

DURABILIDADE DE GEOMEMBRANAS EM AMBIENTES DE ÁGUAS MINERAIS SULFÚREAS

Durability of Geomembranes in Sulphureous Mineral Water Environments

L. M. Ferreira Gomes*

F. Riscado Santos**

M. Figueiredo Nunes***

RESUMEN – No presente artigo apresentam-se os resultados de ensaios físico e mecânicos em geomembranas do tipo PEAD, em situações de amostras imersas durante oito meses em água mineral sulfúrea corrente e em água mineral sulfúrea parada, de modo a investigar a estabilidade das propriedades destes materiais ao longo do tempo. Os resultados são comparados com os obtidos na situação de amostras devidamente acondicionadas. Analisa-se a composição química da água mineral, quer na situação de água jovem, quer nas situações de águas envelhecidas, sem e em contacto com as geomembranas, para se averiguar da possível contaminação das águas minerais na sequência da eventual degradação daqueles geossintéticos.

SYNOPSIS – In the present paper the results of physical and mechanical tests on a HDPE geomembrane when immersed during eight months in running sulphurous mineral water and in stationary sulphurous mineral water are studied in order to investigate the stability of the properties of this material with time. The results are also compared with those obtained in the situation of samples duly conditioned. The chemical composition of both fresh and aged mineral water is studied, with and without contact with the geomembrane. Finally, the possibility of contamination of the mineral water, due to eventual geosynthetics degradation, is analyzed.

1 – INTRODUÇÃO

Este trabalho insere-se num conjunto de estudos de maior amplitude, em que, além dos ensaios em geomembranas, foram desenvolvidos estudos em vários tipos de geotêxteis (Riscado Santos, 2002; Riscado Santos et al, 2002). Foram ainda realizados estudos sobre a composição físico-química da água mineral e respectivas áreas de ocorrência (Ferreira Gomes e Machado Saraiva, 1997; Ferreira Gomes e Albuquerque, 1998; Ferreira Gomes et al., 2000; Ferreira Gomes et al., 2001a, 2001b, e Ferreira Gomes, et al., 2002) onde potencialmente estes geossintéticos poderão ser aplicados, quer em obras de drenagens, quer em obras de impermeabilização junto a captações que interessa manter intocáveis relativamente à qualidade da água mineral. São exemplo disso, de entre muitos, os casos das captações associadas às unidades termais do país, em que a água mineral é do tipo sulfúrea, como é o caso das Termas de S. Pedro do Sul, das Termas de Unhais da Serra e muitas outras. Os critérios e exigências de qualidade têm levado à obrigatoriedade legal de implementação de perímetros de protecção e consequentemente tem aumentado a necessidade de melhorar e reordenar os espaços, por vezes urbanos, junto às captações e em especial na zona de Protecção Imediata. Tem, assim, havido necessidade de efectuar obras de drenagem, eventualmente com geotêx-

* Professor Associado do Departamento de Eng.^a Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior.

** Director de Departamento dos Serviços Municipalizados da Covilhã.

*** Professor Associado do Departamento de Ciência e Tecnologia Têxteis da Universidade da Beira Interior.

teis, para intersectar ressurgências hidrominerais, de modo a manter as áreas secas ou sem excesso de humidade, minorando a possibilidade de desenvolvimento de ambientes que possam levar à contaminação do aquífero. Por outro lado, também pode ocorrer a colocação de telas impermeáveis, como as geomembranas, em zonas sensíveis à contaminação, para evitar o contacto entre fluidos superficiais eventualmente contaminados e a água mineral. Assim, a aplicação dos geossintéticos nestes ambientes, de águas extremamente agressivas, exige o estudo do comportamento destes materiais ao longo do tempo. Nestas situações, a preocupação relativa à qualidade da água mineral é acrescida, pois a haver alteração dos geossintéticos poderá resultar a contaminação desta, inviabilizando o desenvolvimento do Termalismo. Devido às exigências do sector, o controlo de qualidade da água efectua-se de um modo sistemático, frequentemente de quatro em quatro meses com análises físico-químicas parciais, e de quatro em quatro anos em análises completas com pesquisas de elementos menores.

A importância da presente pesquisa é grande, uma vez que as zonas de Termas antigas, são na generalidade locais onde há captações de água mineral, por vezes termal (quente), que, ao ser usada, obriga a obedecer a critérios de qualidade extremamente exigentes. Salienta-se que a maioria das Termas legalizadas em Portugal apresenta águas do tipo sulfúrea, sendo algumas delas muito quentes como é o caso de S. Pedro do Sul, onde a água ressurge à temperatura de 68,7°C. Para se evidenciar a importância deste assunto, refere-se que só no ano 2004 frequentaram as Termas de S. Pedro do Sul 25453 pessoas, tendo sido gerada uma receita directa de cerca de $4,6 \times 10^6$ euros (em tratamentos e consultas) e uma receita indirecta de cerca de 15×10^6 euros (considerando que, em geral, cada aquísta esteve nas Termas 15 dias e gastou em média 40 euros/dia em alimentação, dormida, etc.). Facilmente se conclui, que não se pode permitir a contaminação deste recurso, e que portanto todo o risco tem que ser minimizado ao máximo.

As geomembranas são constituídas por polímeros sintéticos, designadas por PEAD (Polietileno de alta densidade). Em termos químicos os polímeros sintéticos são constituídos no geral por compostos de carbono e hidrogénio, organizando-se em grupos por vezes muito complexos. O elemento mais simples que forma qualquer polímero constituinte dos geossintéticos é o monómero (Figura 1). Na polimerização dá-se a junção dos monómeros de modo a formarem macromoléculas, variando as propriedades do polímero de acordo com o número e o tipo de monómeros que o constituem.

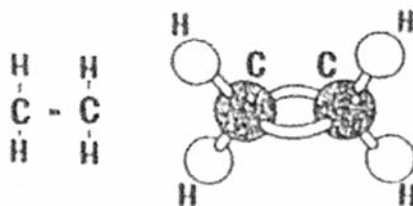


Fig. 1 – Esquema da estrutura e composição química dos elementos mais simples que formam os polímeros sintéticos das geomembranas (adaptado de Pinto, 2000).

Durabilidade, pode definir-se, de um modo geral (Monteiro, 1998), pela capacidade de resistência dos materiais aos processos degenerativos, provocados por diversos agentes, não só ao longo dos anos de serviço, mas também antes e durante a sua instalação em obra. Os geossintéticos, apesar de serem materiais com uma aplicação crescente em engenharia, nomeadamente em obras de carácter ambiental, apresentam ainda hoje, como principal reserva (Lopes et al., 2001), a questão da durabilidade. A degradação dos geossintéticos depende naturalmente do meio onde são inseridos ou utilizados, sendo as causas principais: os raios ultravioletas, o efeito de termo-oxidação e de foto-oxidação, o ataque químico directo por poluentes no solo, na água e na atmosfera, o ataque biológico, as acções mecânicas e ainda a fluência. É de salientar que a acção conjunta do calor e/ou das radiações solares com o oxigénio é responsável por alterações nas cadeias moleculares consti-

tuintes dos polímeros, as quais incluem quebras de ligações químicas. Também a combinação do ataque químico e do carregamento podem acelerar certos tipos de degradação. Naturalmente que essas alterações acarretam modificações nas propriedades dos polímeros e consequentemente dos geossintéticos. Salienta-se que a oxidação é uma das principais formas de degradação química dos polímeros. Alguns geossintéticos contêm antioxidantes para estabilização a curto prazo (para a fase de produção que ocorre a altas temperaturas) e para estabilização a longo prazo (para a fase de serviço a baixas temperaturas). Assim, se estes antioxidantes forem desagregados pela água ou se ficarem saturados pelo oxigénio, a degradação do polímero pode tornar-se bastante rápida.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

A geomembrana estudada é de polietileno de alta densidade do tipo liso (PEAD). A água mineral utilizada neste estudo é originária de Unhais da Serra.

Para a realização dos estudos apresentados, a geomembrana foi cortada em provetes (de dimensão adequada aos ensaios a efectuar), que se podem dividir em três grupos, de acordo com o seguinte:

- i) provetes imersos em tinas com água mineral termal parada, a uma temperatura constante de 20° C, em Laboratório;
- ii) provetes imersos em tinas com água mineral corrente, à temperatura natural de 37°C, junto à captação das Termas, no interior de um casoto adaptado especialmente para o efeito (Figura 2);
- iii) provetes devidamente acondicionados, protegidos de qualquer situação que pudesse alterar a sua qualidade: local sombrio, abrigado da luz, da humidade e de poeiras, à temperatura de cerca de 20°C.

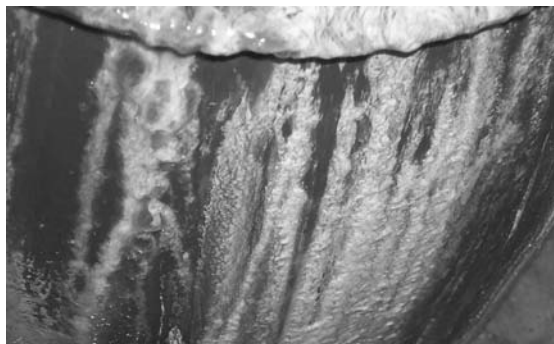


Fig. 2 – Geossintéticos em tinas sujeitos a água sulfúrea corrente, nas Termas. Nota: os resíduos esbranquiçados correspondem a um produto natural, típico, que se desenvolve ao longo do tempo.

A razão de se estudarem provetes imersos em tinas com água mineral termal parada prende-se com a necessidade de adquirir mais sensibilidade sobre o que poderá acontecer em termos de alteração química da água depois desta ter estado em contacto com as geomembranas. Na natureza há sempre movimento contínuo da água subterrânea, dentro do que é comum para um aquífero semi-confinado, como é o presente caso, com coeficiente de permeabilidade da ordem de grandeza de 2.3 a 3.1 m/dia (Ferreira Gomes e Machado Saraiva, 1997). Na situação de água corrente, devido à contínua renovação, torna-se difícil encontrar alterações em termos químicos. Chama-se a atenção para o facto da água na situação designada por água corrente se mover com maior rapidez do que na realidade (e portanto ser uma situação claramente artificial), onde existem elementos (solos e outros materiais) que contribuam para a redução da velocidade. A situação real é assim de difícil simulação, em especial quando se pretende estudar algumas variáveis de modo controlado. De qualquer modo, admite-se de que o poder reactivo da água sulfúrea em contínua renovação possa ser muito superior ao da água sulfúrea parada, pelo que se procedeu ao estudo nessas condições. Os provetes i) e ii) ensaiaram-se ao longo de 6 meses seguidos e também no oitavo mês. Após a retirada dos provetes das tinas, estes eram colocados em local sombrio, seco e arejado no laboratório durante 1 dia e depois mais 2 dias em estufa ventilada a 22°C. Os provetes iii) foram apenas ensaiados no início, no meio e no fim dos trabalhos, para os seus resultados servirem de referência. Os ensaios realizados às geomembranas, ao longo do tempo, foram: Massa por unidade de área, Resistência ao Punçoamento Estático (CBR), e Resistência à Tracção. Na implementação do plano experimental, tratamento e apresentação de resultados seguiram-se em geral os procedimentos descritos nas Normas Europeias (EN) e adoptadas pela Organização Internacional de Normalização (ISO). Salienta-se no entanto que se adaptaram por vezes algumas modificações a estas Normas, uma vez que na presente pesquisa, o objectivo considerado mais importante foi *verificar em termos relativos* o que aconteceria às geomembranas ao longo do tempo, em meios agrestes constituídos por águas sulfúreas. Algumas particularidades sobre aspectos das metodologias, e que são entendidas merecer referência, apresentam-se no presente trabalho.

A *Massa por unidade de área* foi determinada seguindo-se os procedimentos na Norma EN 965 (1995).

Os ensaios de Resistência ao Punçoamento Estático foram efectuados de acordo com os procedimentos em EN ISO 10319 (1996). Utilizou-se a prensa normalmente usada nos ensaios triaxial e CBR do Laboratório de Mecânica dos Solos (Figura 3), em associação a um êmbolo (com 50 mm de diâmetro e 75 mm de altura) e a um anel dinamométrico de capacidade de 29,4 kN, e utilizou-se ainda um sistema próprio de fixação do provete ao molde CBR, construído para o efeito.

No tratamento de resultados, para cada provete traçou-se o gráfico de variação de força aplicada com o deslocamento, efectuou-se a correcção da curva de acordo com o apresentado na Figura 4 e determinaram-se a força de rotura (F_{rp}), o deslocamento relativo à rotura (D_{rp}), e ainda o “módulo de deformação punçoante” (E_{tp}), de acordo como estão definidos na própria Figura 4. Salienta-se que (E_{tp}) foi introduzido no presente trabalho, além do exigido na norma de base ao ensaio, de modo a adquirir o máximo de sensibilidade sobre os objectivos em análise. O resultado final de cada um dos vários parâmetros (F_{rp} , D_{rp} e E_{tp}) de cada amostra corresponde à média dos resultados obtidos em 4 provetes.

Nos ensaios de Resistência à Tracção, seguiram-se os procedimentos em EN ISO 10319 (1996), e utilizou-se uma máquina de tracção universal (Figura 5), com uma célula de carga de capacidade máxima de 5 kN e garras com largura de 10 cm.

Em cada fase de estudo foram ensaiados 4 provetes. No tratamento de resultados, para cada provete, de acordo com a Figura 6 foram traçados os gráficos de variação da *força de tracção aplicada* (F_i) com *deformação* (d_i), tendo-se efectuado sempre que necessário a correcção da curva resultante, devido ao menos bom ajuste inicial do provete às garras. Assim, para cada provete, determinaram-se a força máxima (F_r), a deformação corrigida na rotura (D_r) e ainda o parâmetro

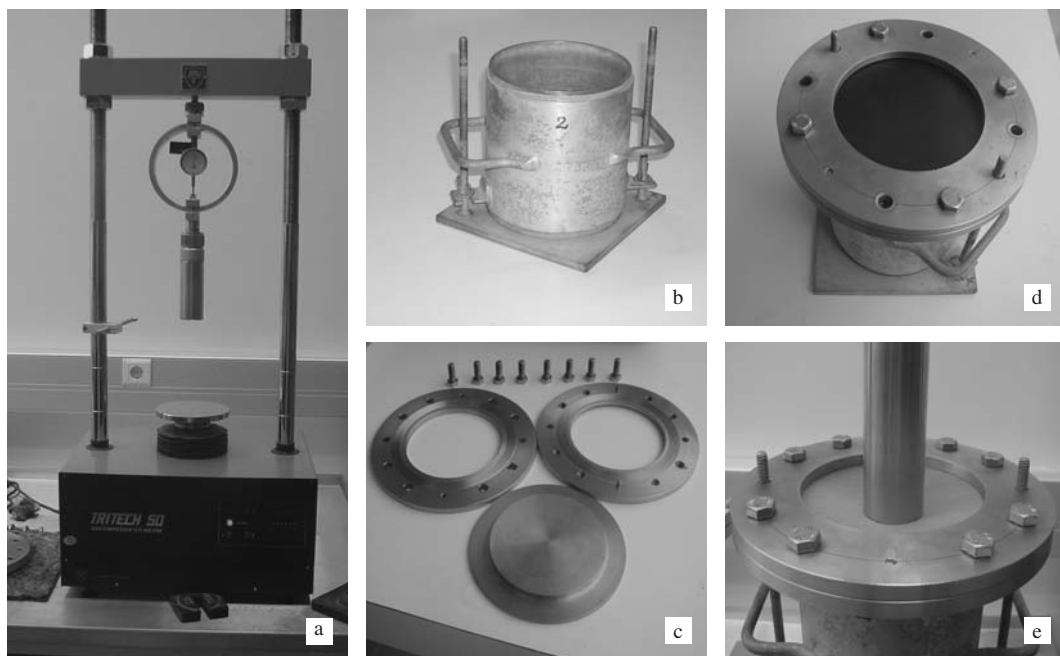


Fig. 3 – Prensa e sistemas auxiliares para a realização do ensaio de Resistência ao Punção Estático nos geossintéticos; a - prensa, b - molde CBR; c - sistema de anéis de fixação do provete; d- provete de geomembrana a ser fixado no molde; e - detalhe de um provete no início do ensaio.

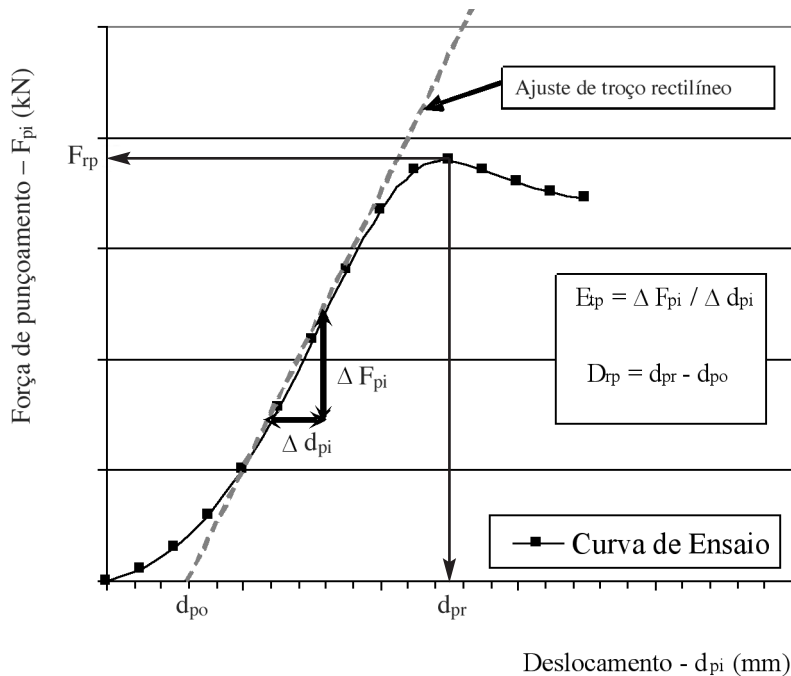


Fig. 4 – Esquema sobre o tratamento de resultados do ensaio de Resistência ao Punção Estático, com definição do “módulo de deformação punçante” (E_{tp}).

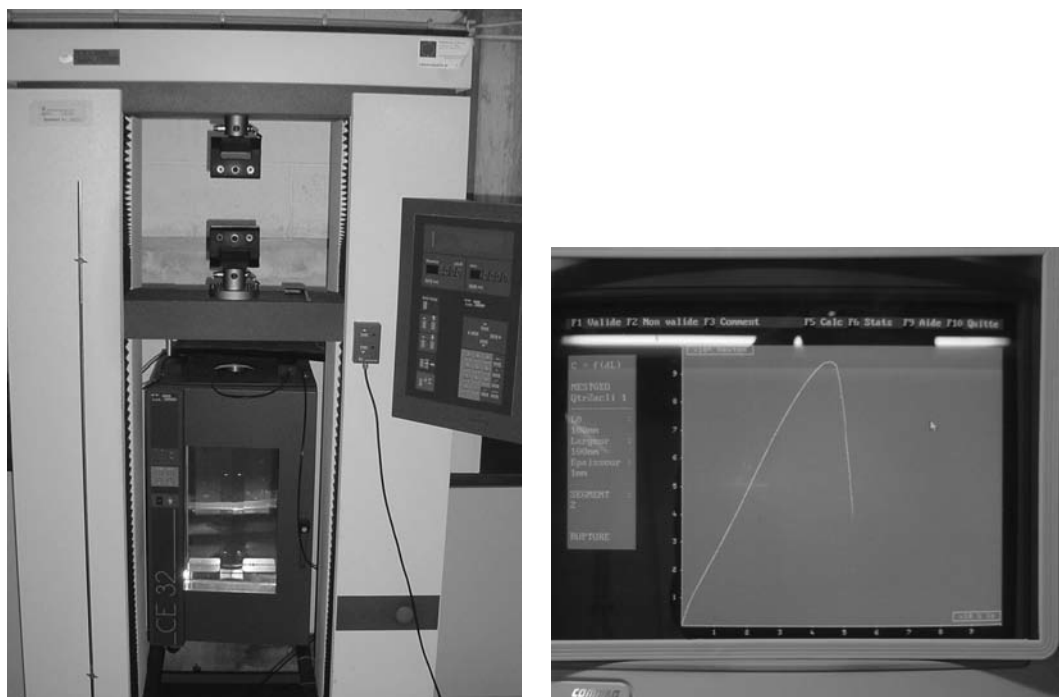


Fig. 5 – Aspectos da máquina (dinamómetro) utilizada nos ensaios de Tracção de geomembranas:
a - visão global, b - consola de registo automático de resultados.

de deformabilidade tangente (E_t), de acordo como definidos na Figura 6. O resultado apresentado para cada ensaio (F_r , D_r e E_t), é a média dos resultados dos 4 provetes.

Sobre os resultados considerou-se ainda o seguinte tratamento:

$$R_r = F_r \cdot C,$$

$$V_t = E_t \cdot 100 \cdot C,$$

em que:

R_r , é a resistência à rotura (em kN/m);

V_t , é a rigidez tangente (em kN/m), com base em E_t obtido a partir do troço rectilíneo da curva F_i (em kN) versus d_i (em %);

F_r , é a força máxima registada (em kN);

$C = 1/B$; B = largura do provete em metros.

Enfatiza-se que a norma de base ao presente ensaio, genericamente seguida, orienta para a determinação da rigidez secante, no entanto no presente trabalho entendeu-se ser mais consistente de acordo com os objectivos em causa, introduzir o parâmetro E_t e consequentemente V_t , expresso de um modo similar ao apresentado na norma para a situação da rigidez secante.

Os estudos sobre a composição físico-química dos parâmetros principais das águas minerais foram efectuados pelo Laboratório de Análises do Instituto Superior Técnico. Analisaram-se as águas nas situações: i) jovem, e ii) envelhecida após o contacto com os provetes de geomembranas, e também na situação iii) envelhecida sem contacto com qualquer provete, para os resultados servirem de referência. No estudo são utilizados também os resultados da análise físico-química completa mais recente da água jovem, efectuada pelo Laboratório do Instituto Geológico e Mineiro em 1994, em termos dos elementos menores (espécies vestigiárias). Quanto às técnicas utilizadas, de acordo com o

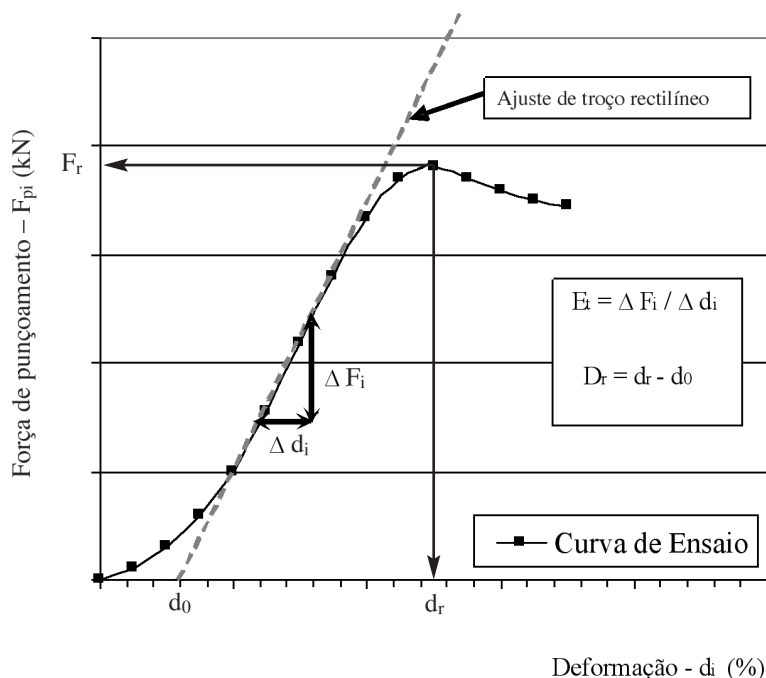


Fig. 6 – Esquema sobre o tratamento de resultados no ensaio de Resistência à Tração, com definição da deformabilidade tangente (E_t).

referido nos relatórios das análises físico-químicas, são métodos de doseamento por Cromatografia Iônica, Espectrofotometria de Absorção Molecular e Atômica com Chama, Calorimetria e Fotometria de Chama nas espécies maioritárias, e ainda técnicas de Espectrometria de Absorção Molecular na zona do visível nas espécies vestigiárias dos elementos não metálicos, técnicas de Espectrometria de Emissão com Plasma Condutivo nas espécies vestigiárias dos elementos metálicos; o Boro e o Alumínio em particular foram doseados por Espectrometria de Emissão com Plasma Indutivo.

Devido a estas águas apresentarem características especiais e em particular as de Unhais da Serra, foram alvo de um estudo científico, no domínio físico-químico, por Rocha Pereira (1991) referindo que uma das características principais é o seu carácter marcadamente redutor. Como regra, estas águas apresentam valor de pH superior a 7, concentração de sílica superior a 10% em relação à mineralização total, concentração de fluoreto superior a 5 mg/l, existência de formas reduzidas de enxofre pouco estáveis (HS^- e S_2 O_3^{2-}) e a presença de HCO_3^- e Na^+ como o anião e catião, respectivamente, dominantes. Existem também nestas águas outros aniões e catiões importantes, como o cloreto, o sulfato, carbonato e silicato nos aniões, e o cálcio nos catiões. Estão ainda presentes alguns gases como sejam o gás carbónico, o azoto, o radão, etc, e alguns oligoelementos (elementos menores).

3 – RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de Massa por unidade de área, de Resistência ao Punção Estático, e de Resistência à Tração, em provetes mantidos em ambiente seco, indicam-se no Quadro 1. Estes valores servirão de referência à análise dos resultados obtidos nos meios de água corrente (ac) e água parada (ap). Salienta-se que são resultados obtidos em três ensaios (meses: 0, 4 e 8).

Quadro 1 – Resultados dos ensaios físicos e mecânicos das geomembranas em ambiente seco.

Tipo de ensaio		N.º de ensaios	Mínimo	Médio	Máximo
Massa por unidade de área - M (g/m²)		3	960,77	979,05	994,84
Resistência ao Punçoamento Estático	F _{tp} (kN)	3	2,66	3,13	3,52
	E _{tp} (kN/m)	3	0,8002	0,0886	0,0971
	D _{tp} (mm)	3	67,65	86,75	98,71
Resistência à Tracção	R _r (kN/m)	3	18,95	19,18	19,48
	V _T /100 (kN/m)	3	718,38	744,04	767,20
	D _r (%)	3	10,89	11,69	12,80

Em relação à Massa por unidade de área, os resultados finais dos vários ensaios, em termos médios, obtidos nos provetes imersos em água corrente e em água parada, apresentam-se na Figura 7. Um exemplo de um ensaio individual apresenta-se na Figura 8. Nos ensaios realizados obtiveram-se sempre resultados diferentes, no caso da água ser corrente ou parada, no entanto, esta variação não é considerada significativa.

Na Figura 9 apresentam-se os resultados do ensaio de Resistência ao Punçoamento Estático, obtidos ao longo dos oito meses, em água corrente e água parada. Exemplo de resultados de ensaio típico obtido nos vários provetes, apresenta-se na Figura 10. Todos os resultados dos ensaios de Resistência ao Punçoamento Estático indicam que a resistência em termos de F_{tp}, é sempre menor quando as geomembranas ficam imersas do que na situação de ambiente seco. Ao longo do tempo há a tendência clara da resistência diminuir continuamente, quer em água parada, quer em água corrente. Através das equações da variação de F_{tp} ao longo do tempo, verificam-se perdas de resistência 0,95% e 1,05% por mês, em água corrente e em água parada respectivamente. Chama-se a atenção para a importância destes valores, uma vez que, a verificarem-se, apontam para uma perda de resistência total na ordem de 8 e 9 anos para a água mineral corrente e parada, respectivamente. Em relação à situação de E_{tp}, verificam-se tendências similares às de F_{tp}, no sentido de diminuir à medida que aumenta o tempo de imersão. Verifica-se o contrário com as deformações (D_{tp}), uma vez que, com o tempo, as geomembranas se tornam mais deformáveis. Esta situação é evidenciada na forma dos provetes, que têm tendência de tomar a forma de um “chapéu” (Figura 10), tanto mais alto e mais perfeito, quanto maior o tempo de imersão.

Os resultados do ensaio de Resistência Tracção, em termos de força de rotura, deformação corrigida na rotura e rigidez tangente, obtidos ao longo dos oito meses, na água corrente e na água parada, apresentam-se na Figura 11. Exemplos de ensaio típico com os vários provetes, e ainda de um provete a ser ensaiado no momento da rotura, apresentam-se na Figura 12. Apesar dos resultados dos três primeiros meses dos provetes em contacto com a água mineral, terem apresentado ligeiro acréscimo de resistência em relação às amostras acondicionadas ao longo do tempo, tal como nos ensaios de punçoamento estático, também na tracção-deformação, os resultados indicam que há uma perda de resistência quando os provetes ficam imersos. R_r diminui em cerca de 2,33% e 1,38% por mês, em geomembranas imersas em água corrente e em água parada, respectivamente. Note-se que estes valores apontam para uma degradação muito maior que nos ensaios de punçoamento, levando a perdas de resistências totais ao fim de cerca de 4 a 6 anos. Em relação a V_t verificam-se tendências similares nas geomembranas imersas em água corrente e em água parada. Sobre a deformação para atingir a rotura, esta torna-se ligeiramente maior com o tempo de imersão, em ambos os meios de água corrente e água parada.

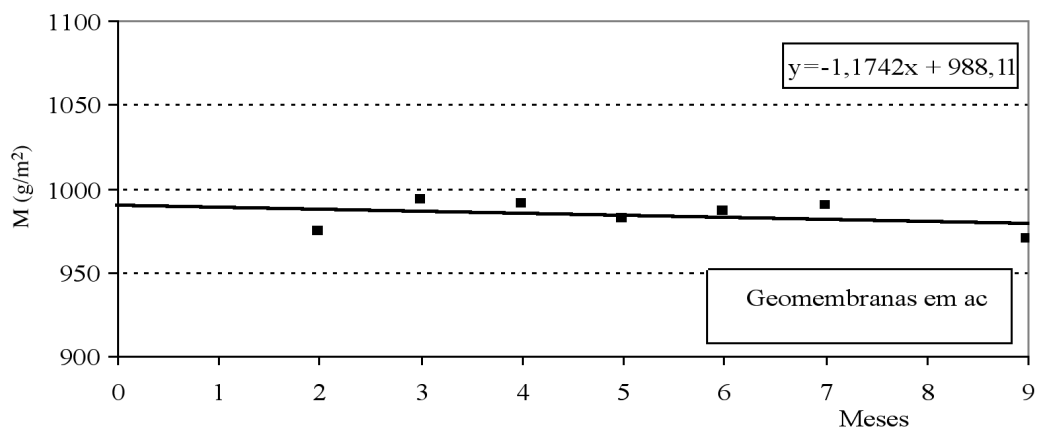
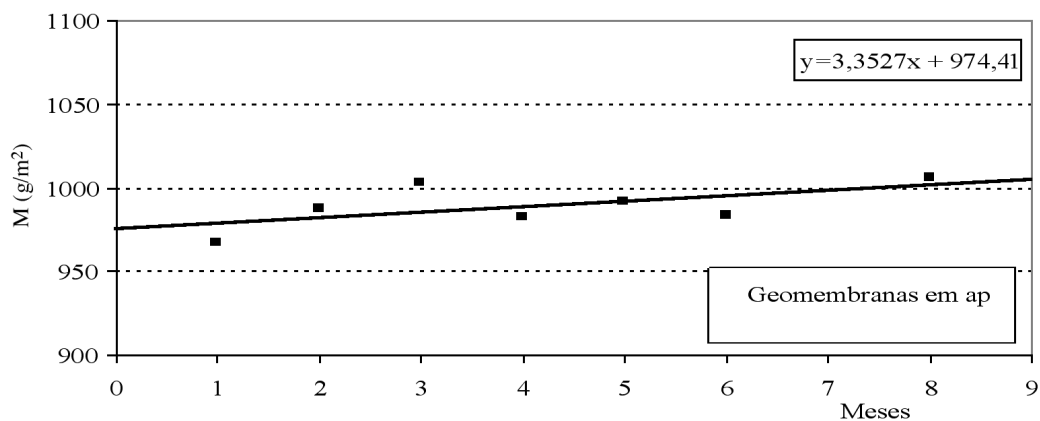


Fig. 7 – Variação da Massa por unidade de área de geomembranas imersas em água parada (ap) e em água corrente (ac), ao longo de 8 meses.

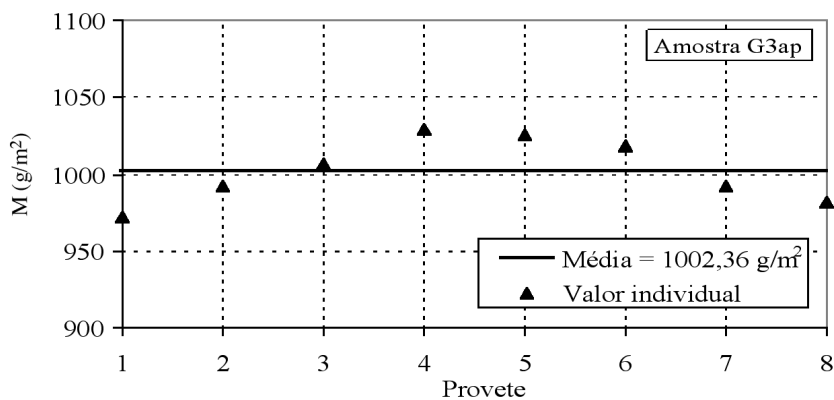


Fig. 8 – Variação da Massa por unidade de área de 8 provetes de geomembrana, após imersão durante 3 meses, em água parada.

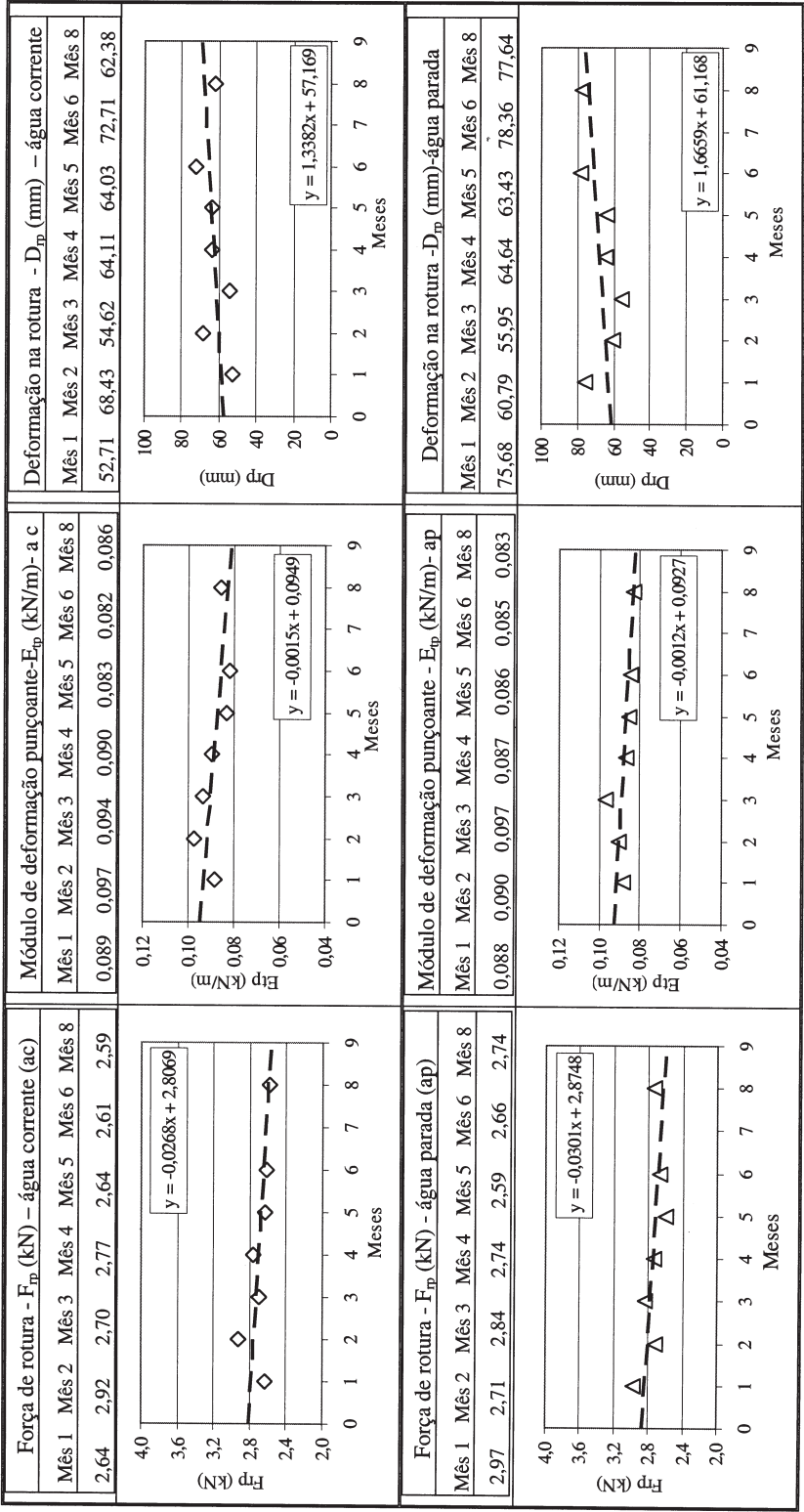


Fig. 9 – Resultados dos ensaios de Resistência ao Punçoamento Estático ao longo do tempo, em geomembranas imersas em água corrente e água parada.

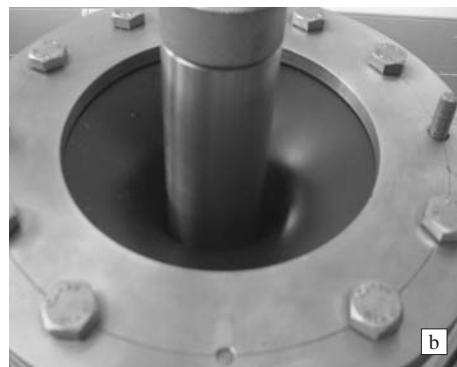
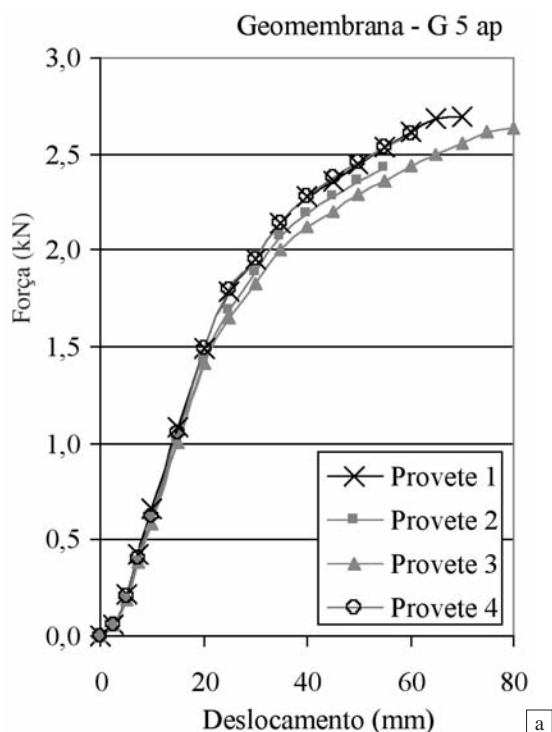


Fig. 10 – Resultados típicos de ensaios de Resistência ao Punção Estático (a); no decorrer do ensaio (b); provete após ter sido ensaiado (c).

Em relação à água mineral, apresentam-se no Quadro 2 os resultados das análises físico-químicas da água armazenada ao longo de oito meses, para as situações sem e em contacto com a geomembrana. No mesmo quadro apresentam-se ainda os resultados das análises físico-químicas da mesma água mineral, na situação jovem. Por água jovem entende-se aquela que é recolhida imediatamente após o seu ressurgimento do aquífero mineral, sem ter qualquer contacto com as geomembranas.

A água envelhecida em contacto com a geomembrana apresenta em termos genéricos uma composição química ligeiramente diferente da água jovem, no entanto situação similar verifica-se na água envelhecida sem contacto com a geomembrana, o que se justifica devido ao envelhecimento da própria água. Entretanto, salienta-se que situação particular verificou-se para o Nitrato, em que a água em contacto com a geomembrana apresenta um valor com relativo significado em relação à água jovem e envelhecida sem contacto com a geomembrana. Uma análise mais aprofundada poder-se-á efectuar com estudos detalhados dos elementos menores, incluindo os metais pesados, bem como pesquisa de mais produtos como hidrocarbonetos, cianetos e outros, até porque o facto de haver diminuição significativa da resistência da geomembrana ao longo do tempo poderá ter na sua origem reacções químicas, que interessará investigar com maior detalhe.

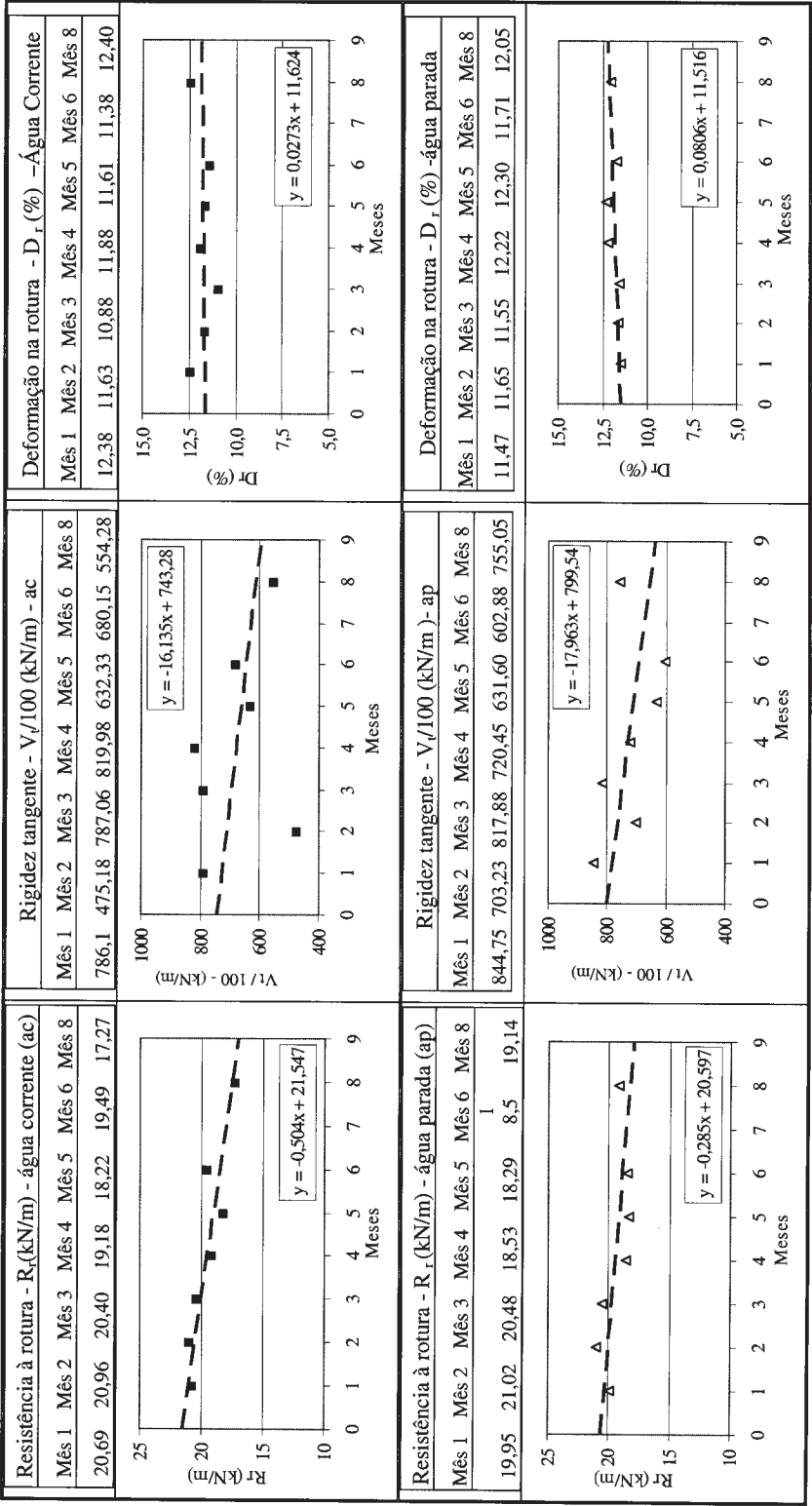


Fig. 11 – Resultados dos ensaios de Resistência à Tracção ao longo do tempo, em geomembranas imersas em água corrente e em água parada.

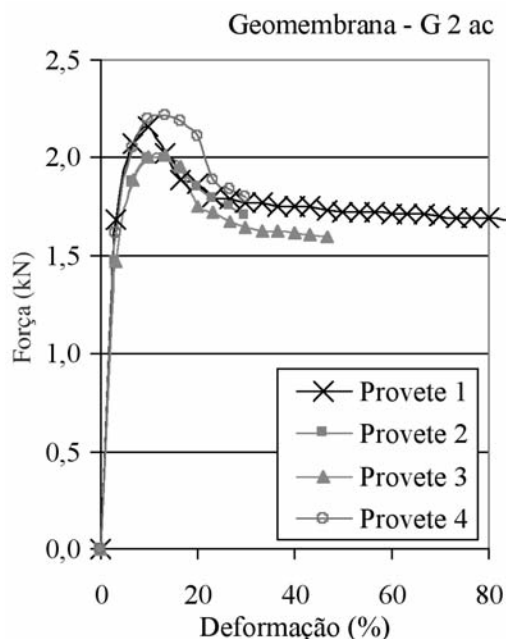


Fig. 12 – Resultados típicos de ensaios de Resistência à Tracção (a); detalhe de um ensaio no momento rotura (b).

Quadro 2 – Resultados das análises físico-químicas da água mineral sulfúrea das Termas de Unhais da Serra, antes e depois do contacto com as geomembranas imersas durante 8 meses.

Parâmetro		Água jovem sem contacto		Água armazenada ⁽³⁾	
		(1)	(2)	Sem contacto	Após contacto com a geomembrana
pH		8,84	8,74	7,28	8,14
Condutividade - $\mu\text{s cm}^{-1}$		292	281	318	320
Alcalinidade total (em HCl 0,1N)-ml/l		16,7	15,5	15,9	16,1
Resíduo seco (a 180°C) - mg/l		225,8	211,0	249,0	238,0
Dureza total (em p.p. 10 ⁵ de CaCO ₃)		0,9	0,9	1,0	1,1
Anidrido carbónico livre (CO ₂) - mg /l		n.d.	n.d.	8	n.d.
Sulfuração total (em I: 0,01N) - ml/l		11,2	11,1	<1,2	<1,2
Sílica (SiO ₂) - mg/l		53,2	52,0	58,0	57,0
Mineralização Total - mg /l		263,9	253,5	286,6	287,4
cátions (mg/l)	Sódio (Na ⁺)	67,1	63,0	70,0	70,0
	Cálcio (Ca ²⁺)	3,1	3,4	3,9	4,0
	Potássio (K ⁺)	1,9	1,9	1,9	1,9
	Magnésio (Mg ²⁺)	0,12	0,17	0,15	0,16
	Lítio (Li ⁺)	0,30	0,27	0,3	0,3
	Amónio (NH ₄ ⁺)	0,04	0,17	n.d.	n.d.

⁽¹⁾análise físico-química completa efectuada em 25/03/94; ⁽²⁾análise físico-química efectuada em 31/05/01; ⁽³⁾análises físico-químicas efectuadas em 01/10/01, após a água ter estado armazenada 8 meses; n.d. – não determinado.

Quadro 2 (Continuação) – Resultados das análises físico-químicas da água mineral sulfúrea das Termas de Unhais da Serra, antes e depois do contacto com as geomembranas imersas durante 8 meses.

Parâmetro		Água jovem sem contacto		Água armazenada ⁽³⁾	
		(1)	(2)	Sem contacto	Após contacto com a geomembrana
aniões (mg/l)	Hidrogenocarbonato (HCO_3^-)	83,0	82,7	97,0	98,4
	Cloreto (Cl^-)	25,2	22,1	26,8	26,6
	Sulfato (SO_4^{2-})	6,9	7,6	13,8	13,8
	Fluoreto (F^-)	15,0	14,0	14,7	14,8
	Carbonato (CO_3^{2-})	3,0	2,3	n.d.	n.d.
	Nitrato (NO_3^-)	< 0,10	< 0,3	<0,3	0,4
	Nitrito (NO_2^-)	< 0,002	< 0,005	<0,005	<0,005
	Hidrogenossulfureto (HS^-)	1,8	1,8	<0,2	<0,2
	Silicato (H_2SiO_4)	8,6	6,1	n.d.	n.d.
Ele- mentos menores (mg/l)	Fosfatos (H_2PO_4^-)	0,058	n.d.	n.d.	n.d.
	Alumínio (Al^{3+})	<0,020	n.d.	n.d.	n.d.
	Manganês (Mn^{2+})	0,013	n.d.	n.d.	n.d.
	Brometo (Br^{2-})	0,264	n.d.	n.d.	n.d.
	Boro (B_2O_3)	0,104	n.d.	n.d.	n.d.
	Berílio (Be)	0,0008	n.d.	n.d.	n.d.
	Chumbo (Pb)	0,006	n.d.	n.d.	n.d.
	Prata (Ag)	< 0,0008	n.d.	n.d.	n.d.
	Cádmio (Cd)	0,0003	n.d.	n.d.	n.d.
	Vanádio (V)	< 0,003	n.d.	n.d.	n.d.
	Ytrio (Y)	< 0,0001	n.d.	n.d.	n.d.
	Estanho (Sn)	< 0,003	n.d.	n.d.	n.d.
	Crómio (Cr)	< 0,002	n.d.	n.d.	n.d.
	Ferro (Fe^{2+})	<0,025	<0,03	<0,03	<0,03
	Bário (Ba^{2+})	<0,002	n.d.	n.d.	n.d.
	Iodeto (I)	<0,001	n.d.	n.d.	n.d.
	Arsénio (As_2O_3)	0,029	n.d.	n.d.	n.d.
	Tungsténio (W)	0,028	n.d.	n.d.	n.d.
	Cobre (Cu)	<0,001	n.d.	n.d.	n.d.
	Zinco (Zn)	0,013	n.d.	n.d.	n.d.
	Antimónio (Sb)	0,008	n.d.	n.d.	n.d.
	Níquel (Ni)	< 0,003	n.d.	n.d.	n.d.
	Cobalto (Co)	< 0,001	n.d.	n.d.	n.d.
	Nióbio (Nb)	< 0,0005	n.d.	n.d.	n.d.
	Molibdénio (Mo)	0,006	n.d.	n.d.	n.d.

⁽¹⁾análise físico-química completa efectuada em 25/03/94; ⁽²⁾análise físico-química efectuada em 31/05/01; ⁽³⁾análises físico-químicas efectuadas em 01/10/01, após a água ter estado armazenada 8 meses; n.d. – não determinado.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação aos ensaios mecânicos, a geomembrana imersa em água mineral sulfúrea empobrece as suas qualidades. Chega a perder resistência ao punçoamento estático na ordem de 1,05% e 0,95% por mês, quando imersa em água parada e em água corrente, respectivamente. Em relação aos ensaios de tracção a situação é ainda mais grave, uma vez que a resistência apresenta reduções da ordem de 1,38 % e 2,33% por mês nas amostras imersas em água parada e em água corrente, respectivamente. Os referidos resultados mostram períodos de vida da geomembrana, em termos de perda total de resistência, na ordem de 8 a 9 anos, (punçoamento estático) e de 4 a 6 anos (tracção-deformação).

Quanto aos resultados das análises físico-químicas da água mineral, ao comparar os resultados das águas jovem e envelhecida, com e sem contacto com a geomembrana, verificam-se, para os elementos químicos principais, pequenas diferenças, com a excepção do Nitrato, que aparece com algum significado na água envelhecida parada, em contacto com a geomembrana. Se na realidade, no controlo de qualidade de uma água mineral, o Nitrato passasse a aparecer com aqueles níveis, seria um indicador de poluição da água mineral do aquífero.

Uma vez que a geomembrana, em termos mecânicos, apresenta mudanças significativas com o tempo, torna-se necessário levar a cabo uma pesquisa mais detalhada sobre elementos menores, como os metais pesados, e ainda a pesquisa de mais produtos como hidrocarbonetos, cianetos e outros, com vista a uma maior clarificação dos aspectos envolvidos na sua degradação.

Note-se que os provetes no processo de imersão e envelhecimento, não estiveram sujeitos a quaisquer esforços mecânicos, situação que alerta para o facto de que, se as geomembranas estiverem em utilização em ambientes de águas sulfúreas, a durabilidade poder ser mais reduzida. Por fim, salienta-se que os resultados obtidos justificam um estudo mais aprofundado da durabilidade das geomembranas, sendo de realçar que só se usou um tipo de geomembrana, um número limitado de provetes, e portanto, as conclusões apresentadas não devem ser tomadas como gerais nem definitivas.

5 – AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Geodreno - Fábrica de Drenos e Geotêxteis, Lda. com sede em Ramada – Odivelas, empresa que forneceu a Geomembrana estudada na presente pesquisa. Agradece-se aos Técnicos dos Laboratórios de Geotecnia, Sr. Joaquim Manuel Varandas, e de Materiais Têxteis, Sr. Eduardo Jorge Ramos de Jesus, pelo intensivo e dedicado trabalho no âmbito da realização dos ensaios. Agradece-se ainda à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), os apoios concedidos no âmbito do Centro de Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior (CECUBI), onde esta pesquisa se insere.

6 – REFERÊNCIAS

- EN 965. Geotextiles and geotextile-related products-Determination of mass per unit area, 1995
- EN ISO 10319. Geotextiles – Wide –width tensile test, 1996
- EN ISO 12236. Geotextiles and geotextile-related products-Static puncture test (CBR-test), 1996
- Ferreira Gomes, L. M. e Machado Saraiva, C. M. Protection areas of Unhais da Serra Spa. Proc. Int. Symp. Eng. Geol. and the Environment. Balkema. Vol.2; pp.1851-1855, Athens, 1997.
- Ferreira Gomes, L. M. e Albuquerque, F. A utilização em multi-usos da água minero-termal do Campo Geotérmico de S. P. do Sul. 4º Cong. da Água, APRH, p.243 de relatos e resumos, 14p. de CD, paper 062, Lisboa, 1998.
- Ferreira Gomes, L. M.; Machado Saraiva, C. M.; Ramalho Eanes, J. S. e Pissarra Cavaleiro, V. M. Estudos hidrogeoambientais na zona da Fonte Santa da freguesia de Águas de Penamacor. 5º Cong. da Água. APRH, p111 de relatos e resumos, paper em CD, 15p. Lisboa, 2000.
- Ferreira Gomes, L. M.; Gouveia Pereira, J. J.; Reis Ferreira, S. M. e Bezerra, A. Contribuição para o conhecimento do modelo geohidráulico da água mineral das Termas do Carvalhal.- Castro Daire. 6º Cong.da Água. APRH, p.81 de resumos de comunicações, paper em CD, 11p. Porto, 2002.
- Ferreira Gomes, L. M.; Afonso de Albuquerque, F. J.; e Fresco, H. Protection areas of the São Pedro do Sul Spa, Portugal. Engineering Geology 60, Elsevier, pp.341-349, 2001a .

- Ferreira Gomes, L. M.; Daniel, J. e Pissarra Cavaleiro, V. M. O recurso hidromineral das Termas de Longroiva como uma nova água mineral em classificação. II Sem.de Rec.Geológicos, Ambiente e Ord.do Território. UTAD. pp.CO-85 a CO 97, V.Real, 2001b
- Lopes, M. L; Lopes, P. e Monteiro, A.V. Estudo da acção dos agentes atmosféricos em geotêxteis não tecidos. Rev. Águas e Resíduos; pp.11 a 16, 2001.
- Monteiro, A. J. R. V. Comportamento dos geossintéticos face a agentes presentes em aterros - uma contribuição. Dissertação para obtenção do Grau Mestre. Univ. do Porto.168 p., 1998.
- Pinto, I. M. Notas sobre geossintéticos. Mestrado Eng. Civil. Coimbra, 2000.
- Riscado Santos, F. Estabilidade físico-mecânica e hidráulica de geossintéticos em águas minerais termais. Dissertação para obtenção do Grau Mestre em Eng.^a Civil - Construção. Univ. da Beira Interior. Covilhã, 108 p., 2002.
- Riscado Santos, F.; Ferreira Gomes, L. M. e Figueiredo Nunes, M. Estabilidade de parâmetros hidráulicos de geotêxteis em ambientes de águas minerais sulfúreas. 8º Cong. Nacional de Geotecnia. SPG-LNEC. 15-18 de Abril. Lisboa. pp.1837-1847, 2002.
- Rocha Pereira, M. P. J. F. As águas sulfúreas sódicas das Termas de Unhais da Serra e de Manteigas. Diss. No âmbito de Provas de Capacidade Científica. Univ. da Beira Interior. Covilhã, 100 p., 1991.

7 – LISTA DE SÍMBOLOS

- ac – água corrente
- ap – água parada
- B – largura de um provete
- C – Carbono
- D_r – deslocamento relativo à rotura no ensaio de Resistência à Tracção
- D_{rp} – deslocamento relativo à rotura no ensaio de Resistência ao Punçoamento Estático
- EN – norma europeia
- EN ISO – norma europeia adoptada pela ISO
- E_t – deformabilidade tangente no ensaio de Resistência à Tracção
- E_{tp} – módulo de deformação punçoante no ensaio de Resistência ao Punçoamento Estático
- F_r – força de rotura no ensaio de Resistência à Tracção
- F_{rp} – força de rotura no ensaio de Resistência ao Punçoamento Estático
- H – Hidrogénio
- ISO – Organização Internacional de Normalização
- M – Massa por unidade de área
- PEAD – Polietileno de alta densidade
- R_r – resistência à rotura no ensaio de Resistência à Tracção
- V_t – rigidez tangente no ensaio de Resistência à Tracção