, M. F.; STOKOE, K. H. Unit weight of municipal solid waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 10, p. 1250-1261, 2006.

ZEKKOS, D.; ATHANASOPOULOS, G. A.; BRAY, J. D.; GRIZI, A.; THEODORATOS, A. (2010). Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 30, n. 8-9, p. 1544-1555, 2010a.

ZEKKOS, D.; BRAY, J. D.; RIEMER, M. F. Drained response of municipal solid waste in large-scale triaxial shear testing. **Waste management**, v. 32, n. 10, p. 1873-1885, 2012.