

Influência do tempo de aterramento na resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos

Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia ^[1], Cláudio Luis de Araújo Neto ^[2],
Renan Ítalo Leite Gurjão ^[3]

[1] victorbahia225@hotmail.com. Universidade Federal de Campina Grande/UAEC. [2] claudioluisneto@gmail.com.

[3] renan.ilg@gmail.com. Universidade Federal de Campina Grande/UAEC – PPGECA.

RESUMO

A estabilidade de taludes de aterros sanitários é verificada através dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU). No entanto, devido a sua composição heterogênea, tempo e forma de aterramento, os resíduos apresentam uma variação dos parâmetros de resistência. O objetivo dessa pesquisa foi realizar um estudo teórico a respeito da influência do tempo de aterramento dos RSU na sua resistência ao cisalhamento. Por meio de pesquisas em dissertações, teses e artigos científicos foi possível verificar a influência do tempo de aterramento e de outros fatores na resistência ao cisalhamento dos RSU. Nos estudos em análise, nota-se uma grande variação no comportamento dos RSU quanto à resistência ao cisalhamento. De modo geral, observou-se que o tempo de aterramento não possui uma influência bem definida sobre os parâmetros de resistência. Outros fatores, como a composição dos RSU, deslocamentos horizontais e a velocidade de cisalhamento, são preponderantes na determinação da resistência ao cisalhamento. Por meio dessa pesquisa foi possível concluir que o estudo da resistência ao cisalhamento dos RSU, ao longo do tempo de aterramento, deve levar em consideração diversos fatores que ocorrem em paralelo com o envelhecimento dos RSU.

Palavras-chave: Aterros sanitários, ângulo de atrito, coesão, composição gravimétrica.

ABSTRACT

The shear strength of municipal solid waste (MSW) is used for landfill slope stability assessment. However, due to their heterogeneous composition, time and form of grounding, the residues present a variation in the resistance parameters. The objective of this research was to carry out a theoretical study about the influence of the grounding time of MSW on its shear strength. Through research in dissertations, theses and scientific articles it was possible to verify the influence of grounding time and other factors on the shear strength of MSW. In the studies under analysis, there is a great variation in the behavior of MSW in terms of shear strength. Overall, it was observed that the grounding time does not have a well-defined influence on the shear strength parameters. Other factors, such as the composition of MSW, strain level and shear velocity are more influential in shear strength determination. Through this research, it was possible to conclude that the study of the aging process over shear strength of MSW must take into account several factors that occur in parallel with the aging of MSW.

Keywords: Landfills, friction angle, cohesion, gravimetric composition.

1 Introdução

A resistência de um solo pode ser definida pela máxima tensão de cisalhamento que ele pode resistir antes de ocorrer a ruptura. O cisalhamento ocorre devido ao deslizamento entre corpos sólidos. Os principais fenômenos que permitem menor ou maior deslizamento são o atrito (ϕ) e a coesão (c) (MONTEIRO e GONÇALVES, 2018). Esses parâmetros também são utilizados para determinar a resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Diferentemente do solo, o tempo de aterramento dos resíduos pode alterar a coesão e o ângulo de atrito devido, principalmente, aos processos biodegradativos.

A resistência ao cisalhamento é um dos principais fatores influenciadores da estabilidade de um talude. Talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser natural como no caso de encostas e vertentes, ou artificial como os cortes e aterros (GERSCOVICH, 2016). A disposição dos RSU nos aterros sanitários ocorre por meio da formação e alteamento de taludes, os quais são compostos pelos resíduos sólidos urbanos e pelas camadas de cobertura final e intermediárias.

Os aterros sanitários são obras de engenharia destinadas à disposição ambientalmente adequada dos RSU. No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), estima-se que dos RSU coletados em 2018, 59,5% sejam dispostos em aterros sanitários. A demanda por aterros sanitários tende a crescer cada vez mais, tendo em vista as recentes exigências legais, a exemplo da Lei nº 12305 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Nesse sentido, faz-se necessário o prolongamento da vida útil dos aterros sanitários, uma vez que esses possuem uma série de exigências legais e ambientais que tornam onerosa a sua implantação e manutenção, além de possíveis riscos à saúde e ao meio ambiente, sendo altamente desejável a limitação na quantidade de novas células implantadas para disposição de resíduos.

A redução da quantidade de células de aterros sanitários implica no alteamento de unidades já existentes e construção de aterros cada vez maiores em altura. No entanto, essa prática de alteamento dos aterros sanitários deve ser realizada com o seu devido estudo, pois o seu processo construtivo requer o aumento da inclinação dos taludes, podendo aumentar os riscos de ruptura, caso não haja o correto planejamento e monitoramento da sua execução.

Dessa maneira, é fundamental o estudo da segurança em aterros sanitários a partir da análise da estabilidade de taludes. Sob condições específicas, uma porção do material de um talude pode deslocar-se em relação ao maciço restante, desencadeando um processo genericamente denominado de movimento de massa, podendo acarretar diversos danos.

O estudo da estabilidade de taludes deve levar em consideração o equilíbrio entre as forças atuantes, forças devido ao peso dos materiais e ao escoamento da água, contrárias às forças devido à resistência ao cisalhamento do material, sendo seu resultado final expresso em termos de um coeficiente de segurança que representa a razão entre as forças resistentes e atuantes (FIORI, 2016).

Para o caso de aterros sanitários, os princípios do estudo da estabilidade de taludes são aplicados. Contudo, há outros fatores que influenciam diretamente nessa análise, como a heterogeneidade dos materiais que compõem o talude, a localização do aterro, os processos de drenagem e aterramento e, além disso, o tempo de aterramento referente à cada camada de RSU.

As alterações que os resíduos sólidos urbanos sofrem ao longo dos anos e como tais mudanças influenciam na resistência ao cisalhamento são pouco conhecidas e altamente controversas. A maioria dos estudos sobre a resistência ao cisalhamento dos RSU leva em consideração a variação dos percentuais de fibras, como os estudos realizados por Correa, Jucá e Motta (2015) e por Shariatmadari, Asadi e Karimpour-Fard (2017). Nesse contexto, percebe-se que poucos estudos relacionam a idade de aterramento com a resistência ao cisalhamento dos RSU e quando existem, parte deles, são pontuais, ou seja, lidam apenas com uma idade de aterramento específica, como Ribeiro *et al.* (2013) e Gang *et al.* (2015). Contudo, alguns estudos foram realizados com o objetivo de definir como o tempo de aterramento influencia na resistência ao cisalhamento dos RSU, como Zhan, Chen e Ling (2008), Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014), Abreu e Vilar (2017), Ramaiah, Ramana e Datta (2017), Keramati *et al.* (2018), entre outros.

Por essa razão, é importante uma compilação das contribuições científicas relacionadas a essa temática, em razão de sua ampla importância e do pouco entendimento que se tem a respeito dela, objetivando uma análise detalhada do desempenho da resistência ao cisalhamento dos RSU ao longo do tempo, tendo em vista que essa resistência é requerida durante anos.

Os termos idade e degradação de RSU normalmente são utilizados de maneira interligada, porém, o tempo de aterramento não é o único fator que exerce influência sobre a degradação dos resíduos sólidos urbanos. A decomposição de componentes biodegradáveis em aterros, incluindo condições ambientais como umidade, pH e temperatura, bem como a composição inicial dos resíduos e as condições operacionais do local de disposição, como esforços de compactação e eficiência de drenagem de lixiviados e gases, também possuem grande papel na degradação desses materiais.

Este artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica de diversos estudos sobre a influência do tempo de aterramento, composição gravimétrica, deslocamento horizontal e velocidade de cisalhamento na resistência dos RSU, possibilitando a determinação de fatores preponderantes no comportamento mecânico do material.

2 Método da pesquisa

Este artigo consiste em uma revisão bibliográfica, realizada por meio de pesquisas em dissertações, teses e artigos científicos, nacionais e internacionais. Foram selecionados trabalhos publicados entre os anos 2000 e 2019.

Os principais termos utilizados para a realização da pesquisa foram: “Resistência ao cisalhamento”; “Tempo de aterramento”; “Idade dos RSU”; “Resíduos sólidos urbanos”; “Shear strength”; “Grounding time”; “Age of MSW”; “Municipal Solid Waste”.

As publicações incluídas neste artigo consistem em trabalhos que exibem resultados e discutem acerca do tema principal trabalhado, além disso, eles encaixam-se nos critérios de apresentação de um resultado ou contribuição para um melhor entendimento da influência que o tempo de aterramento exerce na resistência ao cisalhamento dos RSU.

Após a definição dos trabalhos a serem incluídos, o que totalizou um número de 22 seleções, iniciou-se a fase de estudos, na qual foi realizada uma leitura de cada publicação, possibilitando a identificação das principais informações pertinentes a este artigo e, decorrente disso, a fase de sintetização das ideias principais e exposição dos dados obtidos.

3 Resultados da pesquisa

A composição heterogênea dos RSU sempre dificulta estudos relacionados aos aterros sanitários. Sendo assim, sua constituição também tem influência em diversos parâmetros que definem as características dos resíduos, como o ângulo de atrito e a coesão. Esses dois parâmetros são os principais fatores para a determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU. A forma e o tempo de aterramento também interferem nas características dos RSU, uma vez que esses processos modificam a composição, seja pela degradação ou pela inserção de novos componentes, como o solo da camada de cobertura.

Normalmente, a composição dos RSU divide-se em: orgânicos, como alimentos, papeis, madeiras, plásticos e têxteis; e inorgânicos, como metais, vidros e outros. Na Tabela 1 e nas Figuras 1 e 2, observam-se as porcentagens dos materiais depositados em determinados locais e seus respectivos anos de disposição. Essa compilação ocorreu por meio de uma ampla pesquisa, realizada por Yang, Xu e Chai (2018), onde foi obtida a quantidade relacionada aos principais componentes que fazem parte da constituição dos RSU.

De acordo com a Tabela 1 e as Figuras 1 e 2 (nas páginas 116 e 117), é possível observar a heterogeneidade que ocorre nos aterros sanitários. Por causa dessa composição diversificada é que os estudos de RSU mostram-se como um desafio. A localização do aterro sanitário, além das condições sociais, econômicas e culturais da população influenciam na composição final dos resíduos sólidos urbanos.

As conclusões obtidas nos estudos de resistência ao cisalhamento de RSU, geralmente, apresentam discrepâncias umas das outras, sendo o principal fator causador a diferença entre as composições dos materiais em estudo. A análise da influência do tempo de aterramento na resistência ao cisalhamento de RSU não se exclui desse fator, sendo esse um dos principais motivos da ocorrência da alta controvérsia em relação aos resultados obtidos.

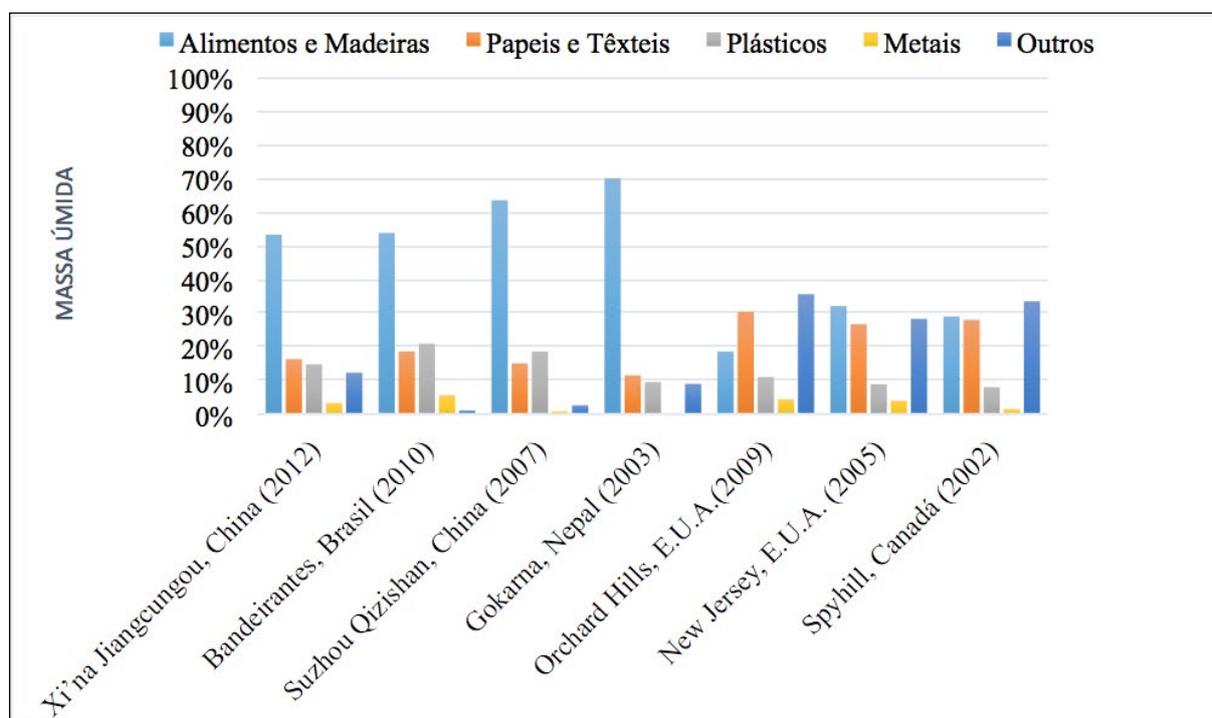
Em uma análise de ensaios de cisalhamento direto, realizada por Martins (2006) com equipamentos de grandes dimensões e tensões normais aplicadas de 50, 100 e 200 kPa, onde utilizou-se amostras representativas de resíduos novos e antigos, constatou-se que os RSU com menos tempo de aterramento apresentavam valores de resistência ao cisalhamento maiores que os resíduos antigos.

Tabela 1 – Composição do RSU em países (porcentagem em massa úmida)

LOCAL (ANO)	ALIMENTOS	MADEIRA	TÊXTEIS	PAPEL	PLÁSTICO	METAL	VIDRO	OUTROS
Egito (2016)	56			10	13	2	4	15
Jordânia (2015)	52,7		10,22	9	12,85	4,82	1,25	9,16
China (2015)	55,86	2,94	3,16	8,52	11,15	18,37		
Canadá (2012)	27	2	2	26	8	35		
México (2009)	45			17	13	3	5	17
China (2006)	63,39	1,78	2,46	11,07	12,7	2,3		5,87
Filipinas (2006)	59,1			7,4	10,5	1,3	1,7	20
Grécia (2006)	39,15	5,24		19,94	16,85	3,51	5,33	9,98
China (2001)	59,2	4,2	6,1	10,1	15,7	1,1	3,4	0,2
Reino Unido (2000)	25	0	3	29	7	8	10	18

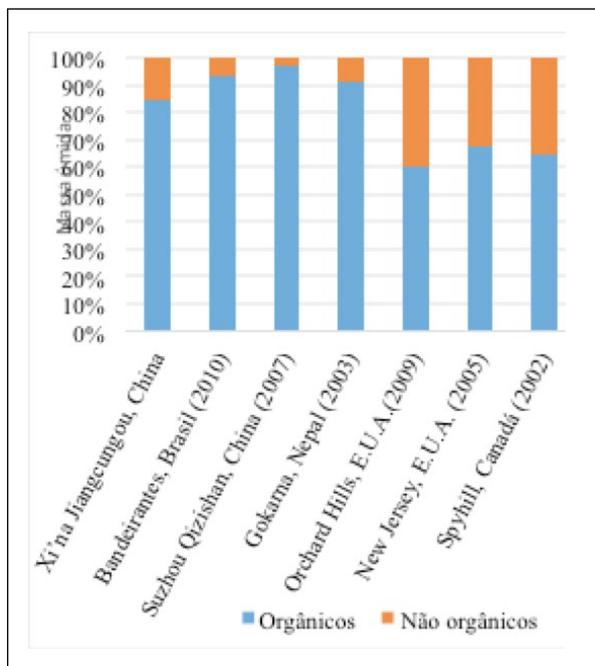
Fonte: Adaptado de Yang, Xu e Chai (2018).

Figura 1 – Composição de RSU em aterros sanitários



Fonte: Adaptado de Yang, Xu e Chai (2018).

Figura 2 – Composição de RSU em aterros sanitários



Fonte: Adaptado de Yang, Xu e Chai (2018).

Esse estudo não se diferencia de outros ocorridos nas últimas décadas, entre eles Caicedo *et al.* (2002); Gabr, Hossain e Barlaz (2007); Varga *et al.* (2011); Hossain e Haque (2009) e Reddy *et al.* (2009) são exemplos de trabalhos que atingiram conclusões semelhantes a Martins (2006), ou seja, também obtiveram resultados que afirmam que, com o passar dos anos, a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos diminui.

Contudo, outros estudos realizados tiveram conclusões diferentes das citadas, como exemplo tem-se o estudo de Zhan, Chen e Ling (2008), que estudaram resíduos sólidos urbanos com idades entre 0 e 13 anos. Os autores concluíram que o envelhecimento dos RSU aumenta a sua resistência ao cisalhamento. Feng *et al.* (2017) também chegaram a conclusões similares, utilizando amostras com idades de 2 e 4 anos.

Por outro lado, Zeccos (2005) concluiu que não há mudança significativa na resistência ao cisalhamento ao longo do tempo, e Bareither, Benson e Edil (2012) argumentam que a composição inicial dos resíduos sólidos urbanos e as subseqüentes mudanças que ocorrem nela possuem mais relevância na resistência ao cisalhamento do que o grau de degradação.

Martins (2006), Reddy *et al.* (2011), Koerner e Koerner (2015) e Reddy *et al.* (2015) verificaram que

os RSU inicialmente possuem um alto ângulo de atrito, porém, ao longo do tempo esse parâmetro tende a diminuir. Em relação à coesão, os autores verificaram que com o passar do tempo há um ganho no valor desse parâmetro.

Na Tabela 2, constata-se que os valores dos ângulos de atrito possuem uma tendência de redução, variando para cada estudo, possivelmente em razão da idade e da composição dos RSU. Já para a coesão, algumas pesquisas apontam um aumento, outras diminuição e Gabr, Hossain e Barlaz (2007) não apresentam conclusões quanto a esse parâmetro. Caicedo *et al.* (2002), em seu estudo, concluíram que existe uma clara correlação entre o grau de degradação do resíduo sólido urbano e sua resistência ao cisalhamento, já Reddy *et al.* (2015) verificaram que não há uma correlação clara entre o grau de degradação e as propriedades geotécnicas, o que pode ser atribuído à natureza heterogênea dos RSU coletados em um aterro sanitário.

Tabela 2 – Valores encontrados por estudos que possuem uma diminuição no ângulo de atrito

ESTUDO	IDADE	ϕ (°)	C (kPa)
Caicedo <i>et al.</i> (2002)	1 ano	22	72
	1,5 – 2,5 anos	11	75
Gabr, Hossain e Barlaz (2007)	Fresco	32	-
	Velho	24	-
Hossain e Haque (2009)	1ª fase de degradação	11,2	26,7
	4ª fase de degradação	2,4	19
Reddy <i>et al.</i> (2009)	Fresco	31 – 35	12 – 64
	1,5 anos	26 – 30	31 – 64
Reddy <i>et al.</i> (2011)	Fresco	35	1
	Degradado	28	16-40
Reddy <i>et al.</i> (2015)	Fresco	30	29
	6ª fase de degradação	12	65

Fonte: Adaptado de Caicedo *et al.* (2002), Gabr, Hossain e Barlaz (2007), Hossain e Haque (2009), Reddy *et al.* (2009), Reddy *et al.* (2011) e Reddy *et al.* (2015).

Outros estudos relataram um ganho no ângulo de atrito com o passar do tempo, dentre eles o de Pulat e Yukselen-Aksoy (2017), que utilizou três diferentes composições e duas idades para seu estudo e o de Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014), que

estudou a influência das idades dos RSU na resistência ao cisalhamento. Na Tabela 3 estão apresentados os estudos que verificaram o aumento do ângulo de atrito com a idade de aterramento.

Tabela 3 – Valores encontrados por estudos que possuem um aumento no ângulo de atrito

ESTUDO	IDADE	ϕ (°)	C (kPa)
Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) - composição 1	Fresco	27,1	40,3
	5-7 anos	29,4	36,4
Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) - composição 2	Fresco	20,9	49,6
	5-7 anos	34,6	32,8
Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) - composição 3	Fresco	25,1	32,6
	5-7 anos	36,8	32
Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014)	Fresco	24,8	25
	5 anos	45,8	11,2
	14 anos	34,1	12,2
	21 anos	30,8	16,1
Zhan, Chen e Ling (2008)	1,7	9,9	23,3
	11	26	0
Feng <i>et al.</i> (2017)	2	15,7	29,1
	4	21,9	19,3

Fonte: Adaptado de Pulat e Yukselen-Aksoy (2017), Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014), Zhan, Chen e Ling (2008) e Feng *et al.* (2017).

De acordo com os dados da Tabela 3, percebe-se que todos os estudos tiveram diminuição nos valores de coesão com o aumento da idade de aterramento, à exceção do estudo realizado por Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014), que não obteve uma relação bem definida. Eles concluíram que a resistência ao cisalhamento foi influenciada pela idade e pela quantidade de fibras, tendo como exemplo as amostras frescas e de 5,5 anos, respectivamente, com a menor quantidade de fibras e menor resistência ao cisalhamento, e maior quantidade de fibras e maior valor de resistência ao cisalhamento.

Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) verificaram que a diminuição do teor de matéria orgânica dos RSU aumenta o ângulo de atrito e diminui a coesão. Já em relação ao teor de fibras, com sua redução o valor do ângulo de atrito também diminuiu.

O estudo realizado por Abreu e Vilar (2017) tratou da resistência ao cisalhamento de seis amostras de RSU de idades de aterramento variando entre 2 e 25 anos. Baseado em observação visual, testes físicos e químicos, foi possível concluir que a amostra que havia sido enterrada por apenas dois anos foi

claramente menos degradada que as outras cinco amostras, que tinham entre 5 e 25 anos quando exumadas. Os resultados indicam que os resíduos testados com mais de cinco anos atingiram estágios de decomposição semelhantes, mas apresentaram diferentes composições em termos de plásticos moles, material incompressível e elementos de reforço.

Os resultados obtidos por Abreu e Vilar (2017) indicam que o envelhecimento dos resíduos proporciona um aumento no ângulo de atrito e uma diminuição da coesão. Entretanto, os métodos de coleta e preparação das amostras impuseram mudanças significativas na composição dos resíduos. As amostras mais degradadas eram empobrecidas de componentes de reforço, enquanto as amostras menos degradadas eram enriquecidas com esses componentes.

Pulat e Yukselen-Aksoy (2019) utilizaram amostras representativas referentes a quatro localidades, com duas idades diferentes. Entre as quatro amostras utilizadas, três eram sintéticas e representavam os resíduos da Europa, Turquia e dos Estados Unidos da América. A amostra natural era referente ao aterro sanitário da cidade de Manisa, Turquia. Os tempos de envelhecimento selecionados para esse estudo foram de um ano para as amostras sintéticas e de cinco a sete anos para as amostras naturais de Manisa. Os resultados encontrados estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras de RSU

AMOSTRA	IDADE DO RSU	(°)	C (kPa)
Europa	0 anos	27,1	40,3
Turquia	0 anos	20,9	49,6
Estados Unidos	0 anos	25,1	32,6
Manisa	0 anos	38,9	29,2
Europa – envelhecida	1 ano	29,4	36,4
Turquia – envelhecida	1 ano	34,6	32,8
U.S.A. – envelhecida	1 ano	36,8	32
Manisa – envelhecida	5 – 7 anos	37,9	39,5

Fonte: Adaptado de Pulat e Yukselen-Aksoy (2019).

Tendo em vista os resultados expostos na Tabela 4, torna-se possível a observação de que três das quatro amostras sofreram o mesmo processo, ou seja, todas as amostras sintéticas tiveram variações iguais em seus parâmetros, os ângulos de atrito aumentaram de valor e as coesões diminuíram, conforme o envelhecimento dos resíduos. Contudo, contrariando esses resultados, a amostra natural de Manisa apresentou um comportamento diferente, sua coesão aumentou e seu ângulo de atrito sofreu uma leve diminuição. Vale salientar que há uma grande disparidade entre as idades dos exemplos em estudo, as amostras sintéticas foram envelhecidas apenas em um ano, enquanto as amostras naturais tinham idades entre cinco e sete anos.

Além disso, nota-se a importância que a composição dos RSU tem na definição do valor da resistência ao cisalhamento, os estudos de Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014), Abreu e Vilar (2017), Ramaiah, Ramana e Datta (2017), Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) e Pulat e Yukselen-Aksoy (2019) são exemplos da influência que os RSU recebem dos elementos que os compõem. Os resultados obtidos pelos estudos anteriormente citados corroboram com a afirmação de Bareither, Benson e Edil (2012) sobre a predominância da influência da composição na resistência ao cisalhamento.

É importante observar que além da composição, outros fatores influenciam na obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, como é o caso da deformação horizontal utilizada para determinação das tensões resistentes em ensaios de cisalhamento direto. Martins (2006), Abreu e Vilar (2017) e Ramaiah, Ramana e Datta (2017) estudaram a variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento levando em conta valores de deslocamentos horizontais diferentes. Na Tabela 5 são apresentados os dados citados, possibilitando um melhor entendimento de como foi o comportamento do material estudado dessas pesquisas.

Analisando os dados da Tabela 5, percebe-se uma relação entre os valores de ângulo de atrito e coesão com os valores de deslocamento horizontal. Em todos os estudos, quanto maior o deslocamento horizontal, maiores foram os valores de ângulo de atrito e de coesão. Quanto à idade de aterramento, não há uma relação concreta estabelecida com a resistência ao cisalhamento.

Tabela 5 – Ângulos de atrito e coesões em relação aos deslocamentos horizontais em idades definidas

IDADE DOS RSU	(°)	C (kPa)	^h (%)
25 anos Abreu e Vilar (2017)	16	3	5
	23	3	10
	31	3	20
16 anos Abreu e Vilar (2017)	19	0	5
	26	0	10
	34	1	20
11 anos Abreu e Vilar (2017)	17	2	5
	23	3	10
	30	6	20
8 anos Abreu e Vilar (2017)	17	1	5
	23	3	10
	29	7	20
5 anos Abreu e Vilar (2017)	18	2	5
	24	3	10
	32	7	20
2 anos Abreu e Vilar (2017)	14	8	5
	17	10	10
	23	14	20
3-3,5 anos Ramaiah, Ramana e Datta (2017)	22,4	14,5	8
	33,4	16,6	18
9-10 anos Ramaiah, Ramana e Datta (2017)	26	6,2	8
	34,6	14,4	18
10-12 anos Ramaiah, Ramana e Datta (2017)	23	10	8
	35,4	11,1	18
4,5-5,5 anos Ramaiah, Ramana e Datta (2017)	25,8	20,7	8
	38,5	22,7	18
3-4 anos Ramaiah, Ramana e Datta (2017)	25,1	9,9	8
	37,4	16,2	18
2-2,5 anos Ramaiah, Ramana e Datta (2017)	21,5	18,5	8
	33,5	21,3	18
RSU fresco Martins (2006)	16,8	13,5	10
	20	20,2	20
	27,2	30,9	35
	31,6	53	50
RSU velho Martins (2006)	10,5	37,1	10
	11,1	48,2	20
	17,7	58,3	35
	21,6	83,7	50

Fonte: Adaptado de Abreu e Vilar (2017), Ramaiah, Ramana e Datta (2017) e Martins (2006).

É importante salientar que outros fatores podem influenciar na resistência ao cisalhamento, além dos já citados, como a velocidade de deslocamento. No estudo de Keramati *et al.* (2018), para determinar o efeito do envelhecimento em RSU, foram realizados 60 testes de cisalhamento direto sob a influência de três velocidades de cisalhamento de 19, 8 e 0,8 mm/min. Os ensaios foram realizados com amostras de dimensões de 300 x 300 x 150 mm, utilizando três idades diferentes, fresco, 3 meses e 6 meses de aterramento, e quatro tensões normais verticais de 20, 50, 100 e 200 kPa. A Tabela 6 apresenta os dados obtidos no estudo de Keramati *et al.* (2018).

Tabela 6 – Valores de ângulo de atrito e coesão em função da idade e velocidade de cisalhamento dos RSU

IDADE DA AMOSTRA	VEL. DE CISALHAMENTO (mm/min)	(°)	C (kPa)
Fresco	0,8	27,49	14,69
Fresco	8	31,9	13,16
Fresco	19	35,09	13
3 meses	0,8	28,16	13,62
3 meses	8	23,42	21,1
3 meses	19	35,32	10,05
6 meses	0,8	29,4	14,9
6 meses	8	32,6	15,03
6 meses	19	34,5	18,8

Fonte: Adaptado de Keramati *et al.* (2018).

Levando em consideração os resultados expostos na Tabela 6 é possível inferir que a velocidade de cisalhamento influencia nos valores de ângulo de atrito e coesão obtidos. Em contraposição, a idade dos RSU exerce pouca influência nesses resultados. Keramati *et al.* (2018) constataram que com o aumento do tempo de aterramento ocorre um aumento na resistência ao cisalhamento dos RSU. Ainda segundo Keramati *et al.* (2018), a diminuição dos componentes orgânicos, com o tempo, acarreta o aumento na proporção de plásticos, que por sua vez aumenta a resistência ao cisalhamento.

Os resultados obtidos a partir dos estudos, levando em consideração apenas o tempo de aterramento, mostram-se altamente inconsistentes, uma vez que diversos autores concluíram que com o passar dos anos os RSU tornam-se menos resistentes

ao cisalhamento, e outros chegaram à conclusão oposta. Além disso, outras características tornaram-se expressivas para a coesão e o ângulo de atrito, havendo grande divergência sobre o que ocorre com eles, possibilitando, com o envelhecimento dos RSU, tanto o aumento como a diminuição de ambos os parâmetros.

Em relação à idade de aterramento dos RSU, de um total de 15 trabalhos, aproximadamente 26,7% deles afirmaram que o ângulo de atrito aumenta, 53,3% afirmaram que o ângulo de atrito diminui e 29% não apresentaram resultados específicos sobre o ângulo de atrito. Já em relação à coesão, desses mesmos 15 estudos, aproximadamente 46,7% afirmaram que a coesão aumenta, 26,7% afirmaram que a coesão diminui e 26,6% não apresentaram resultados específicos sobre a coesão.

Essa grande controvérsia ocorre, principalmente, por causa do direcionamento da pesquisa, a qual utiliza apenas o parâmetro de tempo de aterramento. Contudo, diversos fatores agem na resistência ao cisalhamento dos RSU. Além disso, a localização do material exerce grande influência no resultado final.

4 Conclusão

Não foi possível obter uma conclusão definitiva a respeito da influência do tempo de aterramento na resistência ao cisalhamento dos RSU. A maioria das informações se contradiz, havendo pesquisas que apontam para resultados distintos, impossibilitando uma determinação absoluta.

Entretanto, é possível afirmar que o tempo de aterramento não é o único fator que influencia nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Diversos outros fatores como o deslocamento horizontal e a velocidade de deslocamento de cisalhamento exercem influência nos parâmetros estudados. Além desses, outro elemento de grande importância é a composição dos RSU, que é constituída de maneira variada, dependendo diretamente da região em que se localiza. Ademais, há a possibilidade da alteração dessa composição com a mudança de hábitos daquela região, trazendo, assim, outro fator influenciador para a resistência ao cisalhamento dos RSU.

A visão final apresentada por este artigo é de que estudar apenas a influência do tempo de aterramento leva a resultados inconclusivos, já que diversos fatores podem influenciar na resistência ao cisalhamento dos RSU.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS.

Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2018/2019. São Paulo: ABRELPE, 2019.

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.

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**, [s. l.], 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Lex: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS: Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

CAICEDO, B.; YAMIN, L.; GIRALDO, E.; CORONADO, O. Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. **Fourth International Congress in Environmental Geotechnics**, Rio de Janeiro, Brasil, v. 1, p. 177-182, 2002.

CORREA, C.; JUCÁ, J. F.; MOTTA, E. Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. **Eng Sanit Ambient**, [s. l.], v. 20, ed. 3, p. 427-436, 2015.

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, 2017.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

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**, [s. l.], p. 478-484, 2007.

GANG, Z.; JUN, M.; HUI, X.; YU, T. Experimental Study on Engineering Mechanical Properties of Aged Refuse. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 20, 2015.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

HOSSAIN, M. D S.; HAQUE, M. A. The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills. **Waste Management**, [s. l.], p. 1568-1576, 2009.

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, 2018.

KOERNER, R. M., KOERNER, G. R. On the Shear Strength of Municipal Solid Waste (MSW). **GSI White Paper #33.** Geosynthetic Institute, Folsom, p. 11, 2015.

MARTINS, H. L. **Avaliação da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Ensaios de Cisalhamento Direto em Equipamento de Grandes Dimensões.** 2006. 131 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MONTEIRO, V. E. D.; GONÇALVES, R. A. Cisalhamento direto. *In*: MONTEIRO, Veruschka Escarião Dessoles; GONÇALVES, Rafael Abrantes. **Mecânica dos solos Experimental.** [S. l.: s. n.], 2018. cap. 10, p. 143-144.

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**, [s. l.], p. 1-9, 2019.

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.; 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**, [s. l.], p. 578-587, 2009.

REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. **Waste Management**, [s. l.], p. 2275-2286, 2011.

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, A. G. C., AZEVEDO, R. F., ROCHA, E. F., AZEVEDO, I. C. D., LORETO, A. S. Determinação de parâmetros mecânicos de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios realizados em laboratório.

Geotecnia, São Paulo, v. 127, p. 81-101, 2013.

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.

VARGA, G., IMRE, E., CZAP, Z., FIRGI, T., TELEKES, G. Laboratory and in situ tests of a landfill. **Fourth International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills" (HPML4)**, Santander, Spain, 2011.

YANG, R.; XU, Z.; CHAI, J. A Review of Characteristics of Landfilled Municipal Solid Waste in Several Countries: Physical Composition, Unit Weight, and Permeability Coefficient. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 6, 2018.

ZECCOS, Dimitrios Pavlos. **Evaluation of Static and Dynamic Properties of Municipal Solid -Waste**. 2005. Tese (Doctor of Philosophy in Engineering Civil and Environmental Engineering) - University of California, Berkeley, California - USA, 2005.

ZHAN, T. L. T.; CHEN, Y. M.; LING, W. A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. **Engineering Geology**, [s. l.], p. 97-111, 2008.