

9 Discussão dos resultados

Neste capítulo, é apresentada a discussão dos resultados obtidos pela caracterização dos dados de campo dos materiais amostrados, pelos ensaios de potencial bioquímico de metano e o uso dos parâmetros experimentais nos modelos de previsão de geração de biogás.

Serão apresentadas também as análises da influência do grau de degradação do resíduo em relação aos parâmetros físico-químicos e da produção de biogás.

9.1 Propriedades físicas dos RSU em campo

As propriedades físico-químicas dos RSU como temperatura e pH, aferidas em campo foram apresentadas na Tabela 6-1. Estes dados foram obtidos a partir da amostra bruta imediatamente após sua extração da profundidade amostrada e colocada sobre uma lona de PVC.

9.1.1 Temperatura *in situ*

O furo 128C foi o que apresentou a menor temperatura, indicando que resíduos mais novos apresentam menores temperaturas, faixa de temperatura que é apropriada para os microrganismos mesofílico e que a categoria dos metanotróficos estão presentes.

Para a faixa de temperatura dos mesofílicos, os estudos de Haarstrick *et al.* (2001), com simulações da degradação de RSU, obtiveram um platô pequeno com temperatura próximo a 37 °C com valores de pH de 4 a 5,5, durante um período de decomposição de 25 a 35 dias. Este resultado estão em conformidade com o encontrado por Henze *et al.* (1995), nos quais a faixa ótima para os microrganismos mesofílicos variou entre 35 a 37 °C. Contudo, foi observado um valor máximo sendo alcançado após 40 dias e que permaneceu praticamente constante na temperatura 40 °C num período de mais de 60 dias. Esse máximo se

deu no momento em que os valores de concentração de metano também foram alcançados, mantendo-se constante durante todo o tempo restante.

Os demais furos apresentaram temperaturas maiores que a máxima apresentada no furo 128C, com valores superiores a 40 °C. Nesta faixa de temperatura o grupo de microrganismos que estão em atividade é conhecido como grupo dos termofílico. Estes valores foram condizentes aos obtidos por Kim (2003) e por Coumoulos *et al.* (1995), citado por Nascimento (2007) (resultados apresentados no Capítulo 2). A média dos valores de temperatura indicou atividade dos termofílicos e que está acima da faixa ótima para os microrganismos metanogênicos, que esta entre 35 a 45 °C, conforme Staszewska & Pawlowsk (2011).

Os furos 302 e 161A apresentaram temperatura similar e constante em toda a profundidade amostrada. O furo 131, com exceção da profundidade de 5 m, apresentou o mesmo comportamento desses furos. Esse comportamento foi observado por outros autores, como Coumoulos *et al.* (1995), Mariano & Jucá (1998) e Hanson *et al.* (2005) no qual, após 10 metros de profundidade há uma tendência em estabilização da variação de temperatura. Já o furo 161A, indica esta tendência somente a partir da profundidade de 15 metros. As variações de temperatura entre os poços, após a estabilização de temperatura é da ordem de 10 °C, a mesma variação detectada por Hanson *et al.* (2005).

Além da dificuldade em observar uma relação da temperatura com a idade e a profundidade, foi realizada uma análise para obter correlações entre os demais parâmetros com esse. Em relação à correlação linear, a temperatura teve uma correlação considerada estatisticamente moderada apenas com o pH ($R^2 = 0,54$). Para a correlação de Spearman (apresentado na Tabela 7-14), que é uma correlação não linear e paramétrica, foram obtidas correlações moderadas a forte, conforme a avaliação de Callegari-Jacques (2003), citado por Lira (2004), com o pH, a porcentagem de agregado grosso e o L_o obtido experimentalmente. Para o primeiro parâmetro, o pH, observou-se uma proporcionalidade direta e igual a 0,64, onde quanto maior a temperatura maior o pH do RSU. Para os outros dois parâmetros a proporcionalidade foi inversa, sendo respectivamente -0,68 e -0,61.

A verificação da existência de correlação entre a temperatura e o potencial de geração de metano sugere que esse parâmetro, de fácil obtenção e baixo custo, pode ser um bom indicador para avaliar a capacidade de produção de gás. Mas, o

comportamento encontrado neste e em outros estudos foi de uma estabilização da temperatura com a profundidade. Portanto, esse parâmetro pode indicar a fase de decomposição do resíduo, mas não é capaz de estimar uma ordem de grandeza da quantidade de biogás que pode ser gerado.

9.1.2 Potencial hidrogeniônico *in situ*

De acordo com os valores da Tabela 6-1, o pH variou entre 7 e 10, demonstrando que este meio apresenta características de neutro à um caráter básico.

Os dados do furo 128C apresentaram-se constantes tanto com a profundidade como com a idade. O valor de pH próximo a 7, obtido neste furo, é um indicativo da fase de produção acelerada de metano, sendo representativo de um material mais novo, o que está de acordo com a identificação das idades, principalmente, para as profundidade de 5 e 10 m. Esta condição pode indicar que o material tem maior potencial em geração de biogás que os outros furos amostrados, o que realmente foi constatado pelo ensaio GB₂₁, em especial para o material encontrado a 5 m. Esse ponto foi o com menor tempo de exposição ao processo de degradação, o que produziu maior volume de gás e menor pH.

Ainda que o material novo tenha apresentado pH igual a 7, os estudos de Alamgir & Ahsan (2007) que avaliaram as características de RSU das seis maiores fontes geradoras destes materiais em Bangladesh (Dhaka, Chittagong, Khulna, Rajshahi, Barisal e Sylhet), totalizando 320 amostras de resíduos novos, retirados dos caminhões de coleta de resíduos, com variações de localização geográfica (visto pela localização destas seis cidades), da fonte geradora (residencial, comercial, institucional e de varrição) e da sazonalidade (verão, outono e inverno), apresentaram valores de pH variando de 7,7 a 8,7. Mesmo que a composição gravimétrica não tenha sido apresentada, estes resíduos, por serem considerados “frescos”, continham uma ampla gama de compostos, incluindo os orgânicos putrescíveis, podendo ser observado que, mesmo os RSU “frescos”, o pH pode apresentar-se maior que 7. Sugerindo a existência de algum fator pode interferir o processo de degradação e promover um ambiente básico mesmo em RSU frescos.

Os materiais com idade de disposição superior a 1 ano, em sua maioria, apresentaram uma variação do pH, com valores superiores a 8. Valores característicos de um meio básico pode ser um indicador para resíduos que estão num estágio mais avançado de degradação e, portanto, sua decomposição podendo resultar num menor volume de produção de biogás. Contudo, o material com mais de 3 anos do furo 128C não apresentou o mesmo comportamento, pois uma menor produção de gás foi encontrada com pH dentro da fase representativa da produção acelerada de metano.

Nos estudos de Haarstrick *et al.* (2001) sobre a decomposição de material orgânico de aterros municipais também apresentaram uma tendência do pH com o tempo de decomposição. No momento que foi alcançado o ápice da fase metanogênica, o pH praticamente atingiu ao valor de 7 e com o passar do tempo de degradação houve um ligeiro aumento do pH. Esse estudo indica que com o tempo de decomposição da matéria orgânica o pH vai aumentando. Com exceção de alguns pontos de amostragem, como o material de 5 m do furo 134B, 10 e 15 m do furo 128C, esse foi também o comportamento observado nesta tese, ainda que os materiais mais antigos apresentassem valores de pH bastante superiores a 7.

Foi observado no estudo de Gabr & Valero (1995), num aterro na Pensilvânia, com amostras de 1 m³, com 15 a 30 anos, em perfurações com profundidades máximas de 19 metros, que valores médios de pH apresentaram-se entre 8,8. Este resultado está próximo à maioria dos pontos mostrados no Gráfico 6-3, mesmo com idades diferentes. A análise dos resíduos, estudados por esses autores, apontaram uma proporção de 9 % de madeira e 2 % de plástico, tendo para o restante 23 % de têxtil, 13 % de plástico e 53 de % material inerte. Demonstrando que a grande proporção compõe-se de materiais que não produzem biogás. A parcela que está em processo de decomposição é, apenas, a madeira. Essa responsável por manter o meio básico. Estes resultados corroboram com o estudo realizado por Cioabla & Dumitrel (2011) com biomassa que promoveu um aumento do pH.

Cioabla & Dumitrel (2011) observaram em processos experimentais de fermentação anaeróbicos, em biomassa de cevada e linho, uma variação de temperatura de 34 a 36 °C, num período de 40 dias e do pH de 3,5 a 8, visto que transcorrido 10 dias houve o aumento do pH, com a mudança do meio ácido para

neutro a levemente básico. Pode ser concluído que a presença deste tipo de biomassa aumenta o valor de pH, o que poderia justificar os valores de pH obtidos para a maioria dos furos de sondagem.

Ainda que esses estudos tenham indicado que maiores valores de pH possam estar relacionados aos teor de ligno-celulolíticos, não foi obtida correlação linear entre o pH e o teor de LG, assim como nenhuma outra correlação linear foi encontrada. Também não foi estabelecida correlação de Sperman com os demais parâmetros e o pH (Tabela 7-14).

Ainda que haja um consenso sobre a influência do pH com a degradação dos resíduos e que valores baixos de pH interfiram na produção de metano, pouca informação sobre pH superiores a 9 foi encontrada. Não observando valores tão elevados quanto os determinados nesta tese.

9.2

Propriedades físicas dos RSU em laboratório

9.2.1

Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade das amostras de menor volume foram apresentadas na Tabela 6-2, os resultados demonstraram uma grande variação do teor de umidade, numa faixa entre 10 a 115 %, Conforme estudos de Barlaz (1996), o menor valor desse teor está dentro do limite mínimo de umidade que atuam as populações microbianas e de seu metabolismo produzem o biogás. Considerando tais suposições desse autor, apenas o material localizado a 5 m de profundidade do furo 161A não apresentaria atividade microbiana e, portanto, não seria capaz de gerar gases. Contudo, para os pesquisadores Buivid *et al.* (1981), Nobre *et al.* (1988) e Gurijala & Suflita (1993), esse limite mínimo é um pouco superior, valores entorno de 25 a 30 %, nessa faixa o metabolismo dos microrganismos não estariam ativos. Assim, um número maior de pontos apresentaria condições restritas quanto a sua degradação, tais como os primeiros 10 m tanto dos furos 161A quanto do furo 131, como também o primeiro 5 m desse último furo. Todos os demais pontos amostrados possuem umidade superior à faixa ótima para degradação, conforme relataram Palmizano & Barlaz (1996).

Portanto, indicando que haverá atividade metabólica em condições de campo e, como consequência, a produção de biogás.

Em comparação com aos valores encontrados na literatura, a média obtida está dentro da faixa de valores dos RSU brasileiros, como apresentado por Bidone & Povinelli (1999), citado por Leite (2008). Todos os valores apresentados na Tabela 6.2 estão em acordo com os dados apresentados por diversas pesquisas para RSU tanto no Brasil quanto para outros países (como apresentado na Tabela 2.11).

Ao examinar o comportamento mostrado no Gráfico 6-5, foi observado o aumento da umidade somente até a profundidade de 15 m para os furos 131 e 161A. Essa ocorrência também foi averiguada por outros autores (Bandeira e Faria & Jucá, 1995; Gabr & Valero, 1995; e Gomes *et al.*, 2005). Bandeira e Faria & Jucá (2000) no Aterro de Muribeca, PE, verificaram que a umidade variou de 13 a 26 %, aumentando com a profundidade entre 0,78 a 1,60 metros. Ainda que se trate de resíduos localizados em menores profundidades, esses valores são próximos aos obtidos nessa tese para materiais localizados a 5m.

Além da influência da profundidade com a umidade, há ainda o efeito do tempo de degradação do resíduo ou da idade desse. Gomes *et al.* (2005), no Aterro Sanitário de Santo Tirso, em Portugal, avaliaram a umidade em amostras com profundidades diferentes, em temperatura de secagem de 60, 90 e 105 °C, onde foi determinando para o material novo, localizado a 0,6 m de profundidade, um valor de umidade de 61 %, enquanto que para o material com 3 anos, numa profundidade de 11 m, a umidade foi igual a 117 %. Segundos estes autores, seus valores foram consistentes com os apresentados por Landva & Clark (1990). Em concordância com os autores, com exceção do furo 302, o comportamento obtido foi do aumento de umidade com a profundidade como também com a idade.

Contudo, mesmo que os resultados Carvalho *et al.* (2002) tenham sido diferentes de Gomes *et al.* (2005), com uma diminuição da umidade com a idade, com uma variação de 23 a 54 % em resíduos com idade de 0,5 a 5 anos, onde seus resultados corroboram com pesquisa realizada por Machado *et al.* (2010), num aterro em Salvador, e são semelhantes, nessa tese o comportamento de redução da umidade com a idade foi observado somente para resíduos de 3 anos e mais de 8 anos do furo 302.

Outra observação realizada por Machado *et al.* (2010) foi a de que os RSU entre 5 e 9 anos não sofreram variações de umidade, o que está em desacordo com o apresentado nesse trabalho, pois resíduos com mais de 8 anos apresentaram uma variação de 20 a 115 % do teor de umidade.

A grande variação detectada nesse parâmetro pode ser decorrente de diversos fatores, como exemplo, o tipo de componentes existente nos resíduos, pois alguns materiais absorvem uma maior quantidade de água, há ainda a dependência com as condições de drenagem, nível de água, fluxo entre outros condicionantes. Tentativas de correlacionar o teor de umidade com outros parâmetros foram realizadas, não apresentando qualquer correlação linear. Porém, correlações de Spearman foram obtidas (Tabela 7-14), uma delas foi inversa, onde o valor da umidade é inversamente proporcional à porcentagem de agregado fino. Isso sugere que uma menor quantidade de água estaria sendo absorvida por esta fração. Outras correlações não-lineares positivas foram obtidas entre o teor de umidade da matéria orgânica, o teor de MO, o teor de SV e o teor de LG. Estas últimas relações seriam esperadas, já que a fração orgânica pode ser considerada responsável pela absorção de umidade.

9.2.2 Composição Gravimétrica

A composição gravimétrica forneceu a quantidade e os tipos de resíduos que estão presentes em cada um dos pontos amostrados. De acordo com a produção de gás observada *in situ* seria esperada, em relação à idade de disposição dos resíduos, uma redução da fração orgânica, pela degradação desta, e um aumento da proporção de plásticos, em termos de volume, pois estes não são degradados.

Com relação ao perfil de amostragem, no furo 128C não foi observado uma tendência de diminuição ou aumento das frações agregado fino e plástico. No furo 134B e 302 foi observada uma tendência de uma pequena diminuição da fração agregado fino. No furo 161A, houve uma tendência de aumento da proporção de plásticos, mas não ocorreu nenhuma tendência com a fração agregado fino.

Quanto à fração orgânica grossa, o furo 128C apresentou a existência dessa proporção, mas não houve tendência no seu comportamento com a profundidade. Embora tal comportamento não tenha sido observado nesse furo, à presença desses componentes pode indicar uma menor degradação desse furo.

Os componentes como vidros e metais foram encontrados em quantidades insignificantes em relação aos demais componentes. Em todos os furos, a quantidade de vidro foi baixa. Como esse componente não sofre degradação, esse pequeno percentual pode indicar que essa fração quando foi depositada já possuía baixa quantidade ou que, pela manipulação, ela foi quebrada em tamanhos inferiores a 2,5 cm. A proporção de metais também foi baixa, o que indica que a entrada desses componentes é baixa ou sua decomposição é bastante rápida, porque não apresenta uma variação significativa com o tempo e/ou profundidade.

Outro componente com baixa proporção foi à fração de papel, com exceção da profundidade de 20 m do furo 302. Essa fração, ainda que esse seja considerado como um material de degradação moderada, nenhum comportamento de decomposição com a profundidade foi observada.

Ao analisar a composição gravimétrica com a idade foi observado uma tendência linear para alguns componentes até 4 anos, pois resíduos com idade superior apresentaram uma variação muito grande na mesma idade. Para as frações papel e metal uma correlação linear e negativa, ou inversa, foi observada, onde quanto maior a percentagem de material menor é a idade do mesmo. Já para a fração de inertes, uma relação linear e positiva, ou direta, foi encontrada, onde quanto maior a proporção desse componente maior é a sua idade.

9.2.3 Distribuição Granulométrica

De maneira geral, os resíduos são considerados como materiais não coesivos, sendo considerados como pedregulhos, com exceção do furo 161A, nas profundidades de 5 e 10 m, que foram considerados como areia com finos (SM ou SC).

Kölsch (1995), num projeto de pesquisa apoiado pela *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (Fundação Alemã de Pesquisa), analisou as propriedades mecânicas do resíduo doméstico e classificou tanto um material fresco como um material aterrado por 5 anos como sendo uma areia bem graduada (SW). A quantidade de material com dimensões superiores a 120 mm foram muito próximas umas das outras, havendo diferença na fração inferior a 40 mm. Para o resíduo fresco, essa fração variou entre 25 a 35 % e para o resíduo antigo a proporção foi de aproximadamente 65%. Por estes dados, o autor observou a

diferença entre estes resíduos, onde o material mais fresco apresentou menor quantidade de finos. Esse resultado seria esperado, visto que a presença de finos pode ser atribuída à decomposição dos resíduos, pois com o “uso” do material orgânico pelos microrganismos, há a quebra das moléculas o que produz uma redução de suas dimensões. O comportamento observado por esse autor não foi comprovado para o AMJG. Para o furo 161A, o inverso desse comportamento foi observado.

Classificações para resíduos também foram apresentadas por Gabr & Valero (1995), onde os resíduos de 15 e 30 anos, retirados do Aterro Pioneer Crossing, na Pensilvânia, apresentaram-se como sendo uma areia bem graduada. Esta classificação foi igualmente encontrada por Kölsch (1995). Mas, a idade dos resíduos estudados por este último autor (máximo de 5 anos), foi muito inferior ao primeiro. Nessa tese a classificação dos resíduos de 5 e 10 m de profundidade, com idade de 2 a 3 anos foi próxima à apresentada pelo último pesquisador citado.

No Brasil, resíduos de idades variando de frescos, 1 ano, 4 anos e 15 anos foram classificados por Machado *et al.* (2010) como sendo um pedregulho bem graduado (GW). Esses autores observaram um deslocamento para a esquerda do eixo de dimensões das partículas *versus* o aumento da idade. Os materiais de 1 e 4 anos de idade apresentaram um comportamento praticamente idêntico. Os resultados apresentados pelos autores foram igualmente obtidos nesse trabalho.

Ainda que resultados semelhantes aos obtidos nesse trabalho tenham sido encontrados na literatura, não foi detectado nenhum tipo de padrão entre a granulometria e a profundidade da amostra. De forma análoga, também não foi possível perceber uma relação direta entre a proporção de agregado fino e a granulometria do material, não sendo possível afirmar que a granulometria está diretamente associada à condição de decomposição do material orgânico.

9.2.4 Densidade Relativa dos Grãos (G_s)

A determinação da densidade relativa dos grãos apresentou valor médio 2,5, com máximo de 2,68 e mínimo de 2,35. Grande parte dos valores de G_s está próxima dos encontrados para solos. Como exemplo tem-se para a caulinita o valor de 2,6 e para o quartzo o de 2,65. Portanto, as características dos RSU estão

mais próximas das haloisitas, cuja faixa de valores compreende-se entre 2,0 a 2,55.

Wong (2009) apresentou dados de G_s para RSU, onde valores entre 2,6 a 2,7 foram obtidos para materiais tais como: fragmentos de concreto, solos, fragmentos de vidro, aparas de alumínio e outros metais. O valor de G_s para papéis, papelão e madeira foi de 1,53, enquanto para o resíduo alimentar foi de 1,22 (Yesiller *et al.*, 2014). Outros pesquisadores também obtiveram valores inferiores que variaram de 0,85 a 2,47 (Hettiarachchi, 2005; Entenmann & Wendt, 2007; Reddy *et al.*, 2009 e 2001; Breitmeyer, 2011; Wu *et al.*, 2012; citado por Yesiller *et al.*, 2014). Reddy *et al.* (2009) observaram um aumento de G_s com a diminuição do material orgânico, com valor de 1,09 para resíduo fresco e uma faixa de 2,05 a 2,47 para resíduos com alta degradação (Yesiller *et al.*, 2014). Semelhante observação foi comprovada por Breitmeyer (2011) que para resíduo com 3 a 4 meses de aterramento resultou em G_s igual a 1,3. Outros autores obtiveram valores de G_s de 1,65; 1,80 e 1,9 em experimentos com reatores respectivamente com taxa de degradação variável, desde baixa, média e alta (Yesiller *et al.*, 2014). Valores de G_s baixo não foram observados nessa pesquisa, indicando que na fração fina há maior presença de solo ou dos componentes relatado por Wong (2009), quando os valores de G_s foram mais próximos aos dos solos.

Valores próximos aos encontrados para solos também foram obtidos por Carvalho (1999), apresentando os pesos específicos das partículas de RSU, de amostra retirada entre 0 a 18 metros de profundidade, com valor de 22,41 kN/m³ (correspondendo a 2,28 g/cm³). Para amostras profundas, retiradas entre 18 a 30, os valores foram de 23,35 e 25,07 kN/m³ (correspondendo respectivamente a 2,38 e 2,55 g/cm³). Contudo, este autor constatou que o último valor foi superior aos demais, fato este ocorrido por uma contaminação da amostra com o solo de cobertura, promovendo o aumento deste parâmetro. Tanto os resultados de Carvalho (1999) quanto de Wong (2009) são condizentes, onde a presença de partículas de solo (solo de cobertura) e fragmentos de concreto interferem no valor de G_s .

Gabr & Valero (1995) obtiveram valores de G_s , para resíduos de 15 a 30 anos, de 2,4, observando que, mesmo próximo aos valores de solos, existe uma diferença que se deve à presença de material orgânico em decomposição. Essa pequena redução do valor em relação aos solos é ocasionada pelo fato do peso

específico das partículas orgânicas, tais como papel, vegetais e outros, estar próximo à unidade. Este comportamento é também observado em materiais que estão localizados em profundidade superior a 15 m, para praticamente todos os furos, com exceção do furo 134B, indicando que ainda há presença de material orgânico, mesmo que em pequenas proporções.

Em relação à correspondência entre o valor de G_s e a quantidade de orgânico, Reddy *et al.* (2009) encontrou uma relação entre G_s e o teor de matéria orgânica. Contudo, nenhuma relação entre G_s e o potencial bioquímico de metano foi verificado por Bareither *et al.* (2012) (Yesiller *et al.*, 2014). Nesta pesquisa foi obtida uma correlação não-linear entre o G_s e o teor de MO, esta correlação é considerada alta e negativa (Tabela 7-14), onde quanto maior o teor de MO menor é a densidade relativa dos grãos. O Gráfico 9-1 apresenta a equação de correlação de Spearman como também a correlação num intervalo de confiança de 95 % entre G_s e o teor de MO. Observa-se que mesmo havendo a existência de muitos pontos fora do intervalo de confiança, que resultam num menor valor de R^2 , a relação é forte. Portanto, essa correlação concorda com os dados encontrados por Hettiarachchi (2005); Entenmann & Wendt (2007); Reddy *et al.* (2009 e 2001); Breitmeyer (2011); Wong (2009); Wu *et al.* (2012); citado por Yesiller *et al.* (2014).

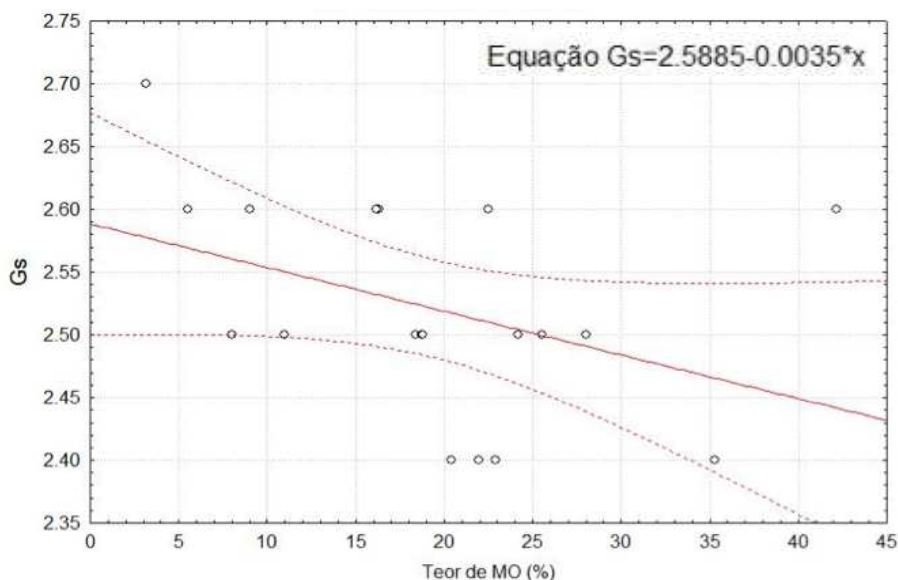


Gráfico 9-1 – Correlação entre G_s e teor de MO

Outras correlações de Spearman foram obtidas para o G_s , entre a porcentagem de papel e de inerte. A fração de papel apresentou uma correlação

moderada e negativa, na qual quanto maior a quantidade de papel, menor é o G_s , o que é reforçado pelos dados dos diversos autores tais como: Gabr & Valero (1995) e Yesiller *et al.* (2014). Já para a fração de inerte a correlação foi moderada e positiva, onde quanto maior a proporção de inertes (madeira, couro, pano, cerâmica e pedregulhos) maior o G_s .

9.2.5 Potencial Hidrogeniônico da fração orgânica

A determinação do pH da fração orgânica em laboratório apresentou valores superiores a 7. O menor valor foi obtido para o resíduo com quase 1 anos, localizado a 5 metros de profundidade no furo 128C. Esse valor reafirma o estágio de decomposição que esse material foi encontrado, e que este tem um maior potencial de geração de gases em relação aos demais. Os outros pontos amostrados mostram valores acima de 7. Esses, conforme mencionado anteriormente, estão na fase de produção desacelerada de metano e, portanto, resultaram em menores produções de gás. As considerações feitas no item 9.1.2 são igualmente válidas.

9.2.6 Teor de Matéria Orgânica e de Sólidos Voláteis

Os teores de MO e SV podem ser utilizados para avaliar o estado de degradação da massa orgânica.

Ao analisar esses teores, notou-se uma pequena diferença entre os teores de MO e SV, ambos apresentam comportamento semelhante. Não foi verificada nenhuma tendência de crescimento ou diminuição desses teores com relação aos perfis de amostragem do material. Esse resultado pode ser reafirmado pela forma gráfica, como mostra o Gráfico 6.21. Já em relação à idade por perfil de amostragem, apenas dois furos apresentaram uma tendência de diminuição até a idade de 3 anos, enquanto que outro apresentou um aumento até 8 anos (como foi apresentado no Gráfico 6.22). Então, ao observar apenas a idade, como mostra o Gráfico 9-2, há uma tendência de diminuição do teor de SV até os primeiros 4 anos. Essa correlação linear moderada foi de R^2 igual a 0,57. Igual valor de R^2 foi obtido para o teor de MO.

Em termos da massa global, como a proporção da fração orgânica apresentou-se sem grandes variações, o comportamento tanto de SV e SV_G são praticamente idênticos, e, portanto, mantida a mesma tendência de diminuição do teor de SV_G até os primeiros 4 anos.

Utilizando o critério apresentado por Kelly (2002), citado por Melo (2010), que considera um material estabilizado quando o teor de SV for inferior a 20 %, conclui-se que, de maneira geral, os pontos amostrados estão praticamente estabilizados, o que resultará numa pequena geração de gases até sua completa mineralização.

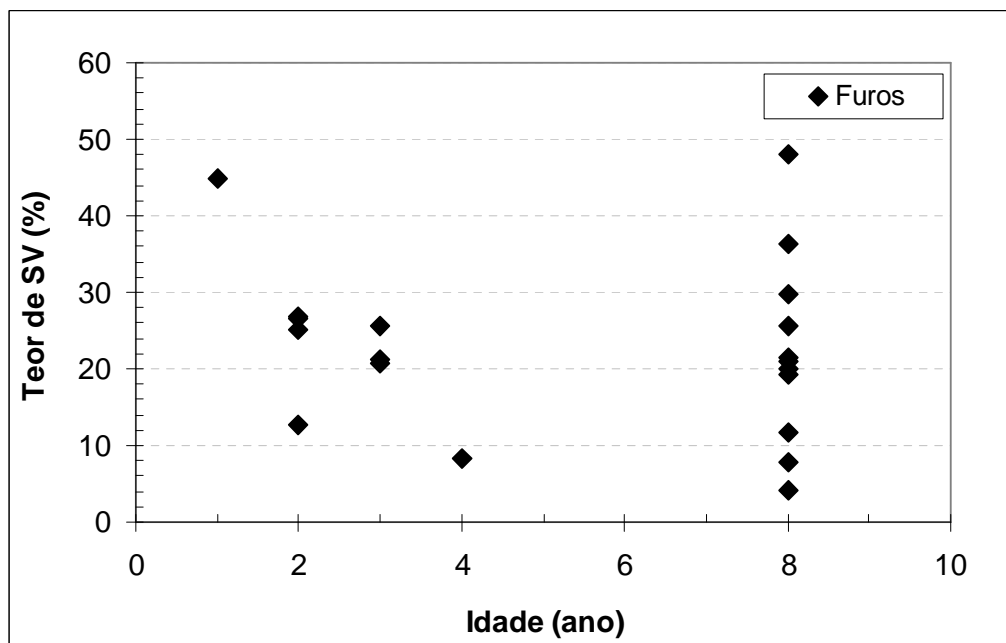


Gráfico 9-2 – Relação entre teor de SV e idade dos RSU

Maciel *et al.* (2009), no Aterro de Muribeca, também encontraram valores baixos do teor de SV para resíduo antigos, com idade de 10 a 15 anos, sendo igual a 8,9 %. Mas, para um resíduo novo foi encontrado um teor maior, de 50,9 %.

Valores altos de teor de SV também foram encontrados nos estudos de Alamgir & Ahsan (2007). Esses obtiveram para resíduos novos, em Bangladesh, valores que variaram de 43 a 71 %, dados que estão concordantes com os resultados obtidos por Laquidara *et al.* (1986). Gomes *et al.* (2005), em Portugal, também obtiveram dados semelhantes para amostras de resíduos sólidos localizadas próximo à superfície (0,6 metros). Para os resíduos aterrados em profundidade entre 10 e 20 m, Gabr & Valero (1995) e Gomes *et al.* (2005)

encontraram teores de 33 % de SV, que é um pouco superior ao obtido por Machado *et al.* (2010). Contudo, valores na faixa de 45 %, assumindo o teor em termos da fração orgânica, foram encontrados apenas para duas profundidades, mas em termos da massa global os valores foram inferiores a 20 %.

Os resultados de Silva *et al.* (1998), citado por Carvalho (1999), demonstraram que a taxa de SV diminui com a idade, com uma redução de 80 % do RSU fresco para o de 15 anos. Tendência análoga foi encontrada por Machado *et al.* (2010). Estes autores observaram para o material “fresco” uma diminuição do teor de SV com o avanço do tempo de deposição no local, onde até os 4 anos após a deposição, ocorre uma queda abrupta do teor, variando de, aproximadamente, 55 % para o RSU “fresco” atingindo valores de 25 % para o com 4 anos. Dos 4 anos até próximo os 10 anos há uma pequena diminuição, podendo ser considerada praticamente constante. Embora a relação da diminuição do teor de SV com a idade tenha sido verificada tanto por Silva *et al.* (1998) quanto por Machado *et al.* (2010), este último encontrou uma taxa de redução inferior ao primeiro, sendo de apenas 36 %.

Neste trabalho, como apresentado no Gráfico 9-2, também foi encontrado a tendência apresentadas por estes últimos autores, considerando o tempo de decomposição, até 4 anos.

9.2.7 Teor de Lignina

Em relação ao perfil de amostragem, nenhuma correlação do comportamento foi observada. Em relação à idade, os furos 128C e 302 apresentaram uma tendência de diminuição do teor com a profundidade.

Pelo Gráfico 9-3 observar-se melhor tal comportamento, uma tendência de diminuição do teor de LG até os 4 anos e, ainda que os materiais de idade de 3 anos apresentem uma variação de aproximadamente 10 %, uma correlação linear moderada foi obtida, excluindo os materiais mais antigos, com R^2 de 0,5.

Aos materiais mais antigos, por sua vez, apresentaram variações numa faixa de 6 a 19 % desse teor, demonstrando não haver relação com os materiais mais novos.

As variações deste teor para cada idade pode ser decorrente do tipo de componente presente. Lamborn (2009) apresentou valores do teor de LG para

folhas da ordem de 43,8 %. Assim, a presença de madeira pode aumentar os valores do teor de LG. Como durante o procedimento de separação da fração orgânica foi observada a presença de madeira e fibras de coco, tais componentes, em quantidades diversas, podem ser considerados responsáveis por estas flutuações de valores para resíduos com mesma idade.

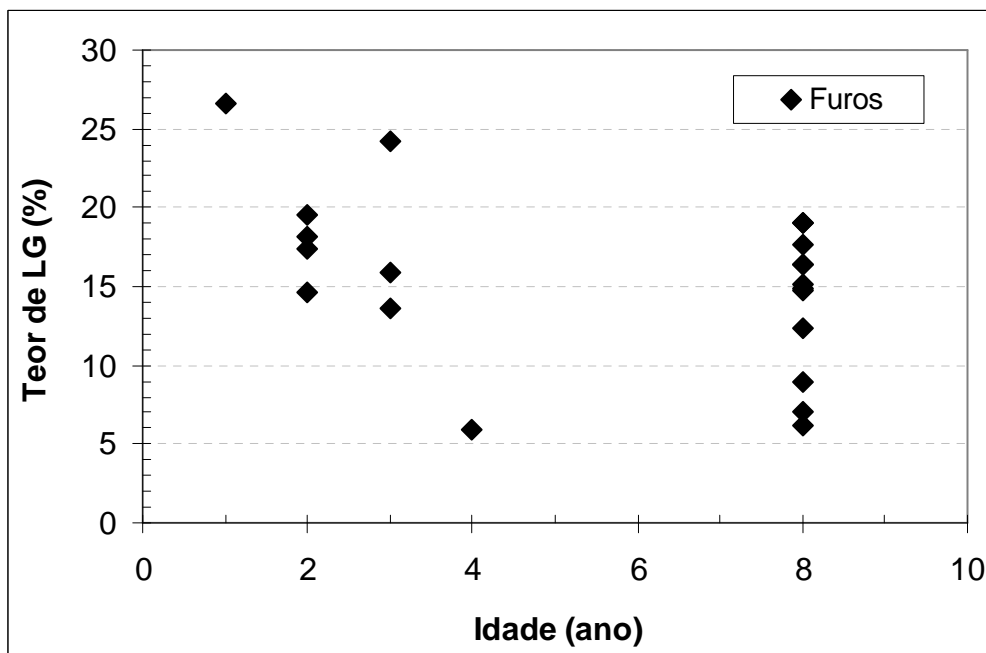


Gráfico 9-3 – Relação entre o teor de LG e a idade dos RSU

A média dos valores obtidos para o teor de LG_G está próxima aos valores encontrados por Alves (2008), que variaram entre 10 a 16 %. Maciel & Jucá (2011) também obtiveram valores semelhantes com os resíduos variando de idades iguais a 15 dias (novo), 1 ano até 15 anos.

Embora os valores de LG apresentados por diversos autores que estudaram resíduos escavados ou antigos tenham sido inferiores à 23 % (Maciel & Jucá, 2011; Pueboobapaphan, 2007; Mehta *et al.*, 2002), Wang *et al.* (1994) encontraram dados ainda maiores.

Os valores encontrados por Wang *et al.* (1994), para resíduos escavados, foram superiores, variando de 68 a 85 %, como foi apresentado na Tabela 2-19 que estão muito acima da faixa ótima para atividade metabólica dos microrganismos, conforme apresentado por Alves (2008). Contudo, Melo (2010) apresentou para resíduos escavados valor de 22 %, que está mais próximo dos dados de LG considerando apenas a fração orgânica dos RSU.

9.3 Ensaio GB₂₁

9.3.1 Furo 128C

Com relação ao perfil de amostragem desse furo, o resíduo localizado a 5 m foi o que apresentou maior produção de biogás (3,7 NL), ocorrendo uma diminuição com a profundidade, alcançando um volume de 0,48 NL para aos 15 m. Igual relação foi observada para a produção máxima de biogás por massa de sólidos voláteis, com um maior valor para o material mais superficial (165,5 NL/kgSV), diminuindo até profundidades maiores e gerando um volume máximo de 0,036 NL/kgSV.

A tendência de diminuição da produção de potencial de biogás com a profundidade é semelhante aos encontrados por Alves (2008), onde houve uma redução de 66 % na produção de biogás do material novo para o de 7 anos. Para este furo a diferença entre o primeiro 5 m e o segundo (10 m) foi de 108 NL/kgSV, uma redução de 63,5 %, próxima àquela obtida por esse último autor. Contudo, a idade entre os resíduos retirados de 5 e 10 m, que variou entre 1 a 3 anos, não foi a mesma da pesquisa realizada por Alves (2008).

Já em relação aos dois últimos pontos amostrados (10 e 15 m) houve uma diminuição da produção de biogás, passando a ser 62 NL/kgSV, o que corresponde a 99,9 % de redução, que é superior a obtida pelo autor. Os resultados de Alves (2008) em um resíduo novo foi de 162 NmL/gSV, que apresentaram-se próximos ao resultado obtido do material mais novo estudado nessa tese.

Outro estudo com semelhante resultado ao encontrado no material mais novo foi o realizado por Owens & Chynoweth (1993). Estes autores estudando resíduos da Florida, em que previamente houve a remoção de metal, vidro e plástico, obtiveram uma produção de 200 NL/kgSV. Mas, nos estudos de Pueboobpaphan (2007) por mais que os valores de produção de biogás tenha sido semelhantes, esta foi encontrada para um resíduo de 20 anos de idade, numa profundidade entre 3 a 5 metros. Ainda que ambos os materiais possam estar localizados numa mesma profundidade, a idade é bastante diferente, sendo esperada uma maior produção de gás no material mais novo.

O resíduo estudado por Pueboobpaphan (2007) possuíam como composição 41 % de material fino, 20,8 % de concreto e 16,2 % de madeira. Este autor comparou o resultado do resíduo com um material composto de madeira e obteve valores próximo, variando entre 100 a 150 mL/gSV, que indicou que o resíduo possuía características semelhantes ao composto de madeira. Portanto, em termos numéricos tal comportamento se parece com o material localizado a 5 m, que além de apresentar valores semelhantes do potencial de biogás, também apresentou a mesma proporção da porcentagem de agregado fino.

Pouco pode ser afirmado em relação aos parâmetros físico-químicos avaliados, de maneira geral, em relação a essa produção de biogás. Talvez, o pH possa ser o parâmetro que melhor descreveu o comportamento relativo ao potencial de produção de biogás porque aos 5 m o pH foi de 6,8, indicando que o material está na fase de produção acelerada de metano. Para as demais profundidades, o valor de pH foi de 7,5, indicando que os materiais deveriam estar na fase de produção desacelerada.

9.3.2

Furo 131

Com relação ao perfil de amostragem desse furo, o resíduo localizado a 15 m foi o que apresentou maior produção de biogás (1,24 NL), ocorrendo uma diminuição a partir desta profundidade até 30 m, do qual não produziu gás. A diferença entre os 15 e 25 m é cerca de 9 NL/kgSV, proporcional a uma redução de aproximadamente 17 %.

Ao comparar o resultado da produção de gás nas amostras de 5 m de profundidade com as de 15 m, seria esperado que as primeiras apresentassem uma maior produção de gás, já que materiais em maior profundidade apresentariam maior tempo de decomposição e, portanto, menor produção de gás. Contudo, isto não ocorreu. Mas, ainda que o comportamento não tenha sido o esperado, ao analisar a quantidade do teor de MO apresentado por cada um deles, observa-se que aos 15 m o teor é maior, o que justificaria a maior produção de biogás em relação à amostra mais superficial.

Tal ocorrência é detectada ainda entre as profundidades de 5 e 25 m, onde a produção de gás dos resíduos retirados na menor profundidade é inferior a da maior e, o teor de MO é maior na profundidade de 25 m que a 15 m.

A pouca produção de gás para os resíduos de 30 m está em conformidade com os seus dados físico-químicos, visto que apresenta teores de MO muito reduzido, que estão dentro da faixa nas quais o material passa a ser considerado como estabilizado, além de se tratar de um material antigo, com mais de 8 anos de deposição.

Owens & Chynoweth (1993) obtiveram valores de 38 NL/kgSV para um resíduo após processo de digestão, que está próximo ao encontrado para o resíduo localizado a 25 m. Isto sugere que, nesta profundidade, o material já sofreu o processo de digestão, não sendo esperadas gerações significativas de biogás.

Os volumes de biogás do furo 131 apresentaram-se, com exceção do material de 5 m, correlacionados com os parâmetros da matéria orgânica, o que não foi verificado para o furo 128C.

De acordo com a literatura (Kelly, 2002, citado por Melo, 2010), o material com teor de SV inferior a 8% apresenta-se estável e, portanto, não apresentaria mais produção de biogás. Entretanto, as amostras localizadas a 30 m de profundidade e com 9 % de MO não apresentaram produção de biogás, mas as de 5 m e com percentual semelhante de MO, de 9 %, produziram quantidade razoável de biogás, o que contradiz os dados já publicados.

9.3.3 Furo 134B

Os dados de volume acumulado como o potencial de geração de biogás desse furo são bem próximos aos do furo 131 para a profundidade de 25 m. As características físico-químicas, como teor de SV, os teores de LG e os valores de pH também são semelhantes. Embora as profundidades e idades sejam muito distintas, com o material de 5 m do furo 134B com 2 anos e o do furo 131 possui mais de 8 anos, sendo esperado comportamentos diferentes de produção de gás, esse resultado indica que os fatores que mais influenciam a proximidade entre esses resultados foi o teor de SV.

9.3.4 Furo 161A

Analisando o perfil do furo 161A, o volume de gás acumulado não variou com a profundidade, indicando que estes materiais que possuem mais de 8 anos com exceção do primeiro que possui 4 anos, já estão estabilizado.

Embora os demais parâmetros apresentem uma diferença, nenhuma correlação linear foi verificada.

9.4 Parâmetros obtidos pelo ajuste à função de von Bertalanffy

Em relação aos valores dos parâmetros cinéticos (k), esses estão próximos aos apresentados por Firmo (2013). Já o comportamento é diferente, pois esse autor encontrou uma tendência de diminuição de k com a idade do resíduo, passando de 0,161 num material novo a 0,05 para um material de 5 anos, o que não foi verificado nesse estudo.

Os resultados dos parâmetros de $B_{\mu\text{CH}_4}$ e $L_{o\text{CH}_4}$ são influenciados pelo tipo e pelo estado material e, embora não tenha sido verificado uma tendência de comportamento com a idade/profundidade. A ordem de grandeza desses valores, tanto em termos de biogás quanto de metano, está condizente com a ordem obtida por Firmo (2013) em reatores.

As correlações de Spearman, com intervalo de confiança de 95 %, para de B_{μ} e L_o com relação ao teor de MO são apresentadas, respectivamente, no Gráfico 9-4 e no Gráfico 9-5.

As correlações de Spearman para ambos os parâmetros apresentados nesses gráficos são consideradas estatisticamente como fortes (Tabela 7-14) e observa-se que, praticamente, todos os pontos estão dentro do intervalo de confiança.

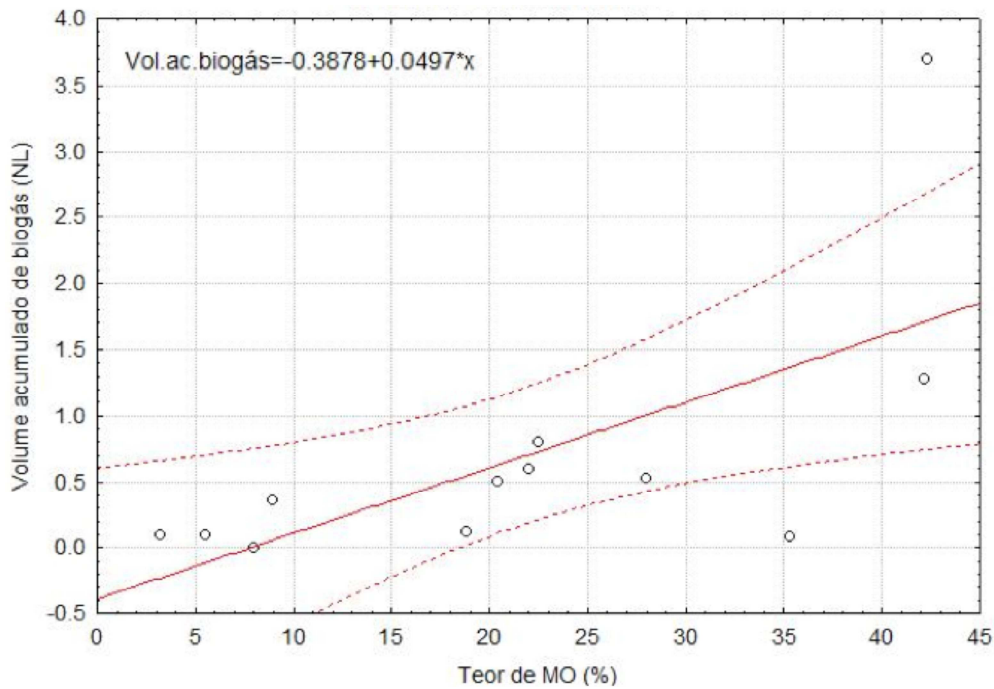


Gráfico 9-4 - Correlação entre volume acumulado de biogás e teor de MO

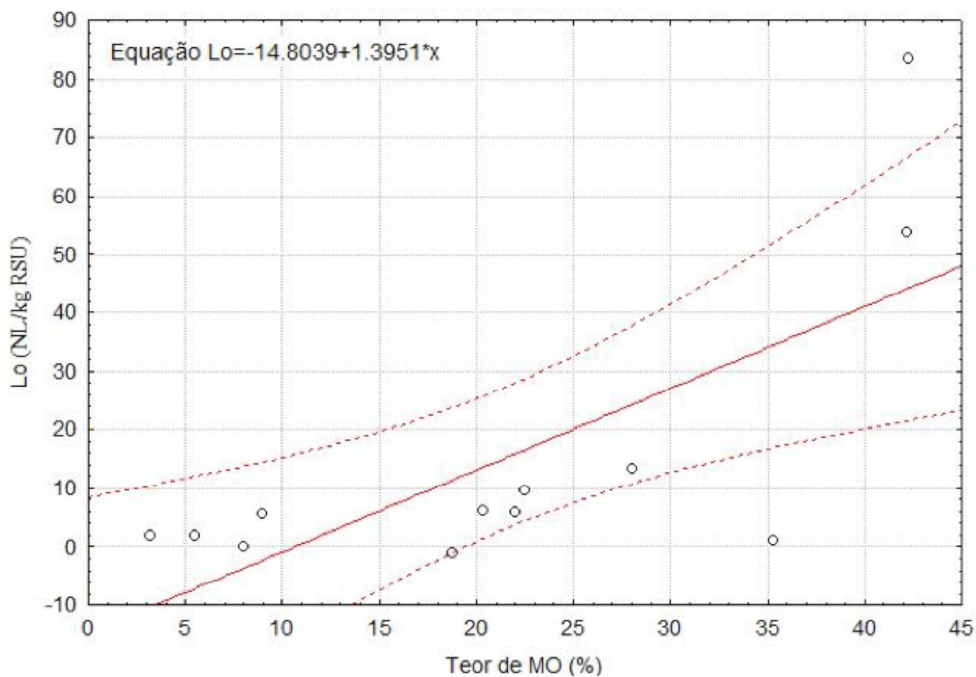


Gráfico 9-5 - Correlação entre L_o e teor de MO

As correlações de Spearman para de B_μ e L_o com relação ao teor de SV são apresentadas, respectivamente, no Gráfico 9-6 e no Gráfico 9-7.

Essa correlação em termos de teor de SV, para os parâmetros B_μ e L_o , foram semelhantes às do teor de MO e, portanto, as correlações obtidas também foram consideradas fortes (Tabela 7-14). Observa-se que apenas dois pontos estão fora do intervalo de confiança de 95 %.

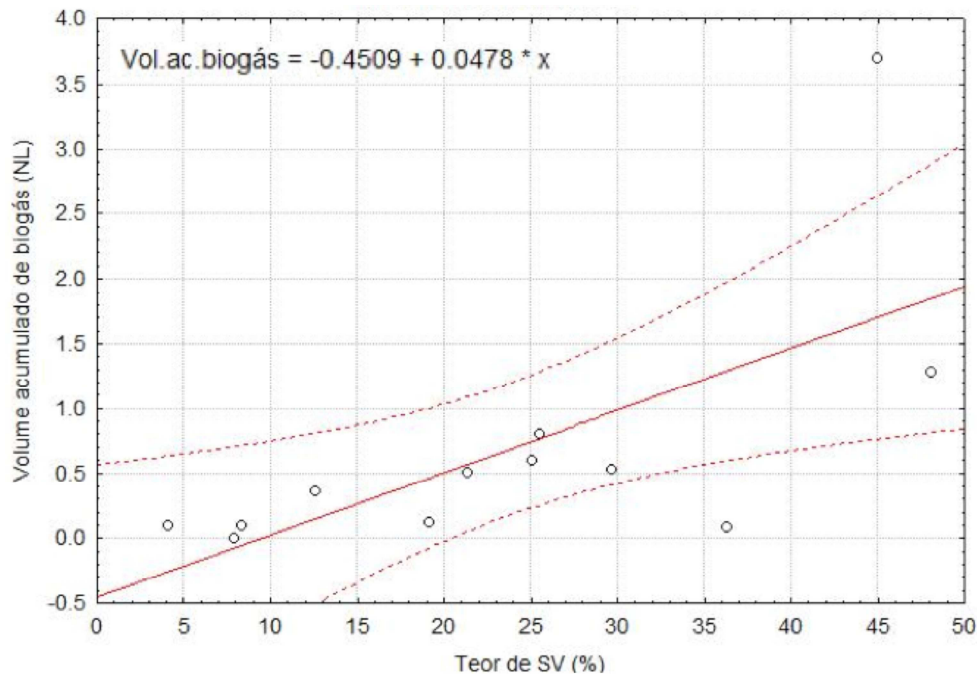
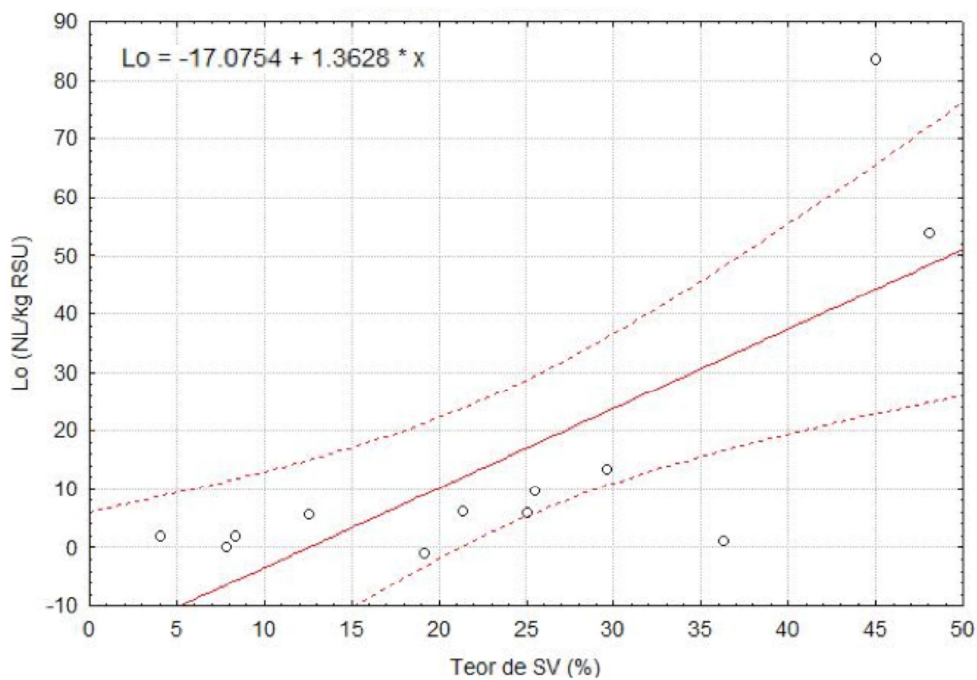


Gráfico 9-6 - Correlação entre volume acumulado de biogás e teor de SV

Gráfico 9-7 - Correlação entre L_0 e teor de SV

Em relação aos parâmetros do ensaio GB_{21} , tais como volume acumulado de biogás e L_0 , foram obtidas correlações em relação aos teores de MO, SV (Gráfico 9-6 e Gráfico 9-7) e LG.

Os $t_{1/2}$ foram muito inferiores aos recomendados pela EPA/IPCC que utilizam um tempo de decaimento de 15 anos. Essa ordem de grandeza não foi obtida nem para o material mais novo que apresentou um dos maiores tempos de

meia-vida que foi de 63 dias, indicando que mesmo o este terá um decaimento muito rápido. Para as idades superiores a 8 anos, esse resultado seria aceitável, visto que já teriam passado mais tempo pelo processo de decomposição e, portanto, faltaria pouco tempo para sua completa degradação.

Os resultados de Firmo (2013) em reatores apresentaram $t_{1/2}$ variando de 54 a 190 dias, que, de maneira geral, é muito superior aos encontrados nesse estudo, com variação de 6 a 63 dias. Mas, ainda que tenha apresentado diferenças significativas, indica a existência de um fator de escala entre os tipos de ensaio/medição. Visto que os ensaios ocorrem em condições controladas, num recipiente hermético e todos os co-produtos da degradação permanecem no mesmo “ambiente”, já no campo, para as camadas superficiais há a influência da variação de pressões atmosféricas, o que pode favorecer ou não a saída de gases, a entrada e saída de fluidos, o que pode por um lado aumentar a umidade e promover uma diluição das concentrações dos elementos que foram convertidos ou que estão no estado líquido como também há a drenagem dos lixiviados do aterro, que pode modificar a dinâmica das reações. A relação entre os tipos de ensaio/medição não foram encontrados na literatura, e o uso dos parâmetros laboratoriais pode propiciar num erro ao utilizar o parâmetro cinético.

9.5 Prognósticos da geração de metano

O uso dos modelos adotados nessa tese para estimar a geração de biogás a partir de RSU normalmente são realizado com base nos parâmetros *default*. Para o modelo IPCC além dos dados recomendados, permite realizar o cálculo de um dos parâmetro de entrada, o DOC. As estimativas de produção de gás pelos modelos LandGEM e IPCC, seguindo as recomendação dos próprios modelos, sobrestimaram as gerações de gases, pois tanto os parâmetros da taxa de degradação como também o de carbono orgânico degradável apresentaram-se inferiores aos recomendados por esses modelos.

Das hipóteses assumidas nessa tese tanto em relação a sua variação no tempo como também com os parâmetros representativos do ano de deposição, o uso dos valores de k e L_0 obtidos experimentalmente para o modelo LandGEM, ainda que apenas para os resíduos com idade de 1 a 4 anos, sendo usados para os

demais anos/idades os parâmetros *default*, os prognósticos de geração de metano dessas hipóteses foram inferiores a obtida com apenas os parâmetros *default*. Para o modelo IPCC, com o uso do parâmetro k obtido experimentalmente, os valores de emissões obtidos pelas hipóteses assumidas foram inferiores ao estimado pelo uso dos parâmetros *default* desse modelo.

Como o modelo IPCC leva em relação outros parâmetros, sendo um deles o DOC que esta finculado à quantidade de carbono, uma análise por retroanálise permite avaliar qual é esse teor a partir do comportamento experimental da curva de produção de biogás.

A retroanálise resultou em teores de DOC inferiores aos recomendados pelo modelo ou obtidos pelo cálculo do teor de DOC_i vezes a quantidade de massa de resíduo aterrado. Esse resultado foi bastante esperado, pois a quantidade de carbono é degradada com o tempo, promove uma redução desses teor.