



**XVII CONGRESSO
NACIONAL DE GEOTECNIA**

A Geo, as ciências e a tecnologia

**X CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA**

Segurança de obras geotécnicas

LISBOA 2021

**XVII CONGRESSO
NACIONAL DE GEOTECNIA**

A Geo, as ciências e a tecnologia

**X CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA**

Segurança de obras geotécnicas

LISBOA 2021

Título
XVII CONGRESSO
NACIONAL DE GEOTECNIA
A Geo, as ciências e a tecnologia

X CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA
Segurança de obras geotécnicas

Autores
Vários

Data
Novembro 2021

Pré-impressão
Digicreate Serviços Gráficos Unipessoal, Lda

ISBN
978-989-54038-7-5

EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS PARA REPRESENTAR O COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS

CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR REPRESENTING THE TENSILE BEHAVIOUR OF GEOSYNTHETICS

Paula, António Miguel, *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções, FEUP, Portugal, mpaula@ipb.pt*

Pinho Lopes, Margarida, *RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, mlopes@ua.pt*

RESUMO

Este artigo discute equações constitutivas simples para representar a resposta em tração de curto prazo de quatro geossintéticos (geotêxtil não tecido, geogrelha tecida, geogrelha extrudada e geocompósito de reforço). As equações utilizadas e sua capacidade para reproduzir a resposta em tração dos geossintéticos são discutidas. Os parâmetros constitutivos das diferentes equações são analisados. Os modelos polinomiais aproximaram muito bem os resultados experimentais em tração a curto prazo. No entanto, os parâmetros do modelo polinomial não têm significado físico. Ao contrário do que é apresentado na literatura, os parâmetros dos modelos hiperbólicos nem sempre têm o significado físico que lhes é habitualmente atribuído. Para os materiais e condições de ensaio, nos modelos hiperbólicos, o parâmetro a e b não correspondem ao inverso do módulo de rigidez inicial e ao inverso da resistência à tração respetivamente. O parâmetro α não é uma constante do material. Os modelos usados aproximam bem a rigidez secante para 2% e 5% obtida.

ABSTRACT

The paper discusses simple constitutive equations to represent the short-term tensile response of four geosynthetics (nonwoven geotextile, woven geogrid, extruded geogrid and reinforcement geocomposite). The equations used and their ability to reproduce the tensile response of the geosynthetics are discussed. The constitutive parameters for the different equations are analysed and their physical meaning is discussed. The polynomial models approximate the experimental data for the short-term tensile response very well. However, the parameters of the polynomial model have no physical meaning. Contrary to what is reported in the literature, the parameters of the hyperbolic model not always have their assigned physical meaning. For the materials and test conditions, and for the hyperbolic models, parameters a and b do not correspond to the inverse of initial stiffness and the inverse of the tensile strength, respectively. The parameter α is not a material constant. Both models approximated well the tangent stiffness for 2% and 5% strain obtained.

1. INTRODUÇÃO

Na análise e dimensionamento de estruturas geotécnicas, nomeadamente estruturas em solo reforçado com geossintéticos, cada vez mais é frequente o recurso a programas de cálculo automático, em particular recorrendo ao método dos elementos finitos. Muitos

dos programas de cálculo disponíveis no mercado representam a resposta em tração de geossintéticos usando modelos muito simplistas, nomeadamente o modelo elástico linear ou modelos elásto-plásticos. No entanto, o comportamento em tração da maioria dos geossintéticos é não linear. Assim, caso se recorra a modelos não lineares para representar a resposta de geossintéticos, a análise de estruturas geotécnicas com geossintéticos pode ser feita de forma mais realista e precisa. Para contribuir para o conhecimento nesta área, neste trabalho apresentam-se equações constitutivas simples para representar o comportamento em tração de curto prazo de geossintéticos. Para o caso particular de quatro geossintéticos e usando resultados experimentais, os parâmetros constitutivos das diferentes equações são determinados. Os valores desses parâmetros e o seu significado físico são analisados e discutidos.

2. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS

2.1. Considerações iniciais

Para a maioria das suas aplicações em engenharia civil, as propriedades em tração dos geossintéticos são propriedades funcionais primárias. Assim, a resistência à tração e a extensão correspondente são propriedades fundamentais no dimensionamento de geossintéticos. A resposta em tração de geossintéticos pode ser representada por equações constitutivas simples, tais como equações polinomiais e equações hiperbólicas. Os parâmetros dos modelos podem ser obtidos aproximando curvas a resultados experimentais (Bathurst e Kaliakin, 2005).

2.2. Equações polinomiais

A Equação 1 representa uma equação polinomial genérica, em que T é a força de tração por unidade de largura, ε é a extensão axial, a_i é o coeficiente de ordem i do polinómio e n é o grau do polinómio. A Equação 2 representa a rigidez tangente do geossintético ($J_{t\varepsilon\%}$) para uma extensão $\varepsilon\%$ e é obtida por derivação da Equação 1. Essa rigidez é o produto do módulo de elasticidade tangente inicial, E_t , e da área da secção transversal inicial (A), assumida constante.

$$T = \sum_{i=0}^n a_i \varepsilon^i \quad [1] \quad J_{t\varepsilon\%} = AE_t = \frac{dT}{d\varepsilon} = \sum_{i=1}^n a_i \varepsilon^{i-1} \quad [2]$$

De acordo com Bathurst e Kaliakin (2005), para geossintéticos específicos os coeficientes do polinómio, a_i , podem ser obtidos através de aproximações de resultados experimentais nomeadamente usando o método dos mínimos quadrados.

2.3. Equações hiperbólicas

Em alternativa, podem ser utilizadas equações hiperbólicas para representar o comportamento em tração de geossintéticos. As equações a usar dependem do tipo de resposta em tração observada. Em geral, podem distinguir-se dois tipos de resposta em tração de geossintéticos: tipo A e tipo B (Figura 1). A resposta do tipo A é típica, por exemplo, de geogrelhas extrudidas uniaxiais em polietileno de alta densidade, enquanto a resposta de tipo B é típica de geogrelhas tecidas em poliéster.

No caso de geossintéticos que exibem uma resposta do tipo A, pode usar-se a equação constitutiva representada pela Equação 3 (Liu e Ling, 2007), com os parâmetros

constitutivos a e b (Equações 4 e 5), constantes. J_i representa a rigidez inicial e T_{ult} representa a resistência à tração do geossintético. A Equação 6 representa a rigidez tangente para uma extensão $\varepsilon\%$, $J_{t\varepsilon\%}$.

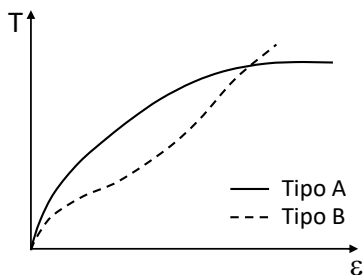


Figura 1 – Resposta em tração típica de geossintéticos: tipo A e tipo B. [sem escala]

$$T = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad [3] \quad a = \frac{1}{J_i} \quad [4]$$

$$b = \frac{1}{T_{ult}} \quad [5] \quad J_{t\varepsilon\%} = \frac{dT}{d\varepsilon} = \frac{a}{(a + b\varepsilon)^2} \quad [6]$$

Para geossintéticos que apresentam uma resposta do tipo B, Liu e Ling (2007) propõem uma equação constitutiva de base hiperbólica mais complexa (Equação 7): uma função não linear que combina uma função hiperbólica (para pequenas extensões) e uma função exponencial (para extensões mais elevadas). Nesta equação, ε_{max} é a extensão correspondente à rotura em tração, α é uma constante do material e $1/b$ é a resistência à tração do geossintético (Equação 5). A rigidez tangente para uma extensão $\varepsilon\%$, $J_{t\varepsilon\%}$, correspondente é obtida pela Equação 8.

$$T = \frac{\varepsilon}{a + 2b\varepsilon} + \frac{1}{2b} \cdot e^{-\alpha(\varepsilon - \varepsilon_{max})^2} \quad [7]$$

$$J_{t\varepsilon\%} = \frac{dT}{d\varepsilon} = \frac{a}{a + 2b\varepsilon} + \frac{-\alpha(\varepsilon - \varepsilon_{max})}{b} \cdot e^{-\alpha(\varepsilon - \varepsilon_{max})^2} \quad [8]$$

As principais vantagens das equações hiperbólicas são a sua implementação simples e o número reduzido de parâmetros intervenientes, podendo ser calibrados para geossintéticos específicos usando resultados de ensaios (Bathurst e Kaliakin, 2005).

3. GEOSSINTÉTICOS

3.1. Materiais

Neste trabalho apresentam-se as equações constitutivas que representam o comportamento em tração de quatro geossintéticos distintos (Figura 2 e Quadro 1).

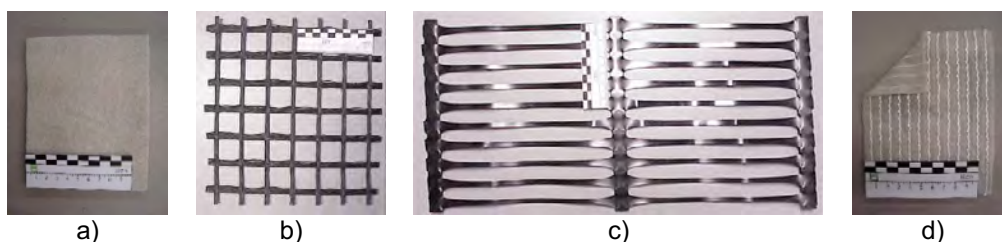


Figura 2 – Geossintéticos estudados: a) GTX; b) GGRt; c) GGRc; d) GCR.

Um geotêxtil não tecido (GTX), formado por filamentos de polipropileno (PP) mecanicamente ligados. Uma geogrelha tecida (GGRt), formada por fios de poliéster (PET) de elevada tenacidade, tecidos numa estrutura de grelha (com barras perpendiculares entre si). Uma geogrelha extrudida (GGRe), uniaxial e em polietileno de alta densidade (PEAD). E um geocompósito de reforço (GCR), constituído por um geotêxtil de base, não tecido de filamento contínuo em PP, a que estão ligados cordões de elevada rigidez em fibras de PET.

Quadro 1 – Valores nominais de propriedades dos geossintéticos estudados: resistência à tração, T_{nom} ; extensão correspondente, ϵ_{nom} ; massa por unidade de área, μ_{nom} ; espessura, d_{nom}

Geossintético	T_{nom} (kN/m)	ϵ_{nom} (%)	μ_{nom} (g/m ²)	d_{nom} (mm)
GTX	50	65	800	6
GGRt	58	10,5	380	1,6 a 1,7
GGRe	64,5	9	450	1,1 a 2,7
GCR	75	10	362	2,2

3.2. Comportamento em tração

Os geossintéticos estudados foram caracterizados através de ensaios de tração-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319 (2016); as extensões foram medidas com recurso a um vídeo-extensómetro. Os resultados apresentados correspondem a cinco provetes para cada geossintético. No Quadro 2 estão resumidos os resultados dos ensaios de tração dos quatro geossintéticos, incluindo os valores médios obtidos para a resistência à tração, extensão correspondente, rigidez secante para extensão de 2% e 5% (determinados usando a Equação 9, onde $J_{s\epsilon\%}$ é a rigidez secante, $T_{\epsilon\%}$ é a força à tração para uma extensão $\epsilon\%$ medida durante o ensaio), bem como os coeficientes de variação (CV).

$$J_{s\epsilon\%} = \frac{T_{\epsilon\%} \times 100}{\epsilon\%} \quad [9]$$

A Figura 3 inclui algumas das respostas em tração obtidas experimentalmente; por simplificação, a figura inclui os resultados obtidos apenas para um provete representativo para cada geossintético. Dois tipos diferentes de respostas foram observados nos geossintéticos: resposta do tipo A, para o GTX e a GGRe, e resposta do tipo B, para a GGRt e o GCR.

Quadro 2 – Resumo dos resultados dos ensaios de tração dos quatro geossintéticos, incluindo valores médios e coeficientes de variação (CV) para: resistência à tração, T_{ult} ; extensão correspondente, ϵ_{ult} ; módulo de rigidez secante para $\epsilon=2\%$, $J_{s2\%}$ e $\epsilon=5\%$, $J_{s5\%}$

Geossintético		T_{ult} (kN/m)	ϵ_{ult} (%)	$J_{s2\%}$ (kN/m)	$J_{s5\%}$ (kN/m)
GTX	Média	42,3	89,3	145,3	124,3
	CV (%)	5,2	5,4	31,3	13,1
GGRt	Média	70,8	16,0	585,1	323,4
	CV (%)	4,3	6,2	1,1	1,2
GGRe	Média	61,6	17,1	1024,1	703,0
	CV (%)	4,9	4,8	6,7	6,8
GCR	Média	83,5	14,2	244,6	379,8
	CV (%)	5,1	5,9	62,5	18,5

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

As curvas força de tração - extensão obtidas experimentalmente foram aproximadas a modelos polinomiais e modelos hiperbólicos (descritos na secção 2). Para garantir que

os modelos reproduzam a resposta dos geossintéticos de forma realista, apenas foram incluídos os resultados até à força de tração máxima obtida para cada provete ensaiado (i.e., foram excluídos os dados após a rotura dos provetes).

4.1. Equações constitutivas simples

Os dados experimentais foram aproximados com dois tipos de equações constitutivas simples: 1) modelo polinomial de ordem 6; 2) modelo hiperbólico Tipo A (Equação 3), para o GTX e a GGR_e, e Tipo B (Equação 7), para a GGR_t e o GCR. Em seguida foram determinados os valores médios de cada parâmetro constitutivo (correspondente aos 5 provetes ensaiados de cada geossintético). Para os modelos polinomiais todos os parâmetros a_i (Equação 1) foram obtidos a partir do exercício de ajuste à curva força de tração – extensão obtida experimentalmente. De forma semelhante, no caso dos modelos hiperbólicos, os parâmetros a , b e α , quando aplicável, foram obtidos pelo ajuste da curva à curva força de tração - extensão experimental de cada provete.

Os resultados obtidos estão resumidos no Quadro 3, onde são apresentados os valores médios dos parâmetros para os modelos usados para cada um dos geossintéticos. A Figura 3 inclui curvas força de tração-extensão de provetes representativos para cada um dos geossintéticos, obtidas experimentalmente e com as equações constitutivas estudadas. Os modelos polinomiais ajustam-se muito bem aos dados experimentais de todos os geossintéticos estudados (Figura 3 e Quadro 3), com o valor do $R^2 \sim 1$ e CV baixo. No entanto, os modelos polinomiais são funções matemáticas simples ajustadas aos dados e sem qualquer significado físico.

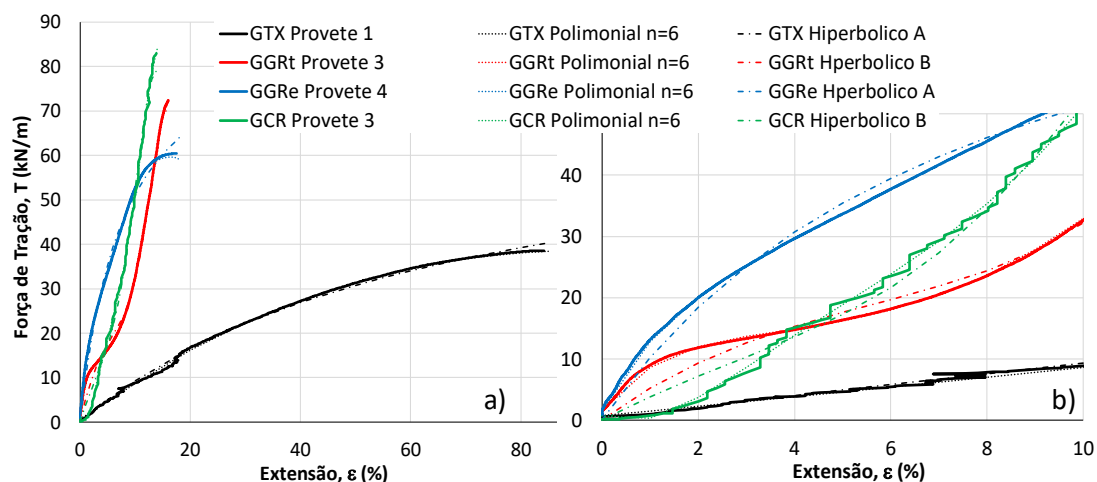


Figura 3 – Resultados experimentais e equações constitutivas simples (polinomial e hiperbólico): a) resposta dos 4 geossintéticos; b) detalhe da resposta para extensão até 10%

Pelo contrário, é habitual associar os parâmetros dos modelos hiperbólicos a parâmetros do comportamento em tração dos materiais, conforme representado nas Equações 4 e 5. O modelo hiperbólico tipo A ajustou bem os dados experimentais do GTX e da GGR_e (Figura 3a). Para a GGR_t e para o GCR foi utilizado o modelo hiperbólico tipo B; apesar de aproximar de forma razoável os dados experimentais, o modelo não consegue reproduzir a resposta dos geossintéticos de forma satisfatória para toda a gama de extensão destes geossintéticos. Para extensões mais reduzidas (~0% a ~8%), o modelo hiperbólico tipo B não reproduz os resultados experimentais de forma adequada (Figura 3b), pois não consegue capturar de forma completa a mudança na curvatura da resposta força de tração – extensão dos materiais. O Quadro 4 resume

os valores da rigidez secante, J_s , para extensão de 2% e de 5%, obtidos pelas equações correspondentes atrás referidas, usando as equações constitutivas e os dados experimentais. São também apresentados os valores da rigidez tangente, J_t , para extensão de 0%, 2% e 5% obtidos das equações constitutivas.

Quadro 3 – Parâmetros obtidos para as equações constitutivas simples do GTX, GGRt, GGR_e e GCR – média dos parâmetros obtidos para 5 provetes de cada geossintético e coeficiente de variação (CV, em %) de alguns dos parâmetros

Modelo	Parâmetros	GTX	GGRt	GGR _e	GCR
Polinomial (n=6)	a ₆	-5,225x10 ⁻¹⁰	-5,899x10 ⁻⁵	-2,891x10 ⁻⁵	4,708x10 ⁻⁵
	a ₅	1,356x10 ⁻⁷	2,695x10 ⁻³	1,807x10 ⁻³	-2,999x10 ⁻³
	a ₄	-1,306x10 ⁻⁵	-5,084x10 ⁻²	-4,372x10 ⁻²	6,408x10 ⁻²
	a ₃	5,709x10 ⁻⁴	5,302x10 ⁻¹	5,119x10 ⁻¹	-5,956x10 ⁻¹
	a ₂	-1,566x10 ⁻²	-2,941	-3,150	2,711
	a ₁	9,471x10 ⁻¹	9,198	14,10	-1,295
	a ₀	1,321	1,621	1,454	0,435
	R ²	0,999	1,000	1,000	0,999
	CV para R ²	0,059	0,013	0,012	0,023
Hiperbólico (tipo A ou tipo B)	a	0,882	0,170	0,084	0,253
	CV para a	6,123	11,630	7,233	23,193
	b	0,013	0,012	0,011	0,009
	CV para b	3,960	9,131	4,632	5,401
	α	NA	0,051	NA	0,035
	CV para a	NA	36,537	NA	13,712
	R ²	0,996	0,996	0,994	0,996
	CV para R ²	0,219	0,150	0,213	0,194

Quadro 4 – Módulo de rigidez secante ($J_{s2\%}$ e $J_{s5\%}$) e módulo de rigidez tangente ($J_{t0\%}$, $J_{t2\%}$ e $J_{t5\%}$) para extensão de 0%, 2% e 5%, respetivamente, obtidos com as equações constitutivas

Modelo	Módulo de Rigidez (kN/m)	GTX	GGRt	GGR _e	GCR
Polinomial (n=6)	$J_{s2\%}$	157,86	588,11	1025,34	242,89
	$J_{s5\%}$	114,58	321,68	701,38	374,10
	$J_{t0\%}$	94,71	919,80	1410,00	0,00
	$J_{t2\%}$	89,09	237,28	638,43	422,26
	$J_{t5\%}$	82,72	145,05	423,90	469,80
Hiperbólico (tipo A ou tipo B)	$J_{s2\%}$	110,47	458,30	955,41	372,88
	$J_{s5\%}$	105,94	345,10	732,16	353,56
	$J_{t0\%}$	113,72	593,61	1199,26	418,74
	$J_{t2\%}$	107,32	354,80	761,17	334,32
	$J_{t5\%}$	98,69	212,51	447,04	393,17

Os resultados obtidos pelos modelos polinomiais provavelmente são mais realistas e aproximam bem os valores dos resultados do ensaio de tração, pois reproduzem muito

bem as respostas experimentais observadas (Figura 3). Devido ao pequeno ruído registado nos resultados dos ensaios de tração não foi possível obter o módulo de rigidez tangente, J_t .

4.2. Análise dos resultados obtidos

4.2.1. Modelos hiperbólicos - parâmetro a

Segundo Liu e Ling (2007), o parâmetro a corresponde ao inverso da rigidez tangente inicial, $1/J_{t0\%}$, (Equação 4). A Figura 4a ilustra a relação entre o inverso da rigidez tangente inicial obtido nos modelos polinomiais (aqui considerados como uma boa aproximação aos resultados experimentais) e o parâmetro a obtido através do ajuste dos modelos hiperbólicos aos resultados experimentais (Quadro 3). Dado que a rigidez tangente inicial do GCR é zero, para estes geossintético não é possível fazer a mesma análise. Para os restantes geossintéticos, parece não haver relação entre o parâmetro a dos modelos hiperbólicos e o inverso da rigidez tangente inicial, $1/J_{t0\%}$.

Para avaliar a diferença entre os resultados obtidos para o parâmetro a e o significado físico da literatura (Equação 4) foi considerado um coeficiente de proporcionalidade, C_J (Equação 10). O valor deste coeficiente foi otimizado através de um ajuste dos valores do parâmetro a à Equação 10 e os resultados são apresentados na Figura 4. Os valores de C_J obtidos dependem do tipo de geossintético. O GTX (Figura 4c) apresenta o menor valor ($C_J=69,065$; $R^2=0$, i.e., sem qualquer relação); para a GGRt (Figura 4d) obteve-se o maior valor ($C_J=156,35$; $R^2=0,7173$). Caso a análise seja feita para o conjunto dos resultados referentes aos três geossintéticos, independentemente do tipo de geossintético (Figura 4b), obtém-se $C_J=69,921$ e $R^2=0,7956$, mostrando a fraca relação entre o parâmetro a e a equação 4.

$$a = \frac{C_J}{J_i} \tag{10}$$

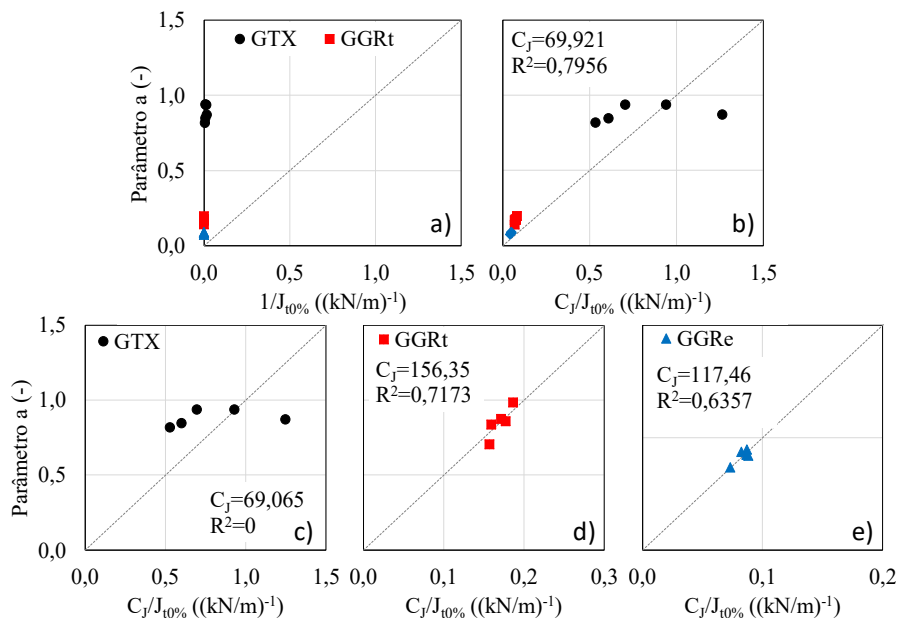


Figura 4 – Parâmetro a para os modelos hiperbólicos (com todos os parâmetros otimizados) versus $1/J_{t0\%}$ e $C_J/J_{t0\%}$ para o GTX, GGRt e GGRe

4.2.2. Modelos hiperbólicos - parâmetro b

Como referido anteriormente, o parâmetro b é habitualmente definido como o inverso da resistência à tração das amostras, $1/T_{ult}$, (Equação 5). Na Figura 5a apresenta-se a relação entre os valores de b obtidos por ajuste dos modelos hiperbólicos aos resultados experimentais e $1/T_{ult}$. Como se pode observar, os valores de b são sempre inferiores a $1/T_{ult}$ de cada amostra, especialmente para o GTX e a GGRe. Na Figura 5 são ainda apresentados os resultados obtidos para a definição do coeficiente de proporcionalidade C_T (Equação 11).

$$b = \frac{C_T}{T_{ult}} \quad [11]$$

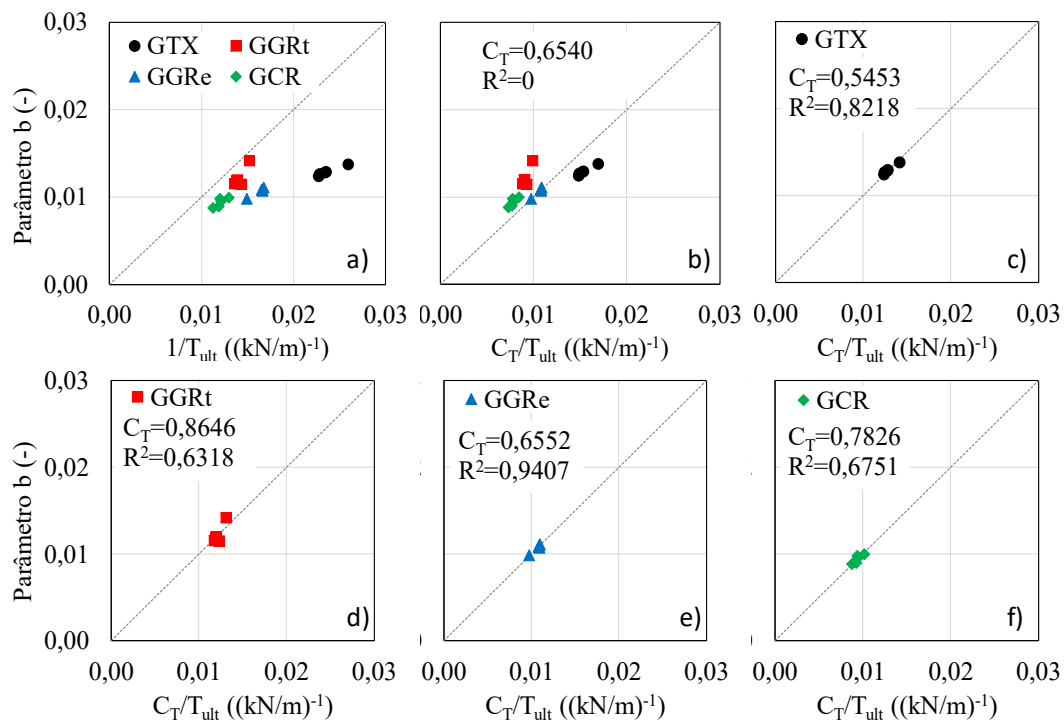


Figura 5 – Parâmetro b obtido para os modelos hiperbólicos tipo A ou B versus $1/T_{ult}$ e C_T/T_{ult}

Como se verifica na Figura 5, o valor de C_T obtido depende do geossintético analisado e varia entre $C_T=0,5453$ (GTX) e $C_T=0,8646$ (GGRt). A análise dos valores do coeficiente de determinação, R^2 , obtidos para cada geossintético indica que, em particular para o GTX e para a GGRe ($R^2=0,8218$ e $R^2=0,9407$, respetivamente), a Equação 11 é adequada para interpretar o significado físico do parâmetro b . O parâmetro C_T pode ser interpretado como o afastamento da curva força de tração – extensão em relação à hipérbole. Assim, era de esperar que os valores de R^2 fossem mais elevados para o GTX e a GGRe em que o modelo hiperbólico utilizado (tipo A) é uma hipérbole; enquanto para a GGRt e o GCR o modelo hiperbólico utilizado (tipo B) combina uma função hiperbólica (para pequenas extensões) e uma função exponencial (para extensões mais elevadas). Note-se que é comum utilizar equações constitutivas hiperbólicas para representar a resposta de solos. Nesse caso o coeficiente de rotura, R_f , comparável a C_T , varia entre 0,9 e 0,95 (Maranha das Neves e Caldeira, 2018).

4.2.3. Modelos hiperbólicos - parâmetro α

Para os modelos hiperbólicos tipo B (GGRT e GCR), os valores de α obtidos são de 0,051 para o GGRT e de 0,035 para o GCR (Quadro 3). Este parâmetro exibe alguma dispersão, representada pelo coeficiente de variação (CV) de ~36% para o GGRT e ~14% para o GCR. Paula e Pinho-Lopes (2018a e 2018b) analisaram amostras destes mesmos geossintéticos após instalação em obra ou danificação mecânica e/ou abrasão em laboratório e concluíram que α pode não ser uma constante do material.

4.2.4. Módulo de rigidez tangente, J_t , e secante, J_s

A Figura 6 resume os valores do módulo de rigidez tangente, J_t , e módulo de rigidez secante, J_s (Quadros 2 e 4). A rigidez secante (J_s) para extensão de 2% e 5% obtida pela Equação 9 permite comparações diretas com os resultados experimentais.

A rigidez tangente e secante obtida pelos modelos polinomiais provavelmente são realistas, pois reproduzem muito bem as respostas experimentais observadas (Figura 3 e 6), com diferenças inferiores a 1% para a J_s de GGRT, GGRe e GCR. Para o GTX os modelos polinomiais e hiperbólicos apresentam valores de J_t e J_s bastante próximos; no entanto, os modelos hiperbólicos superestimaram $J_{t5\%}$ relativamente aos valores obtidos pelos modelos polinomiais. Os valores de $J_{t2\%}$ e $J_{t5\%}$ obtidos pelos modelos hiperbólicos são os que apresentam maior diferença em relação aos valores obtidos pelas equações polinomiais. Particularmente para a GGRT, com variações de cerca de 50%. No geral, os modelos hiperbólicos levaram a sobrestimação de J_t em relação aos resultados experimentais (exceção GCR). Os valores de J_s estimados a partir de equações polinomiais e hiperbólicas aproximam bem os resultados experimentais, com variações máximas de cerca de 20% (GTX e $J_{s2\%}$), com exceção para GCR e $J_{s2\%}$ com uma variação de 52%.

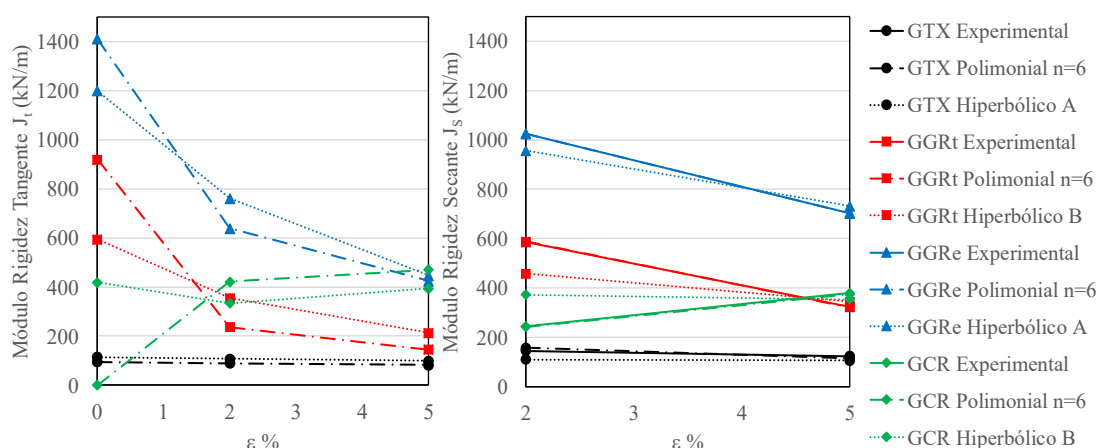


Figura 6 – Módulo de rigidez tangente, J_t , e secante, J_s , dos 4 geossintéticos estudados

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho a resposta em tração de curto prazo de quatro geossintéticos foi aproximada usando equações constitutivas simples (polinomiais e hiperbólicas). As equações utilizadas e sua capacidade para reproduzir a resposta em tração dos geossintéticos foram discutidas. As principais conclusões deste trabalho são aqui resumidas.

As equações polinomiais (de ordem 6) aproximam os resultados experimentais de tração a curto prazo melhor que os modelos hiperbólicos. Ao contrário do que é referido na literatura, para os materiais e condições de ensaio aqui apresentados, os parâmetros a e b das equações hiperbólicas não são o inverso da rigidez inicial e o inverso da resistência à tração dos materiais, respetivamente. Os modelos hiperbólicos tipo B usados para representar o comportamento em tração da GGRt e do GCR não reproduzem com rigor o comportamento real destes geossintéticos para extensões entre 0% e 8%. As equações polinomiais e hiperbólicas aproximam bem o módulo de rigidez secante obtida experimentalmente. O módulo de rigidez secante estimado através das equações polinomiais é semelhante aos resultados experimentais (em geral, variações inferiores a 1%). As equações hiperbólicas, dependendo do geossintético e da extensão considerados, podem sobrestimar ou subestimar o módulo de rigidez secante (variações entre 4% e 52%). Os valores obtidos para o coeficiente de proporcionalidade C_J mostrando a fraca relação entre o parâmetro a e o inverso do $J_{10\%}$. Os valores C_T indicam que o inverso da força máxima de tração é adequado para interpretar o significado físico do parâmetro b , particularmente para o GTX e GGRt. Os resultados apresentados parecem indicar que as equações hiperbólicas utilizadas e disponíveis na literatura, no geral, reproduzem bem a resposta força de tração –extensão dos geossintéticos estudados. No entanto, os parâmetros constitutivos correspondentes não têm o significado físico comumente atribuído na literatura.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERÊNCIAS

- Bathurst, R.J. e Kaliakin, V.N. (2005). Review of numerical models for geosynthetics in reinforcement applications. *Computer Methods and Advances in Geomechanics: 11th Intern. Conf. of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Torino, 19-24 June 2005, 4: pp. 407-416.
- Liu, H. e Ling, H.I. (2007). *Unified Elastoplastic-Viscoplastic Bounding Surface Model of Geosynthetics and Its Applications to Geosynthetic Reinforced Soil-Retaining Wall Analysis*. Journal of Engineering Mechanics. Volume 133, issue 7: pp. 801-815.
- Maranha das Neves, E. e Caldeira, L. (2018). *As Equações Constitutivas na Modelação Geotécnica*, IST Press, Lisboa, Portugal, 385 p.
- NP EN ISO 10319:2016. Geossintéticos ensaios de tração em tiras largas. NP, Lisboa.
- Paula, A.M. e Pinho-Lopes, M. (2018a). Simple constitutive models to represent the effect of mechanical damage and abrasion on the short-term load-strain response of geosynthetics. *11th Intern. Conf. on Geosynthetics*, Korea, 16-21 September 2018, S23-02.
- Paula, A.M. e Pinho-Lopes, M. (2018b). Simple constitutive models to study the influence of installation damage on the load-strain response of two geogrids. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX, Volume 1: Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2018)*, June 25-27, 2018, Porto, Portugal.