ESTUDO DA ACÇÃO DE AGENTES DE DEGRADAÇÃO NO COMPORTAMENTO À TRACÇÃO DE GEOMEMBRANAS

Study of the influence of degradation agents on the tensile behaviour of geomembranes

M. LURDES LOPES *
A. VIEIRA MONTEIRO **

RESUMO - Neste trabalho avaliar-se-á a influência de agentes de degradação no comportamento à tracção de geomembranas lisas em polietileno de alta densidade.

Para tal, seleccionaram-se de uma dada marca três geomembranas com espessuras diferentes (1mm, 1,5mm e 2mm) as quais foram submetidas por períodos de 5, 15 e 30 semanas à acção de: agentes atmosféricos; temperaturas elevadas; lixiviado de um aterro de resíduos sólidos urbanos; soluções ácida, alcalina e de cloreto de sódio.

Para cada agente de degradação foram definidas a resistência à tracção e a elongação na cedência, no fim de cada período de exposição, tendo-se comparado os valores obtidos com os valores dos mesmos parâmetros da amostra virgem.

Neste trabalho descrever-se-ão os materiais utilizados e as metodologias de análise seguidas, analisar-se-ão os resultados obtidos e formular-se-ão as conclusões julgadas mais importantes face aos resultados obtidos.

SYNOPSIS - In this paper the influence of degradation agents on the tensile behaviour of smooth, high density poliethylene geomembranes will be analysed. Three geomembranes of the same brand with different thickness were selected. The geomembranes were submitted for periods of 5, 15 and 30 weeks to the action of: natural weathering; high temperatures; urban solid waste leachate; acid, alkaline and sodium chloride solutions.

The tensile strength and the elongation at yield were defined, for each degradation agent, at the end of each period of exposure and the results compared with that of the virgin sample.

In this work materials and methodologies of analysis will be described, the obtained results will be analysed and the main conclusions will be put forward.

1 - INTRODUÇÃO

Por razões relacionadas com a sua constituição e fabrico os geossintéticos são materiais que podem sofrer alterações nos valores das suas propriedades por acções mecânicas, físicas, químicas e biológicas.

O conhecimento acerca do modo como estes agentes influenciam o comportamento dos geossintéticos constitui, actualmente, uma das áreas prioritárias de investigação, pois somente através desse conhecimento é possível assegurar a eficácia dos geossintéticos no exercício das funções que lhes estão atribuídas ao longo da vida das obras em que estão inseridos.

* Doutora em Engenharia Civil, Professora Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

** Mestre em Engenharia do Ambiente, Assistente da Universidade Fernando Pessoa.

A diversidade de materiais constituintes e de estruturas dos geossintéticos faz com que o mesmo agente de degradação possa influenciar de um modo distinto o comportamento de um dado tipo de geossintético (estrutura idêntica) com diferentes constituições e diferentes tipos de geossintéticos (estruturas distintas) com a mesma constituição. Esta circunstância leva a que a generalização dos comportamentos observados deva ser feita com prudência, atendendo, por um lado, à estrutura do geossintético, e por outro, à sua constituição (polímeros e aditivos).

Com o objectivo de lançar algum esclarecimento acerca do modo como alguns agentes de degradação físicos e químicos podem afectar o comportamento mecânico das geossintéticos, nomeadamente o comportamento à tracção, seleccionaram-se três geomembranas lisas em polietileno de alta densidade da mesma marca mas com espessuras distintas.

Os materiais foram submetidos, por períodos de 5, 15 e 30 semanas, à acção de: agentes atmosféricos naturais; temperaturas elevadas (65°C e 105°C); lixiviado de um aterro de RSU; soluções ácida, alcalina e de cloreto de sódio.

De notar, que estes agentes de degradação podem coexistir em estruturas reais, nomeadamente em aterros de resíduos, que é uma estrutura ambiental onde a aplicação de geomembranas e outros geossintéticos está generalizada e cujo funcionamento adequado se baseia, em larga medida, na eficácia das funções requeridas aos geossintéticos.

No caso particular das geomembranas aplicadas em aterros de resíduos, estas poderão estar expostas aos agentes atmosféricos naturais por períodos mais ou menos longos durante a fase de construção e, eventualmente, de exploração (por exemplo, no caso do geotêxtil de protecção sofrer degradação excessiva. Por sua vez, estão expostas aos lixiviados já que são, normalmente, colocadas em conjunto com geotêxteis (materiais permeáveis) em fronteiras com as camadas drenantes. A temperatura elevada é outro agente, sempre presente em aterros de resíduos, responsável pela degradação das geomembranas, sendo na fase de degradação anaeróbica dos resíduos cerca de 50°C, podendo localmente ser mais elevada. Por esta razão, nos ensaios realizados optou-se por um valor de temperatura um pouco superior à média, e por outro, significativamente superior com vista à obtenção de informação acerca do comportamento das geomembranas em situações mais desfavoráveis do que a considerada média.

As soluções consideradas foram realizadas em laboratório e a submissão das geomembranas à sua acção visa, fundamentalmente, simular teoricamente a situação de lixiviados de resíduos com pH do lado ácido (como pode acontecer com alguns resíduos industriais) e do lado alcalino (caso de alguns resíduos industriais e urbanos). O estudo do comportamento das geomembranas sujeitas a acção da solução de cloreto de sódio tem por objectivo lançar algum esclarecimento acerca do modo como soluções com elevado teor em sal (constituinte comum da alimentação portuguesa e sempre presente no caso de utilização de geomembranas em obras marítimas ou costeiras) pode actuar no comportamento destes materiais.

No final de cada período de exposição, e para cada agente de degradação, efectuou-se a definição da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas, comparando-se os resultados obtidos com os da amostra virgem. Deste modo, procurou-se definir a influência no comportamento à tracção das geomembranas da acção dos agentes de degradação por períodos máximos de 30 semanas (cerca de 7,5 meses).

De referir que o estudo da influência dos agentes de degradação referidos no comportamento à tracção das geomembranas consideradas foi feito procurando avaliar, não só o papel de cada agente de degradação, mas também o modo como a espessura do material pode afectar esse papel.

Estudo semelhante ao que será exposto ao longo deste trabalho foi levado a cabo para três geotêxteis não tecidos agulhados de filamento longo em polipropileno da mesma marca, mas com massas por unidade de área diferentes, encontrando-se os resultados desse estudo publicados em Lopes e Monteiro (1999).

2 - MATERIAIS E ENSAIOS DE CONTROLO

As geomembranas ensaiadas eram lisas em polietileno de alta densidade com 1mm, 1,5mm e 2mm de espessura. Ao longo deste trabalho estas geomembranas serão designadas, respectivamente, por GM1, GM1,5 e GM2.

O ensaio de controlo considerado foi o de tracção - elongação, segundo a norma NF T54 - 102, tendo-se apenas ensaiado os provetes na direcção de produção.

O estudo foi desenvolvido avaliando os valores da resistência à tracção e da elongação na cedência das amostras virgens, os quais foram considerados como correspondentes a 100%. Os valores obtidos para os mesmos parâmetros após exposição aos agentes de degradação foram comparados com os anteriores e indicados, também, em percentagem (superior a 100%, no caso de aumento do parâmetro, e inferior a 100%, no caso de redução).

Tal como já foi referido, os agentes de degradação considerados no estudo foram: os atmosféricos naturais; as temperaturas elevadas (65°C e 105°C); o lixiviado de um aterro de RSU; e soluções ácida, alcalina e de cloreto de sódio.

A exposição aos agentes atmosféricos naturais, ao lixiviado de resíduos sólidos urbanos e às soluções ácida, alcalina e de cloreto de sódio foi levada a cabo no aterro de resíduos sólidos urbanos de Matosinhos, tendo a exposição às temperaturas de 65°C e 105°C sido efectuada em duas estufas. Os ensaios mecânicos de controlo do comportamento das geomembranas foram realizados no sector de geossintéticos do laboratório de Geotecnia da FEUP.

Os três períodos de exposição das geomembranas a cada agente de degradação foram de 5, 15, e 30 semanas. O número de provetes ensaiados à tracção-elongação de cada geomembrana foi de 132, ou seja, foram ensaiados um total de 396 provetes (ver Quadro I).

Os provetes imersos em líquidos foram suspensos em fios de nylon com 0,5mm de diâmetro espaçados, pelo menos 5mm. Todos os provetes sujeitos aos diferentes agentes de degradação foram, no final do período de exposição, cuidadosamente limpos e colocados em repouso durante 48 horas. Os que estiveram sob a acção das soluções foram lavados com água corrente, sendo a secagem dos mesmos foi feita no interior de uma sala, por forma a evitar a incidência da luz solar.

3 - ENSAIOS DE DEGRADAÇÃO

As metodologias utilizadas nos ensaios de degradação das geomembranas foram idênticas às utilizadas no mesmo tipo de ensaios com geotêxteis, encontrando-se amplamente descritas em Lopes e Monteiro (1999). Por este motivo, neste trabalho far-se-á apenas uma referência sucinta a essas mesmas metodologias.

3.1 - Agentes atmosféricos

As amostras de geomembranas expostos aos agentes atmosféricos foram colocadas sobre estruturas horizontais em cantoneira de ferro e rede de arame posicionadas a cerca de 0,50m do solo. Como agentes atmosféricos considera-se, não só as radiações ultravioletas (um dos principais agentes de alteração das propriedades dos geossintéticos, pois conduzem à quebra

das ligações poliméricas), mas também, outros agentes que, directa ou indirectamente, intervêm na alteração das propriedades das geomembranas, tais como: a chuva, o vento, a humidade e a temperatura.

Quadro I - Número de provetes ensaiados à tracção-elongação.

Agentes de degradação		Tempo (semanas)	Geomembranas		
			GM1	GM1,5	GM2
Inexistente (provetes virgens)		-	6	6	6
Atmosféricos		5	6	6	6
		15	6	6	6
		30	6	6	6
Temperatura	65ºC	5	6	6	6
	105ºC	5	6	6	6
	65ºC	15	6	6	6
	105ºC	15	6	6	6
	65ºC	30	6	6	6
	105ºC	30	6	6	6
Lixiviado		5	6	6	6
		15	6	6	6
		30	6	6	6
Solução ácida		5	6	6	6
		15	6	6	6
		30	6	6	6
Solução alcalina		5	6	6	6
		15	6	6	6
		30	6	6	6
Solução de cloreto de sódio		5	6	6	6
		15	6	6	6
		30	6	6	6

3.2 - Lixiviado

Um lixiviado é constituído por todos os líquidos e sólidos em suspensão, resultantes da deposição e decomposição dos resíduos nos aterros e que percolam através destes.

Com o objectivo de estudar a degradação mecânica das geomembranas sujeitas à acção de um lixiviado de um aterro de RSU construiu-se um cesto em estrutura de madeira revestida a rede plástica, no interior do qual foram colocados os provetes dos materiais. Este cesto foi totalmente mergulhado na lagoa de lixiviados do aterro de resíduos sólidos urbanos de Matosinhos. As características médias desse lixiviado durante o período de imersão eram as seguintes:

- Amoníaco ..... 1098,00 mg/l
- Azoto Kjeldahl ..... 1285,67 mg/l
- pH 9,55
- Temperatura ..... 17,50 ºC

- Oxidabilidade ..... 1245,00 mg/l
- Fósforo ..... 202,00 mg/l
- CBO_5 ..... 444,50 mg/l
- CQO ..... 4344,67 mg/l
- Resíduo seco total ..... 17689,50 mg/l
- Resíduo seco volátil ..... 7118,50 mg/l
- Sólidos suspensos totais ..... 743,00 mg/l
- Sólidos suspensos voláteis ..... 607,00 mg/l
- Oxigénio dissolvido ..... 0,00 mg/l
- Magnésio ..... 155,00 mg/l
- Arsénio ..... <0,0012 mg/l
- Cádmio ..... 0,16 mg/l
- Crómio total ..... 0,21 mg/l
- Cobre ..... 0,85 mg/l
- Mercúrio ..... <0,0001 mg/l
- Níquel ..... 1,04 mg/l
- Chumbo ..... <0,0001 mg/l
- Selénio ..... <0,0001 mg/l
- Zinco ..... 0,49 mg/l

De todas as acções de degradação consideradas a do lixiviado e dos agentes atmosféricos são aquelas que lidam com os agentes reais, fornecendo, por isso, resultados inequívocos para o tempo de exposição considerado. É, no entanto, de referir que em conjunto com o lixiviado podem co-existir outros agentes, potenciadores ou inibidores da acção de envelhecimento por parte deste, como são, no primeiro caso, as temperaturas elevadas, e que não são considerados neste estudo actuando em simultâneo com ele.

3.3 - Solução ácida

Com a submissão dos provetes de geomembranas à acção de uma solução ácida pretendeu-se estudar o efeito sobre estas da acção de uma solução com pH muito baixo (1,5), para assim poder conhecer o comportamento destes materiais sob condições de agressividade elevada, como pode acontecer no caso de alguns lixiviados de aterros de resíduos industriais.

A solução ácida foi preparada com ácido sulfúrico e ácido nítrico por serem ácidos de baixo custo e de fácil obtenção no mercado, por serem ácidos fortes e, no caso do segundo, por ser fortemente oxidante.

Foi preparada uma solução de ácido sulfúrico na proporção de 2 partes de água para uma de ácido, num total de 15 ml. Misturou-se a solução obtida com 400 ml de água, do abastecimento público, em pequenas porções, controlando continuamente o pH. Na mistura de 400 ml estavam presentes cerca de 4 ml de ácido sulfúrico. Para conferir à solução condições oxidantes adicionou-se à mistura anterior cerca de 100 ml de ácido nítrico. Durante o tempo de exposição dos provetes à solução ácida o pH foi sistematicamente controlado e mantido constante e igual a 1,5.

3.4 - Solução alcalina

Embora, o pH do lixiviado de RSU considerado no estudo esteja do lado alcalino (9,55), optou-se por estudar a acção sobre as geomembranas de uma solução com um valor de pH superior (12,5), procurando-se deste modo conhecer, não só a influência no comportamento destes materiais de soluções alcalinas com pH mais elevado, mas também a influência nesse mesmo comportamento da presença dos outros elementos constituintes do lixiviado.

A solução alcalina utilizada nos ensaios de degradação das geomembranas foi preparada recorrendo à utilização de hidróxido de sódio. O método de preparação da solução foi semelhante ao utilizado na preparação da solução ácida. Assim, foi feita uma solução inicial de 2,47 g de hidróxido de sódio em 40 ml de água do abastecimento público. Esta solução foi adicionada a 400 ml de água da mesma origem, controlando sempre o pH. Foi conseguido um pH de 12,50 com 30 ml de solução alcalina inicial, contendo cerca de 1,86 g de hidróxido de sódio.

À semelhança do que aconteceu com a solução ácida, ao longo da exposição das geomembranas à solução alcalina houve a necessidade de compensar as perdas por evaporação, quer juntando água, quer juntando hidróxido de sódio com vista à manutenção do pH constante e igual a 12,5.

3.5 - Solução de cloreto de sódio

O estudo do efeito degradativo de uma solução de cloreto de sódio nas geomembranas pretendeu simular o efeito da exposição destes materiais à acção da água salinizada. Para realizar a solução colheu-se água do mar numa praia do concelho de Matosinhos. Após um período de repouso de 12 horas retirou-se uma amostra com 100 ml para um balão previamente pesado. Seguidamente, levou-se a amostra à ebulição durante o tempo necessário para que toda a água presente se evaporasse. O balão foi levado até à temperatura ambiente num excicador de modo que o peso da matéria presente não sofresse alteração devido à absorção de humidade existente no ar. O conjunto balão e matéria foi pesado. O peso da matéria existente na amostra de água de mar colhida foi calculado a partir da diferença entre o peso do conjunto balão e matéria e o peso do balão vazio, assumindo-se como sendo este o peso de cloreto de sódio (NaCl) existente na amostra, apesar de se saber que existem outros elementos dissolvidos na água do mar e que os resultados obtidos podem não expressar correctamente a concentração de NaCl.

O procedimento de medição da concentração da solução foi repetido 4 vezes, sendo o valor considerado no estudo a média dos 4 valores obtidos, ou seja, cerca de 3,29 g por cada 100 ml de água do mar, sendo a concentração de NaCl na solução utilizada de 33,7 g por cada litro de água.

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Exposição atmosférica

Deve entender-se por exposição atmosférica a exposição dos materiais aos agentes meteorológicos. Para o estudo do efeito das acções meteorológicas procedeu-se à exposição das amostras de geomembranas no topo de uma célula fechada do Aterro de Resíduos Sólidos

Urbanos de Matosinhos cujas coordenadas são as seguintes: latitude 41,24° Norte e longitude 8,75° Oeste. As amostras foram colocadas em estruturas metálicas horizontais a cerca de 0,50 m de distância ao solo.

Foram consideradas algumas variáveis que de alguma forma podem influenciar a acção dos agentes atmosféricos, são elas: a humidade relativa do ar, as temperaturas máxima e mínima do ar e a precipitação. O Quadro II mostra a variação destas grandezas, em valor médio, ao longo dos três intervalos da exposição das geomembranas.

A Figura 1 mostra a variação da resistência à tracção e a da elongação na cedência das geomembranas após exposição aos agentes atmosféricos, por diferentes períodos.

Quadro II -Valores médios dos parâmetros atmosféricos controlados durante a exposição das geomembranas.

	Geomembranas (semanas)		
	0 a 5	5 a 15	15 a 30
Temperatura máxima (°C)	20,70	20,90	23,00
Temperatura mínima (°C)	10,00	12,70	14,80
Precipitação (mm)	0,40	3,07	1,58
Humidade relativa (%)	76,20	73,50	80,40

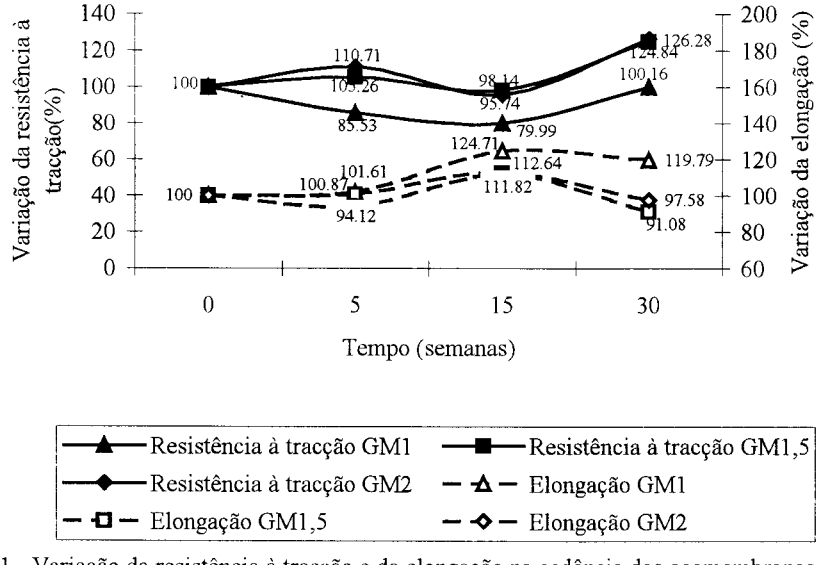


Figura 1 - Variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas após a exposição aos agentes atmosféricos.

A geomembrana de menor espessura (GM1) evidencia, até às 15 semanas de exposição, uma redução sistemática da resistência à tracção na cedência que atinge no final deste período

cerca de 20%. Porém, para o período mais longo de exposição (30 semanas) não se notam variações significativas nessa resistência.

As restantes geomembranas consideradas (GM1,5 e GM2) não mostram um comportamento sistemático nos dois primeiros períodos de exposição. Porém, tal como com a GM1, nota-se ao fim de 30 semanas de exposição aos agentes atmosféricos um acréscimo da resistência em relação ao período anterior (15 semanas). Ao fim de 30 semanas de exposição a variação, em relação ao valor inicial, da resistência à tracção das GM1,5 e GM2 é máxima e, respectivamente igual a 24,84% e 26,28%.

Para a geomembrana menos espessa (GM1) a elongação aumenta 19,79% para as 30 semanas de exposição, evidenciando a plastificação do material. Pelo contrário, para o mesmo período de exposição, as geomembranas GM1,5 e GM2 sofrem uma diminuição de elongação.

A geomembrana GM1 mostra um comportamento um pouco distinto do das outras duas consideradas. Com efeito, para esta geomembrana pode dizer-se que, em termos gerais, a exposição aos agentes atmosféricos conduz a um comportamento mais dúctil do material, ou seja, redução de resistência associada ao aumento de elongação e à redução da rigidez do material (ver Figura 2). Para as duas restantes espessuras ensaiadas constata-se um comportamento mais frágil do material para o máximo de tempo de exposição. No entanto, para períodos de exposição menores este comportamento não é constante.

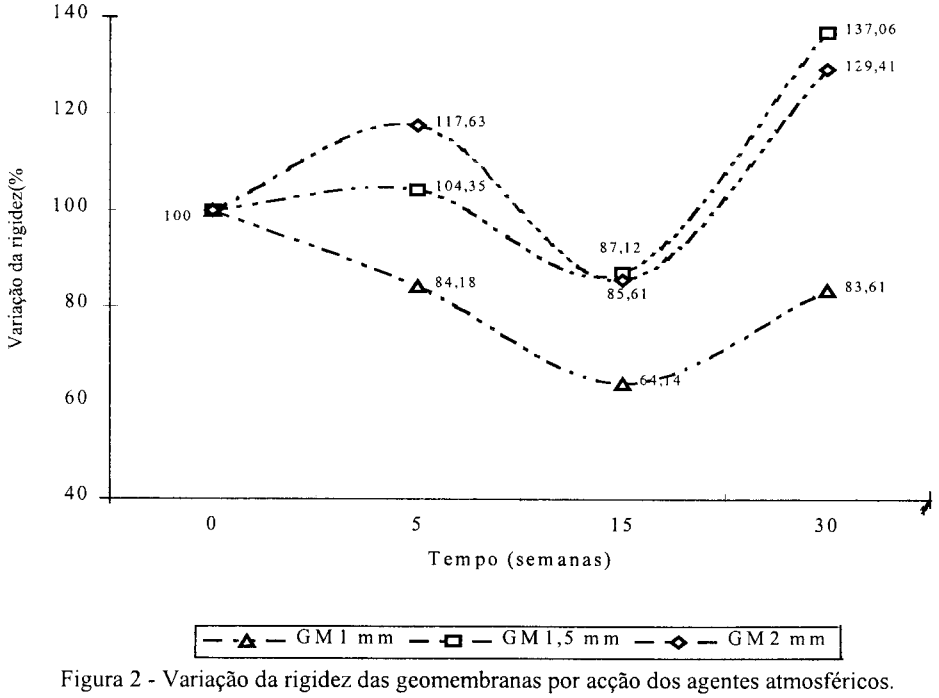
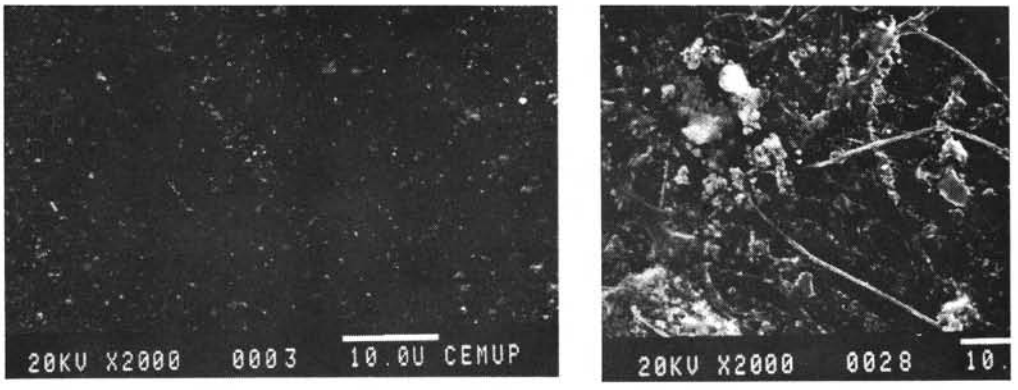


Figura 2 - Variação da rigidez das geomembranas por acção dos agentes atmosféricos.

As Figuras 3 e 4 mostram através de fotografia obtida por microscopia electrónica de varrimento com ampliação de 2000 vezes a alteração da superfície da GM2 (Figura 3) e da GM1 (Figura 4) após exposição por 30 semanas aos agentes atmosféricos. De referir que o

aspecto visual do material virgem das GM1 e GM2 é em tudo idêntico razão pela qual apenas se apresenta o relativo a um dos materiais.

A geomembrana GM2 ao fim de 30 semanas de exposição apresenta um aspecto mais alterado do que a GM1, evidenciando maiores áreas de solidificação, provavelmente responsáveis pelo seu comportamento mais frágil.



a) b)

Figura 3 – Fotografia obtida por microscopia electrónica de varrimento com ampliação 2000x da geomembrana de 2mm de espessura: a) material virgem; b) após exposição por 30 semanas à acção dos agentes atmosféricos.

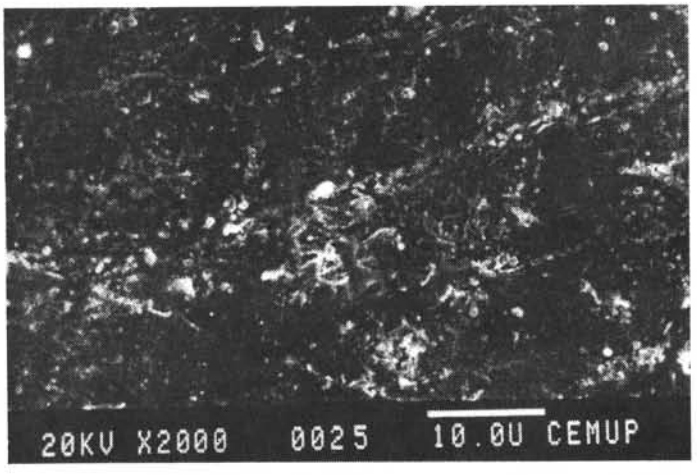


Figura 4 – Fotografia obtida por microscopia electrónica de varrimento com ampliação 2000x da geomembrana de 1mm de espessura após exposição por 30 semanas à acção dos agentes atmosféricos.

A estrutura das geomembranas (mais compacta e homogénea do que a dos geotêxteis) leva a que a degradação por acção das radiações ultra-violetas atinja em primeiro lugar as camadas mais superficiais, sendo o sentido da alteração das camadas externas para as camadas internas. No entanto, sendo a quantidade de polímero presente maior nas geomembranas mais espessas, qualquer amolecimento resultante da acção de temperaturas elevadas conduz a maiores áreas solidificadas quando essas temperaturas se reduzem tal como mostram as Figuras 3 e 4.

4.2 - Exposição às temperaturas de 65°C e 105°C

Para estudar o efeito da temperatura no comportamento à tracção das geomembranas consideradas no presente estudo colocaram-se provetes dos materiais em duas estufas às temperaturas de 65°C e de 105°C. É de referir, no entanto, que depois dos materiais terem sido submetidos a estas temperaturas os provetes estiveram em repouso durante 48 horas à temperatura de 23 ± 2 °C e à humidade relativa de 50 ± 5%, tendo sido esta a atmosfera de ensaio dos provetes. Este procedimento, exigência da norma de ensaio, leva a resultados diferentes daqueles que se obteriam se fosse possível ensaiar os materiais imediatamente após à sua retirada da estufa, já que há um claro arrefecimento destes indutor de acréscimo de resistência e redução de elongação, uma vez que o material constituinte das geomembranas é um termoplástico.

A Figura 5 mostra a variação dos valores (em percentagem) da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas após a submissão à acção da temperatura a 65°C por diferentes períodos.

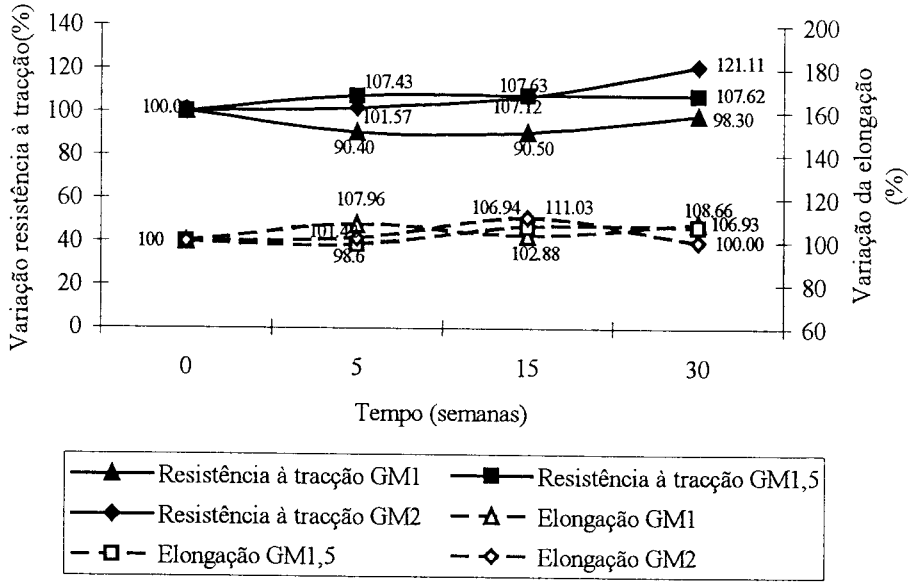


Figura 5 - Variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas após exposição à temperatura de 65° C.

A geomembrana de 1 mm de espessura (GM1) regista um decréscimo máximo, em relação ao valor inicial, de 9,60% na resistência à tracção e de 16,26% na rigidez (Figura 6) nas primeiras 5 semanas de exposição à temperatura a 65°C. Períodos de exposição superiores conduzem a um ligeiro aumento da resistência à tracção. Ao fim de 30 semanas de exposição este parâmetro é idêntico ao do material virgem. As geomembranas de 1,5 e 2 mm de espessura evidenciam comportamentos análogos, contudo com valores superiores da resistência à tracção.

Os resultados obtidos evidenciam uma maior influência da temperatura no comportamento da geomembrana mais fina (1 mm), diminuindo a resistência e a rigidez do material por acção da temperatura. Para as outras duas espessuras de geomembranas ensaiadas o efeito da temperatura no comportamento do material é menos claro, notando-se, no entanto, para o período mais longo de exposição considerado (30 semanas) uma tendência para um comportamento mais frágil da geomembrana mais espessa (Figura 6). A rigidez da GM1,5 mantém-se praticamente inalterada para os dois períodos maiores de exposição.

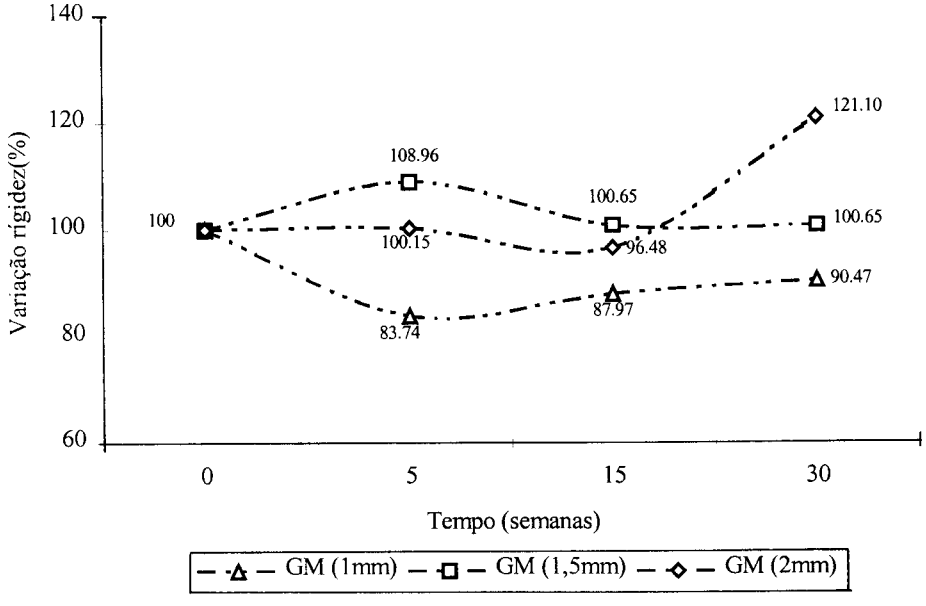


Figura 6 - Variação da rigidez das geomembranas após exposição à temperatura de 65° C.

A Figura 7 mostra a resistência à tracção e a elongação na cedência das geomembranas, para os três períodos de exposição considerados, após terem sido submetidas à temperatura de 105°C. Verifica-se um aumento da resistência à tracção no primeiro período de exposição (5 semanas) das duas geomembranas mais espessas, da ordem dos 7%. Pelo contrário, a geomembrana mais fina tem um decréscimo da resistência nesse mesmo período de cerca de 12,24%.

Para as 15 e 30 semanas de exposição as GM1,5 e GM2 evidenciam um aumento contínuo da resistência à tracção. Para os mesmos períodos de exposição a GM1 também mostra maior resistência à tracção do que o material virgem, ao contrário do que acontecia ao fim de 5 semanas de exposição. O aumento do tempo de exposição à temperatura de 105 °C induz acréscimo da resistência à tracção de todas as geomembranas.

Nas primeiras 5 semanas de exposição à temperatura de 105°C as geomembranas de 1,5 mm (GM1,5) e 1 mm (GM1) de espessura não apresentam variações significativas da elongação na cedência, ao passo que a de 2 mm de espessura (GM2) evidência um acréscimo dessa elongação de cerca de 9 %. A partir deste instante assiste-se à diminuição generalizada da elongação na cedência das geomembranas. A redução mais acentuada verifica-se entre a 5ª

e a 15ª semana de exposição ao agente considerado para a GM1 (cerca de 16,79%). Nesta altura esta geomembrana atinge o seu valor mais baixo de elongação na cedência (cerca de 14,96 % inferior ao valor obtido para o mesmo material virgem). Às 30 semanas todas as geomembranas sofrem redução da elongação na cedência sendo esta redução mais acentuada nas duas geomembranas de menor espessura.

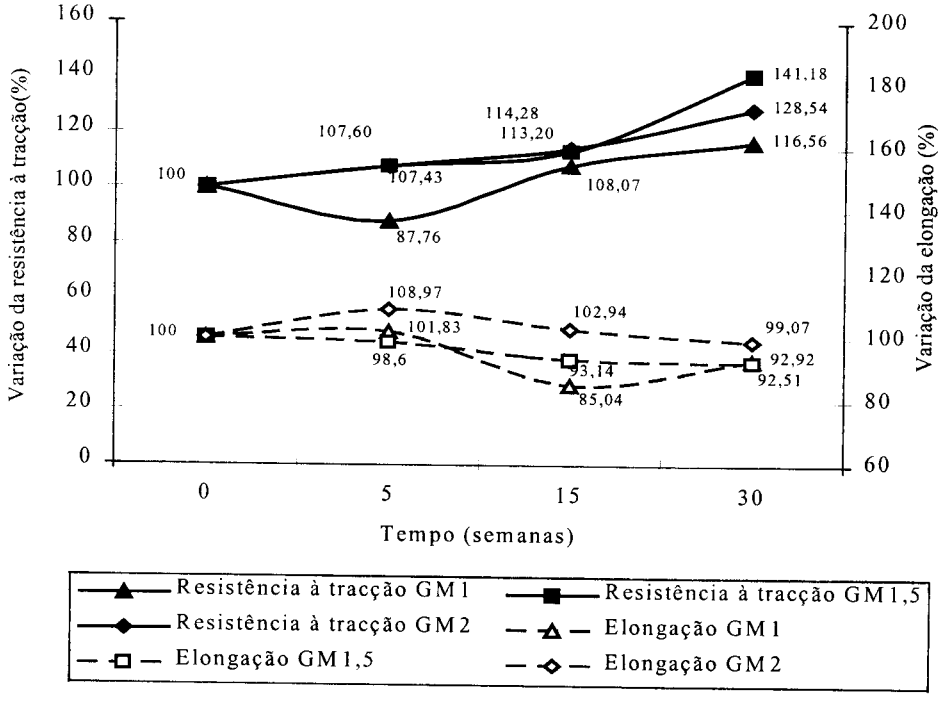


Figura 7 - Variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas após exposição à temperatura de 105°C.

O comportamento à tracção-elongação observado conduz a um aumento da rigidez das geomembranas com o tempo de exposição à temperatura de 105 °C (Figura 8), ou seja, a um comportamento mais frágil dos materiais.

As geomembranas mais espessas (GM1,5 e GM2) apresentam um comportamento, em termos de rigidez, qualitativamente semelhante ao longo dos períodos de exposição considerados. O mesmo não se aplica ao comportamento da GM1 que, após uma redução de cerca de 13,81 % no valor da rigidez ao fim de 5 semanas de exposição, evidencia um acréscimo em relação ao valor inicial deste parâmetro de aproximadamente 27 % e 25,5 %, respectivamente ao fim de 15 e 30 semanas de exposição.

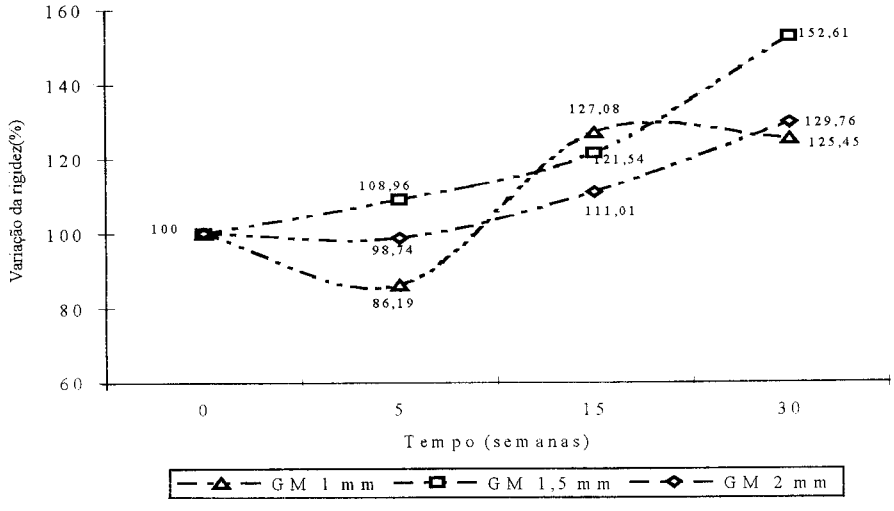


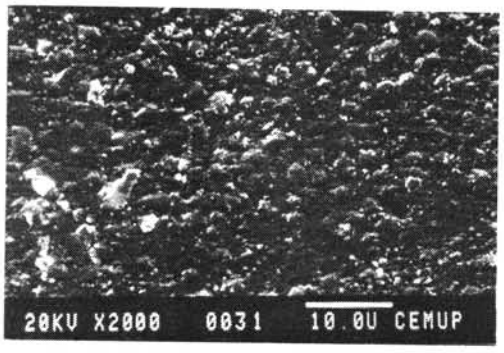
Figura 8 -Variação da rigidez das geomembranas após exposição à temperatura de 105° C.

A maior agressividade da temperatura de 105°C provoca a passagem de mais quantidade de material a um estado próximo do viscoso (ver Figura 9), aumentado essa quantidade com o tempo de exposição e com a espessura da geomembrana. Esse material ao solidificar provoca acréscimos e reduções significativas, respectivamente, de resistência e de elongação, em relação à acção da temperatura de 65°C, em especial para os tempos mais longos de exposição.

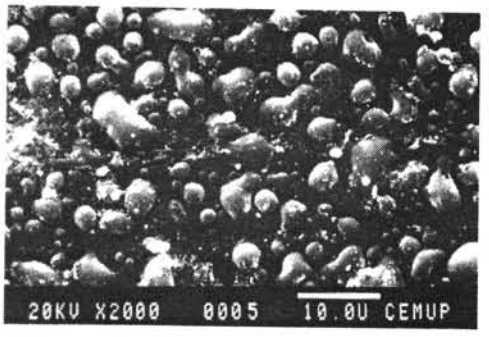
A Figura 9 mostra através de fotografia obtida por microscopia electrónica de varrimento com ampliação de 2000 vezes a alteração da superfície da GM2 após exposição durante 30 semanas às temperaturas de 65 °C (Figura 9 a) e 105 °C (Figura 9 b). A Figura 3 a) mostra a fotografia da geomembrana virgem obtida pelo mesmo método e com a mesma ampliação.

A Figura 10 mostra através de fotografia obtida por microscopia electrónica de varrimento com ampliação de 2000 vezes a alteração da superfície da GM1 após exposição durante 30 semanas à temperatura de 105 °C. Como foi dito atrás, o aspecto visual do material virgem das GM1 e GM2 é em tudo idêntico razão pela qual apenas se apresenta o relativo a um dos materiais.

Das Figuras 3a) e 9 ressalta uma importante alteração do aspecto visual da superfície da geomembrana de 2 mm de espessura por exposição a temperaturas elevadas, sendo essa alteração tanto mais importante quanto maior é a temperatura de exposição. Por outro lado, verifica-se que geomembranas de 1 e 2 mm de espessura apresentam aspecto visual idêntico quando expostas durante o mesmo período ao mesmo valor da temperatura (Figuras 9 b e 10).



a)



b)

Figura 9 – Fotografia obtida por microscopia electrónica de varrimento com ampliação 2000x da geomembrana de 2mm de espessura após 30 semanas de exposição à: a) temperatura de 65 °C; b) temperatura de 105 °C.

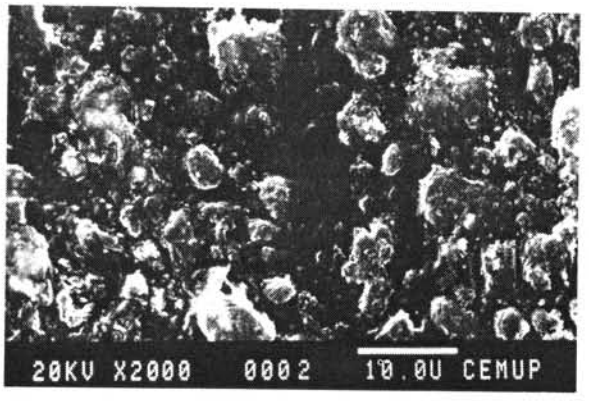


Figura 10 – Fotografia obtida por microscopia electrónica de varrimento com ampliação 2000x da geomembrana de 1mm de espessura após 30 semanas de exposição à temperatura de 105 °C.

4.3 - Lixiviado

A Figura 11 mostra a variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas GM1, GM1,5 e GM2 depois de submetidas à acção do lixiviado por períodos de 5, 15 e 30 semanas.

Verifica-se uma redução da resistência à tracção na cedência da geomembrana menos espessa (GM1) para os três períodos de exposição considerados, sucedendo precisamente o contrário para as duas restantes.

A elongação da geomembrana GM1 diminui com o tempo de exposição, atingindo essa diminuição cerca de 7,76% ao fim de 30 semanas de exposição. A redução da elongação das restantes geomembranas não é tão importante. Porém, este facto associado ao aumento da resistência à tracção na cedência leva a um acréscimo bem mais significativo da rigidez dos materiais do que o encontrado para a geomembrana GM1 (ver Quadro III). Esta constatação indicia um comportamento progressivamente mais frágil das geomembranas expostas à acção de um lixiviado com o aumento da sua espessura.

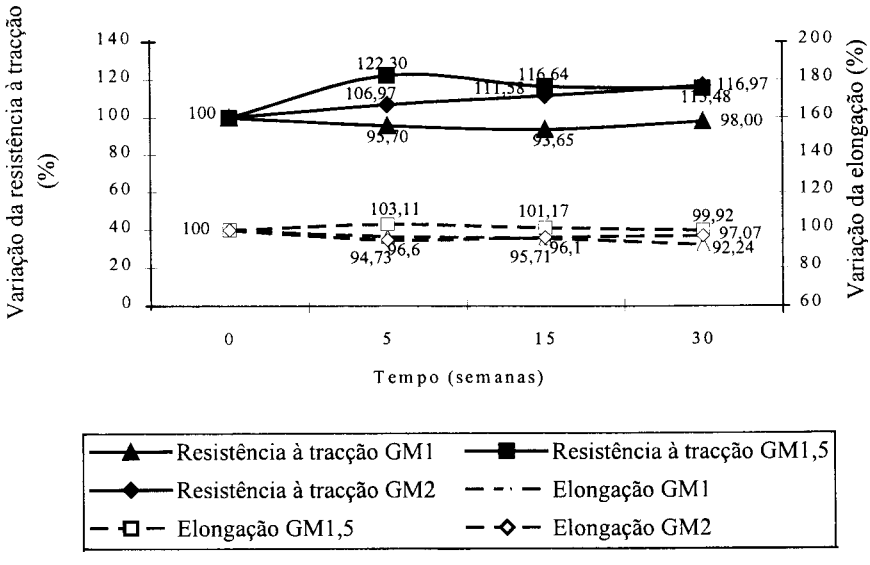


Figura 11 - Variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas após exposição ao lixiviado de um aterro de RSU.

Quadro III – Acréscimo da rigidez das geomembranas após exposição à acção do lixiviado durante 30 semanas.

Geomembrana	Rigidez (variação em percentagem, %)
GM 1 mm	+ 6,24
GM 1,5 mm	+ 15,57
GM 2 mm	+ 20,30

4.4 - Solução ácida

Os gráficos da Figura 12 mostram a variações da resistência à tracção e a da elongação na cedência ao longo dos períodos de exposição considerados das geomembranas em estudo expostas à acção da solução ácida.

É aparente um efeito mais negativo da solução ácida na resistência à tracção das geomembranas do que do lixiviado (ver Figura 10), em especial para períodos de exposição relativamente curtos (até 15 semanas), mantendo-se o efeito degradativo mais notório na geomembrana menos espessa (GM1). Para este material a variação da elongação na cedência para os diferentes períodos de exposição é semelhante sob as duas acções referidas, ocorrendo algo idêntico para as restantes geomembranas ao fim de 30 semanas de exposição. Para

períodos menores de exposição as geomembranas mais espessas evidenciam acréscimo de elongação sob a acção da solução ácida.

Embora ao fim de 30 semanas de exposição a rigidez das geomembranas seja idêntica sob acção da solução ácida e do lixiviado (ou seja, evidenciando comportamento mais frágil do que o material virgem), para períodos menores de exposição o mesmo não se verifica, isto é, no caso da acção do lixiviado a rigidez da geomembrana mais fina mantém-se praticamente inalterada, aumentando para as duas restantes (indiciando fragilização do material), no caso da acção da solução ácida verifica-se um acréscimo da ductilidade dos materiais.

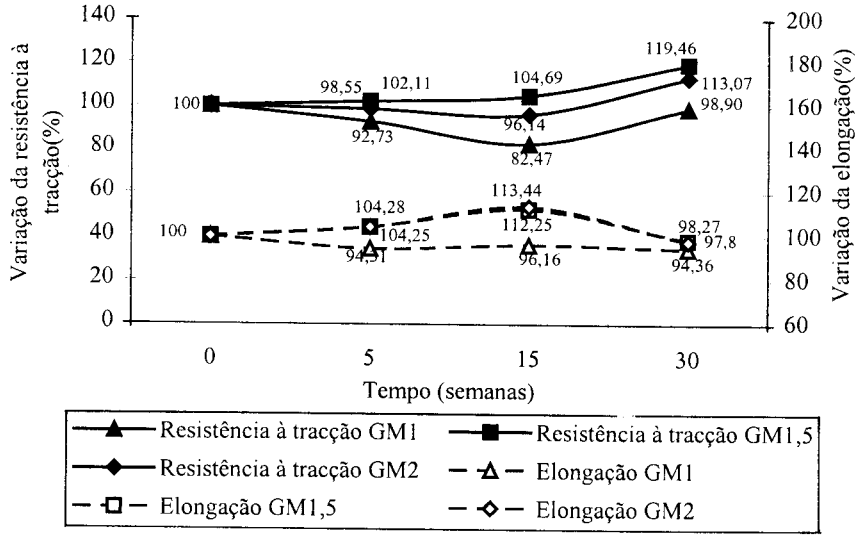


Figura 12 - Variação dos resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas após exposição à solução ácida.

4.5 - Solução alcalina

A Figura 13 mostra a variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas GM1, GM1,5 e GM2, após exposição à solução alcalina.

No que se refere à geomembrana menos espessa (GM1) verifica-se uma acção mais negativa da solução alcalina do que do lixiviado, em termos de redução da resistência à tracção, podendo considerar-se semelhante à da solução ácida, em especial para os períodos mais curto e mais longo de exposição. Para as restantes geomembranas verifica-se que a acção da solução alcalina na variação da resistência à tracção se situa em valores intermédios dos relativos às acções do lixiviado e da solução ácida.

Ao fim de 30 semanas de exposição a elongação na cedência é semelhante à observada para as outras duas acções consideradas, sendo nos restantes períodos de exposição ligeiramente maior do que a registada por influência do lixiviado.

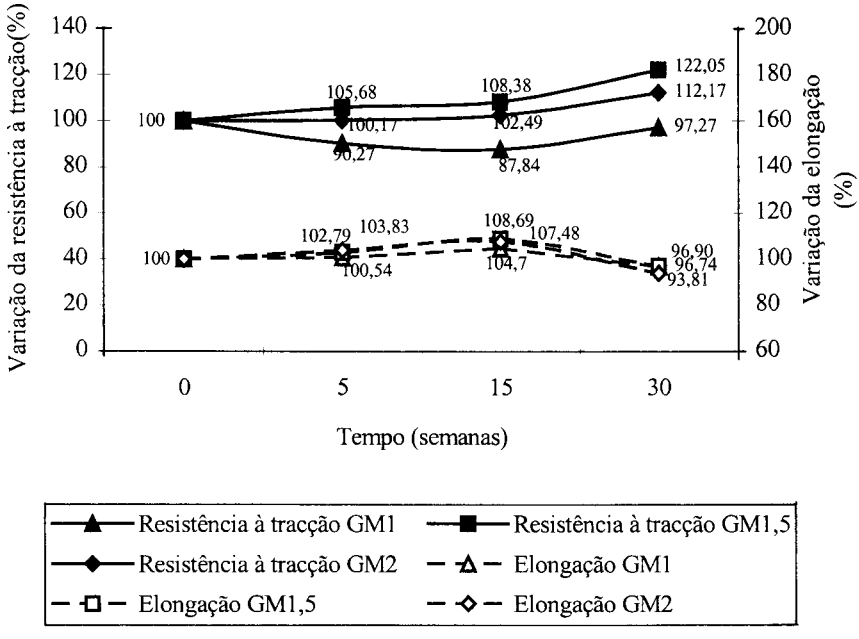


Figura 13 - Variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas após exposição à solução alcalina.

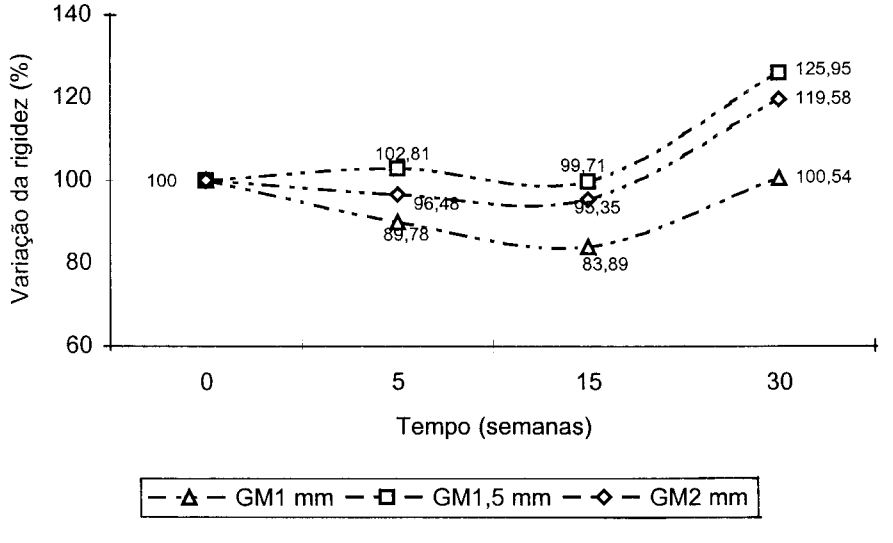


Figura 14 - Variação da rigidez das geomembranas após exposição à so.lução alcalina

Constata-se um comportamento mais dúctil das geomembranas (Figura 14) para períodos de exposição relativamente curtos, o qual tende a tornar-se progressivamente mais frágil à medida que o tempo de exposição à solução alcalina aumenta.

O comportamento da geomembrana de GM1,5 sob a acção dos agentes de degradação considerados neste trabalho é um pouco distinto do verificado para as outras duas geomembranas ensaiadas. Tal facto, poderá dever-se a pormenores de fabrico, impossíveis de controlar neste trabalho, já que apenas foram fornecidas as informações constantes na ficha técnica do produto.

4.6 - Solução de cloreto de sódio

A Figura 15 mostra a variação da resistência à tracção e da elongação na cedência das geomembranas analisadas neste estudo após sujeição à acção da solução de cloreto de sódio por períodos de 5, 15 e 30 semanas. As geomembrana mais fina (GM1) apresenta redução da resistência à tracção na cedência nos dois períodos mais curtos de exposição considerados (5 e 15 semanas), sendo semelhante à do material virgem ao fim de 30 semanas de exposição.

As duas geomembranas mais espessas consideradas (GM1,5 e GM2) apresentam um comportamento em termos de resistência à tracção do material, sob a acção da solução de NaCl distinto do da geomembrana GM1. Com efeito, na geomembrana GM2 para os dois períodos mais curtos de análise notam-se variações de pouca monta no valor do parâmetro em causa. Para as 30 semanas de exposição a geomembrana GM2 apresenta um acréscimo, em relação ao valor inicial, de resistência à tracção na cedência de cerca de 17,79%. A geomembrana GM1,5 evidencia para os três períodos de exposição maior resistência à tracção do que o material virgem, aumentando essa resistência com o tempo de exposição.

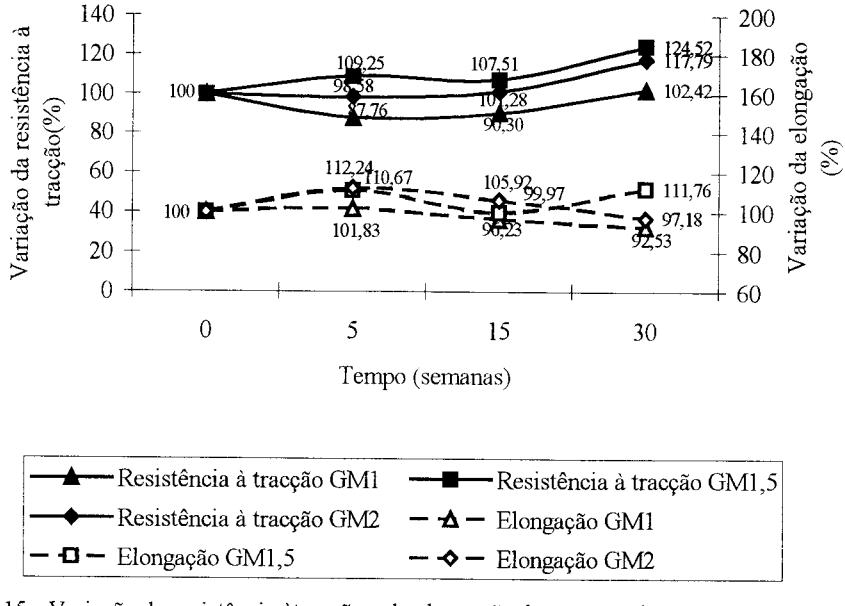


Figura 15 - Variação de resistência àtracção e da elongação das geomembranas após exposição à solução de cloreto de sódio.

Em termos de elongação na cedência verifica-se que a geomembrana GM1 apresenta tendência para a sua redução à medida que o tempo de exposição aumenta. Por seu turno, esse parâmetro na GM2 aumenta nas primeiras cinco semanas de exposição à solução de NaCl, para depois se ir reduzindo, até atingir ao fim das 30 semanas de exposição um valor semelhante ao do material virgem. Finalmente, refira-se que a geomembrana GM1,5 apresenta um comportamento um pouco mais errático, em termos de elongação na cedência, aumentando este parâmetro para as 5 semanas de exposição à solução de NaCl, diminuindo para as 15 semanas até valores próximos do valor inicial, aumentando de novo cerca de 11,76% em relação ao valor do material virgem ao fim de 30 semanas de exposição.

5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudada o influência da acção de seis agentes de degradação, actuando por um período máximo de trinta semanas, no comportamento à tracção-elongação de três geomembranas lisas em polietileno de alta densidade da mesma marca, mas com espessuras diferentes (1mm, 1,5mm e 2mm).

Os seis agentes de degradação seleccionados (agentes atmosféricos, temperatura, lixiviado de um aterro de RSU e soluções ácida, alcalina e de cloreto de sódio) foram considerados como actuando isoladamente com o objectivo de possibilitar a informação acerca da influência de cada um, per si, na degradação das geomembranas. É de referir, no entanto, que na realidade, em regra, coexiste a actuação simultânea de vários agentes (por exemplo: temperaturas elevadas e lixiviados) podendo, por isso, ocorrer alterações no comportamento observado sob acção de um único agente.

Com base nos resultados obtidos no estudo formular-se-ão as seguintes conclusões:

1) em termos gerais, os agentes de degradação considerados afectam mais significativamente o comportamento da geomembrana de menor espessura (1mm);
2) à medida que o tempo de exposição das geomembranas aos agentes atmosféricos aumenta o seu comportamento tende a tornar-se frágil;
3) o efeito da temperatura (65°C) no comportamento á tracção-elongação das geomembranas é de maior significado para a menos espessa considerada (1mm), tormando-se o seu comportamento mais dúctil;
4) o comportamento à tracção-elongação das geomembranas é influenciado significativamente pelo aumento da temperatura;
5) a acção do lixiviado do aterro de RSU reduz de modo mais importante a resistência à tracção da geomembrana de menor espessura;
6) o aumento do tempo de exposição das geomembranas ao lixiviado do aterro de RSU tende a tornar o seu comportamento mais frágil, sendo o aumento da rigidez crescente com a espessura da geomembrana;
7) a acção degradativa da solução ácida na resistência à tracção das geomembranas é mais gravosa do que a observada para a acção do lixiviado, em especial para períodos de exposição inferiores a 15 semanas;
8) a acção da solução alcalina na resistência à tracção das geomembranas situa-se em valores intermédios das acções do lixiviado e da solução ácida, em especial para as duas geomembranas mais espessas consideradas no estudo;
9) a redução de resistência à tracção das geomembranas por exposição a uma solução de NaCl é mais significativa para a geomembrana que apresenta menor espessura (1 mm);

geossintéticos (nomeadamente, em termos de processos de fabrico e de polímeros constituintes), considera-se que a generalização dos comportamentos constatados exige a sua comprovação para outras geomembranas com características distintas das dos estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos pelo patrocínio e apoio financeiro ao FEDER e Programa PRAXIS XXI, no âmbito do projecto de investigação 3/3.1/CEG/2598/95, bem como à Naüe Fasertechnik GmbH & Co. KG pela disponibilização das geomembranas ensaiadas e à SERURB pela cedência, no aterro de RSU de Matosinhos, de instalações e de alguns equipamentos e dados fundamentais ao desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

M. Lurdes Lopes e A. Vieira Monteiro. *Avaliação do comportamento à tracção de geotêxteis sujeitos a agentes de degradação*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia - Geotecnia nº 85, pp. 81-107, 1999.