

## **EQUAÇÃO CONSTITUTIVA NÃO-LINEAR PARA REPRESENTAR O EFEITO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA NO COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE UM GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO**

### **NON-LINEAR CONSTITUTIVE EQUATION TO REPRESENT THE EFFECT OF MECHANICAL DAMAGE ON THE TENSILE BEHAVIOUR OF A NON-WOVEN GEOTEXTILE**

Lombardi, Giovanni, *Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, giovanilombardi@ua.pt\**  
Pinho-Lopes, Margarida, *Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, mlopes@ua.pt*  
Pereira, António B., *Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, abastos@ua.pt*  
Paula, António M., *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, mpaula@ipb.pt*  
*\*autor para correspondência*

#### **RESUMO**

Neste artigo, aplicou-se um modelo constitutivo simples para descrever a resposta à tração não-linear de um geotêxtil não-tecido termoligado de polipropileno, bem como a influência de danificação mecânica na resposta do material. Os parâmetros do modelo constitutivo foram analisados e seu significado físico foi discutido. Avaliou-se a capacidade do modelo constitutivo em reproduzir a resposta em tração do geotêxtil intacto e após a danificação.

#### **ABSTRACT**

This paper presents a simple constitutive model to describe the tensile response of a thermo-welded non-woven geotextile, as well as the influence of mechanical damage on its tensile response. The parameters of the constitutive model are analysed and their physical significance is discussed. Finally, the ability of the constitutive model to describe the tensile response of intact and damaged specimens of the geotextile is assessed.

## **1. REVISÃO TEÓRICA**

### **1.1. Modelos constitutivos**

A resposta à tração da maioria dos geossintéticos é não-linear, seja a curto ou longo prazo, portanto, modelos constitutivos não-lineares devem ser usados para representar o comportamento desses materiais em uma abordagem mais realista (Perkins, 2000). A resposta à tração dos geossintéticos pode ser baseada em modelos físicos ou matemáticos. Modelos físicos, como os modelos reológicos, são usados para considerar a influência de fenômenos microscópicos (Ridruejo *et al.*, 2012).

De acordo com Bathurst & Kaliakin (2005), modelos matemáticos são amplamente aplicados para descrever a resposta à tração de geossintéticos, uma vez que os parâmetros podem ser facilmente calibrados com resultados experimentais. Tais modelos são fenomenológicos, ou seja, apenas representam matematicamente os

dados experimentais, mas não consideram fenómenos microscópicos. Alguns modelos matemáticos, como por exemplo os modelos polinomiais, podem se ajustar bem aos dados experimentais, mas seus parâmetros não têm qualquer significado físico.

Por outro lado, modelos hiperbólicos são bastante precisos para modelagens analítica e numérica, e seus parâmetros podem ser relacionados às propriedades de tração dos geossintéticos (Bathurst & Naftchali, 2021). Modelos hiperbólicos têm sido amplamente utilizados em estudos sobre a resposta à tração de geossintéticos, nomeadamente as pesquisas de Yogendrakumar & Bathurst (1992), Ling *et al.* (1995), Liu & Ling (2006), Haimin *et al.*, (2015), Ezzein *et al.* (2015), Paula & Pinho-Lopes (2018a, 2018b), Bathurst & Naftchali (2021) e Lombardi *et al.* (2022).

De acordo com Liu & Ling (2006), para o tipo de resposta ilustrado na Figura 1, curvas de tração de geossintéticos podem ser descritas pelo modelo hiperbólico apresentado na Equação 1. A rigidez tangente ( $J$ ) é dada pela Equação 2, obtida pela derivada da Equação 1 em relação à deformação ( $\varepsilon$ ). Quando a deformação tende para a deformação na resistência máxima ( $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{max}$ ), a resistência à tração ( $T_{max}$ ) pode ser estimada pela Equação 3. Por fim, a rigidez inicial do material ( $J_i$ ) pode ser obtida através da Equação 4 ao impor condições de fronteira à Equação 2 ( $\varepsilon \rightarrow 0$ ).

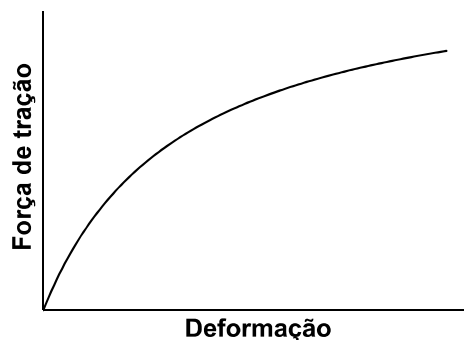


Figura 1 - Curva de tração (força de tração-deformação) típica de alguns geossintéticos

$$T = \frac{\varepsilon}{a + b \cdot \varepsilon} \quad [1]$$

$$J = \frac{dT}{d\varepsilon} = \frac{a}{(a + b \cdot \varepsilon)^2} \quad [2]$$

$$T_{max} = \frac{1}{b} \quad \varepsilon \rightarrow \varepsilon_{max} \quad [3]$$

$$J_i = \frac{1}{a} \quad \varepsilon \rightarrow 0 \quad [4]$$

Em que:

$\varepsilon$ : deformação à tração

$T$ : força de tração por unidade de largura - modelo hiperbólico

$J$ : rigidez tangente - modelo hiperbólico

$a$  e  $b$ : parâmetros do modelo hiperbólico

$\varepsilon_{max}$ : deformação na resistência máxima

$T_{max}$ : resistência máxima à tração

$J_i$ : rigidez inicial

## 1.2. Durabilidade de geossintéticos

A avaliação do comportamento mecânico e o efeito de danos sobre a resposta à tração são aspectos fundamentais para o dimensionamento de geossintéticos. A avaliação da durabilidade dos geossintéticos pode ser baseada em observações experimentais, e em testes realizados para simular as degradações esperadas durante a vida útil dos materiais. A durabilidade de um geossintético é geralmente avaliada em termos de mudanças graduais em suas propriedades físicas e mecânicas, pelo aumento de deformações, redução da resistência ou qualquer outro fator que possa comprometer o desempenho do material (Greenwood *et al.*, 2012).

Danos devidos ao transporte e à instalação são quase inevitáveis e podem levar à redução do desempenho de um geossintético devido a mudanças em sua estrutura. Por exemplo, cortes, furos, descolamento e desagregação do revestimento são danos que os geossintéticos estão sujeitos antes, durante e após a instalação. Danos devidos à instalação são imediatos, pelo que há redução rápida e irreversível da rigidez e resistência dos geossintéticos, não sendo, portanto, um problema relacionado à vida útil, embora seja um aspeto da durabilidade (Greenwood *et al.*, 2012).

Vários testes para determinar as propriedades mecânicas dos geossintéticos são baseados em condições idealizadas. No projeto, fatores de segurança são comumente aplicados sobre os valores experimentais para se levar em conta as condições *in situ*, de forma a considerar a perda de desempenho do material devido a degradações, resultando em valores admissíveis específicos do local de instalação (Koerner, 2005). A norma EN ISO 20432 (2007) classifica os fatores de redução para geossintéticos conforme apresentados a seguir.

$RF_{CR}$ : fator de redução para a rotura em fluência

$RF_{ID}$ : fator de redução para danos devidos à instalação

$RF_{WE}$ : fator de redução para o intemperismo

$RF_{CH}$ : fator de redução para o meio ambiente (danificação química e biológica)

$RF_{DYN}$ : fator de redução para cargas dinâmicas

Os fabricantes definem a resistência de um produto por sua resistência nominal garantida, que é a resistência excedida em 97,5% das medições experimentais seguindo procedimentos normalizados. A resistência máxima à tração é normalmente determinada como a resistência nominal, dividida por todos os fatores de segurança relevantes, maiores ou iguais a 1,0, resultando assim na resistência à tração admissível, conforme apresentado na Equação 5 (Greenwood *et al.*, 2012).

$$T_{allow} = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} RF_{CR} RF_{WE} RF_{CH} RF_{DYN}} \quad [5]$$

O fator de redução para danos devidos à instalação ( $RF_{ID}$ ) relaciona a resistência retida pelo material danificado – EN ISO 10722 (2019), e a resistência do material intacto – EN ISO 10319 (2015) (Shukla, 2016). Apenas o fator de redução para danos devidos à instalação é abordado neste estudo.

Lombardi *et al.* (2022) referem que os parâmetros dos modelos hiperbólicos de amostras danificadas (Y) de geossintéticos podem ser estimados aplicando os coeficientes de ajuste  $C_T$  e  $C_J$  para o material danificado (Y) e os fatores de redução  $RF_T$  e  $RF_J$  às propriedades de tração de amostras intactas (X), conforme as Equação 6

e Equação 7.  $RF_T$  e  $RF_J$  são determinados ao comparar as propriedades de tração de amostras intactas e danificadas – Equação 8 e Equação 9. Os coeficientes de ajuste  $C_J$  e  $C_T$  são determinados por regressão linear, ao relacionar o parâmetro  $a$  à rigidez inicial ( $J_i$ ) e o parâmetro  $b$  à resistência à tração ( $T_{max}$ ) – Equação 10 e Equação 11.

$$a(Y) = \frac{RF_J C_J(Y)}{J_i(X)} \quad [6]$$

$$b(Y) = \frac{RF_T C_T(Y)}{T_{max}(X)} \quad [7]$$

$$R_T = \frac{T(Y)}{T(X)} = \frac{1}{RF_T} \quad [8]$$

$$R_J = \frac{J(Y)}{J(X)} = \frac{1}{RF_J} \quad [9]$$

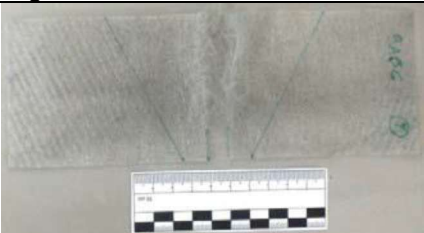
$$T_{max} = \frac{C_T}{b} \quad \varepsilon \rightarrow \varepsilon_{max} \quad [10]$$

$$J_i = \frac{C_J}{a} \quad \varepsilon \rightarrow 0 \quad [11]$$

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento de um geotêxtil não-tecido termoligado de polipropileno (Quadro 1), submetido ao ensaio de tração descrito pela EN ISO 10319 (2015). Foram analisados dados experimentais de 10 amostras, 5 delas com o material intacto e outras 5 com o material previamente submetido a danos mecânicos em laboratório, conforme os procedimentos da EN ISO 10722 (2019).

Quadro 1 - Informações do geotêxtil estudado

<b>Tipo</b>	Geotêxtil	
<b>Fabrico</b>	Não-tecido	
<b>Polímero base</b>	Polipropileno	
<b>Resistência nominal</b>	12,8 kN	
<b>Massa por área</b>	1.900 kg/m <sup>2</sup>	

Primeiramente, foi aplicada uma equação constitutiva hiperbólica (Equação 1) de ajuste aos dados experimentais para representar o comportamento não-linear à tração desse geossintético, antes e após a danificação mecânica. Os parâmetros do modelo hiperbólico foram estimados por regressão não-linear dos resultados das amostras intactas e danificadas. A Equação 2 foi usada para descrever as curvas de rigidez.

Determinar a rigidez inicial experimental ( $J_i$ ) com precisão é uma tarefa complexa devido à aplicação de pré-carga e/ou ao ruído típico observado no início de testes de tração. Portanto, os valores experimentais para  $J_i$  foram assumidos como os valores experimentais da rigidez secante correspondente à deformação de 0,5 % ( $J_{0,5\%}$ ).

Os fatores de redução  $RF_T$  e  $RF_J$  foram determinados usando a Equação 8 e Equação 9. Os coeficientes de ajuste  $C_J$  e  $C_T$  foram definidos através da Equação 10 e Equação 11, tanto para as amostras intactas quanto para as danificadas. Então, os parâmetros do modelo para amostras danificadas do geotêxtil foram estimados a partir das propriedades de tração das amostras intactas a partir da Equação 6 e Equação 7.

Os dados estimados pelo modelo hiperbólico foram estatisticamente comparados aos dados experimentais para que a capacidade de ajuste do modelo fosse analisada. Por sua vez, os dados das amostras danificadas foram comparados estatisticamente aos dados das amostras intactas a fim de que a influência da danificação mecânica sobre o comportamento do material fosse avaliado.

As comparações estatísticas foram feitas com nível de confiança de 95 % através do teste T de Student – teste de hipótese usado para comparar as médias de dois grupos de amostras independentes cujos dados seguem distribuição normal. A normalidade dos dados foi verificada usando o método de Shapiro-Wilk – aplicado a grupos com poucas amostras, e a igualdade de variâncias foi avaliada por testes de Levene (Field, 2017). Testes de hipóteses são usados para determinar se há diferença estatística significativa entre as médias de dois grupos de dados (Sheskin, 2000).

### 3. RESULTADOS E ANÁLISE

Todos os dados analisados nesta seção apresentaram distribuição normal, sejam experimentais, ajustados pelo modelo constitutivo ou estimados com base em propriedades de tração, tanto para amostras intactas quanto para as danificadas. As curvas de tração experimentais e ajustadas pelo modelo hiperbólico, assim como as curvas de rigidez tangente ajustadas estão apresentadas na Figura 2. Os coeficientes de ajuste  $C_J$  e  $C_T$  e os fatores de redução  $RF_T$  e  $RF_J$  estão listados no **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Material	Coeficientes de ajuste		Fatores de redução	
	Eq. 10	Eq. 11	Eq. 8	Eq.9
	$C_T$ m/kN	$C_J$ m/kN	$FR_T$ –	$FR_J$ –
INT: intacto (X)	0,8255	0,8606		
MEC: danificado (Y)	0,5951	0,9293	1,245	1,620

As propriedades de tração experimentais e aquelas estimadas pelo modelo hiperbólico estão dispostas no Quadro 3 (amostras intactas – INT) e Quadro 4 (amostras danificadas – MEC). Os testes de hipótese indicaram que as propriedades de tração estimadas através da Equação 1 não apresentaram diferença média significativa quando comparadas aos valores experimentais, tanto para o material intacto quanto para o danificado, o que demonstra a boa capacidade de ajuste do modelo hiperbólico.

As estimativas dos parâmetros do modelo hiperbólico e as propriedades de tração ajustadas usando a Equação 10 e Equação 11 são dadas no Quadro 5 (INT) e no Quadro 6 (MEC). Os testes de hipótese mostraram que as propriedades de tração ajustadas por  $C_J$  e  $C_T$  não apresentaram diferenças médias significativas se comparadas aos valores experimentais, seja para amostras intactas ou danificadas, o que reforça a relação entre os parâmetros do modelo e as propriedades de tração.

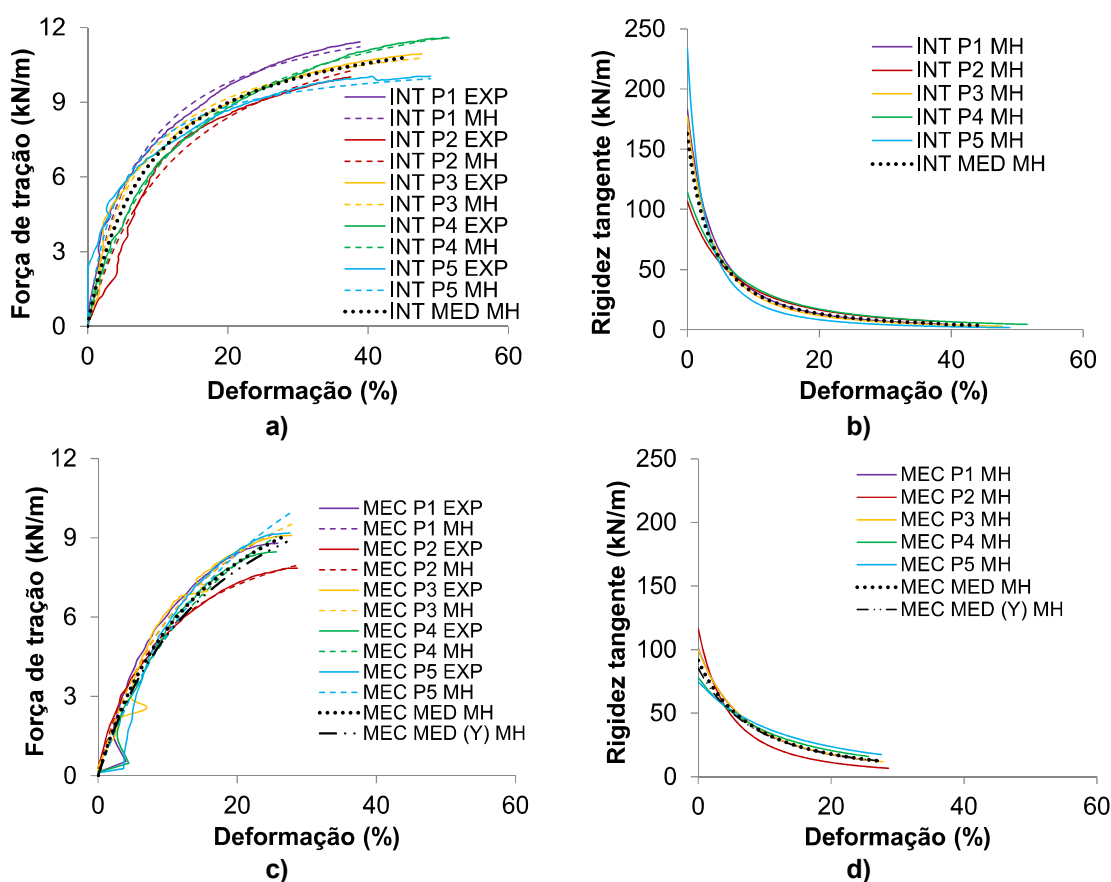


Figura 2 - Curvas de tração e de rigidez tangente. EXP: experimentais; MH: ajustadas pelo modelo hiperbólico. a) e b) material intacto; c) e e) material danificado. MED: obtida usando parâmetros médios. MED(Y): obtida usando parâmetros médios estimados pelas Eq. 6 e 7

Quadro 3 - Propriedades de tração experimentais e estimadas pelo modelo hiperbólico (INT)

Provete	Propriedades experimentais				Propriedades estimadas (Eq. 1)		
	$\epsilon_{max}$ %	$T_{max}$ kN/m	$J_{0,5\%}$ kN/m	$J_{2\%}$ kN/m	$T_{max}$ kN/m	$J_i$ kN/m	$J_{2\%}$ kN/m
INT P1	38,8	11,43	160,08	192,50	11,23	182,76	112,61
INT P2	37,5	10,01	98,77	61,75	10,26	106,54	79,94
INT P3	47,7	10,94	154,32	151,75	10,78	177,27	107,01
INT P4	51,5	11,59	105,85	124,50	11,63	114,37	85,31
INT P5	48,9	10,05	190,30	197,00	9,94	233,23	114,34
<b>Média</b>	<b>44,9</b>	<b>10,80</b>	<b>141,87</b>	<b>145,50</b>	<b>10,77</b>	<b>162,84</b>	<b>99,84</b>
S	6,3	0,75	38,69	55,58	0,69	52,63	16,06
CV (%)	14,0	6,9	27,3	38,2	6,4	32,3	16,1

No Quadro 7 são dados os parâmetros do modelo para as amostras danificadas estimados a partir das propriedades de tração do material intacto, sobre os quais foram aplicados os coeficientes de ajuste  $C_J$  e  $C_T$  e os fatores de redução  $RF_T$  e  $RF_J$  – Equação 6 e Equação 7. Ainda no Quadro 7 são apresentadas as propriedades de tração para as amostras danificadas estimadas com base nesses parâmetros por meio da Equação 10 e Equação 11.

Quadro 4 - Propriedades de tração experimentais e estimadas pelo modelo hiperbólico (MEC)

Provete	Propriedades experimentais				Propriedades estimadas (Eq. 1)		
	$\epsilon_{max}$ %	$T_{max}$ kN/m	$J_{0,5\%}$ kN/m	$J_{2\%}$ kN/m	$T_{max}$ kN/m	$J_i$ kN/m	$J_{2\%}$ kN/m
MEC P1	25,8	8,80	93,90	26,75	9,24	100,61	77,36
MEC P2	28,6	7,86	104,25	117,00	7,96	116,14	77,77
MEC P3	27,8	9,09	93,36	71,25	9,51	99,92	77,13
MEC P4	25,6	8,47	74,53	23,50	9,04	78,10	65,18
MEC P5	27,5	9,18	71,86	13,75	9,93	74,69	64,29
<b>Média</b>	<b>27,1</b>	<b>8,68</b>	<b>87,58</b>	<b>50,45</b>	<b>9,14</b>	<b>93,89</b>	<b>72,35</b>
S	1,3	0,54	13,86	43,29	0,74	17,28	6,96
CV (%)	4,8	6,2	15,8	85,8	8,1	18,4	9,6

Quadro 5 - Estimativas dos parâmetros e propriedades de tração ajustadas (INT)

Provete	Estimativa dos parâmetros			Propriedades ajustadas			
	Eq. 1			Eq. 3	Eq. 10	Eq. 4	Eq. 11
	$a(X)$ m/kN	$b(X)$ m/kN	$R^2$ -	$1/b(X)$ kN/m	$C_T(X)/b(X)$ kN/m	$1/a(X)$ kN/m	$C_J(X)/a(X)$ kN/m
INT P1	0,547	0,075	0,990	13,34	11,01	182,76	157,29
INT P2	0,939	0,072	0,982	13,80	11,39	106,54	91,69
INT P3	0,564	0,081	0,985	12,35	10,19	177,27	152,56
INT P4	0,874	0,069	0,998	14,49	11,96	114,37	98,43
INT P5	0,429	0,092	0,963	10,89	8,99	233,23	200,72
<b>Média</b>	<b>0,671</b>	<b>0,078</b>		<b>12,97</b>	<b>10,71</b>	<b>162,84</b>	<b>140,14</b>
S	0,223	0,009	-	1,40	1,15	52,63	45,29
CV (%)	33,2	11,5		10,8	10,8	32,3	32,3

Quadro 6 - Estimativas dos parâmetros e propriedades de tração ajustadas (MEC)

Provete	Estimativa dos parâmetros			Propriedades ajustadas			
	Eq. 1			Eq. 3	Eq. 10	Eq. 4	Eq. 11
	$a(X)$ m/kN	$b(X)$ m/kN	$R^2$ -	$1/b(X)$ kN/m	$C_T(X)/b(X)$ kN/m	$1/a(X)$ kN/m	$C_J(X)/a(X)$ kN/m
MEC P1	0,994	0,070	0,953	14,33	8,53	100,61	93,50
MEC P2	0,861	0,096	0,997	10,46	6,23	116,14	107,93
MEC P3	1,001	0,069	0,978	14,46	8,61	99,92	92,86
MEC P4	1,280	0,061	0,954	16,50	9,82	78,10	72,58
MEC P5	1,339	0,052	0,951	19,18	11,41	74,69	69,41
<b>Média</b>	<b>1,095</b>	<b>0,069</b>		<b>14,99</b>	<b>8,92</b>	<b>93,89</b>	<b>87,25</b>
S	0,205	0,016	-	3,20	1,91	17,28	16,06
CV (%)	18,7	23,5		21,4	21,4	18,4	18,4

Os testes de hipótese indicaram que os parâmetros do modelo e as propriedades de tração para o material danificado estimados com base nas propriedades de tração do material intacto não apresentaram diferença média significativa quando comparados aos parâmetros do modelo obtidos por regressão numérica e às propriedades experimentais do material danificado. Com base nos parâmetros estimados através da Equação 6 e Equação 7, foi possível descrever com considerável precisão as curvas de tração e de rigidez para o material danificado – MEC MED (Y) MH, conforme pode ser observado na Figura 2c e Figura 2d. Para tanto, devem ser conhecidos os coeficientes de ajuste  $C_T$  e  $C_J$  e os fatores de redução  $RF_T$  e  $RF_J$ .

Quadro 7 - Parâmetros do modelo e propriedades de tração para amostras danificadas estimados a partir das propriedades de tração das amostras intactas

Provete	Parâmetros estimados		Propriedades estimadas	
	Eq. 6	Eq. 7	Eq. 10	Eq. 11
	$a(Y)$ m/kN	$b(Y)$ m/kN	$C_T(Y) / b(Y)$ kN/m	$C_J(Y) / a(Y)$ kN/m
INT P1	0,957	0,066	9,02	97,10
INT P2	1,642	0,072	8,24	56,60
INT P3	0,987	0,069	8,66	94,18
INT P4	1,529	0,064	9,34	60,76
INT P5	0,750	0,074	7,99	123,92
<b>Média</b>	<b>1,173</b>	<b>0,069</b>	<b>8,65</b>	<b>86,51</b>
S	0,390	0,004	0,55	27,96
CV (%)	33,2	6,4	6,4	32,3

#### 4. CONCLUSÕES

Neste artigo, um modelo constitutivo simples foi usado para descrever a resposta de tração não-linear de um geotêxtil não-tecido termoligado de polipropileno, assim como o efeito do dano mecânico na resposta do material. Os parâmetros do modelo constitutivo foram analisados e seu significado físico discutido. A capacidade do modelo constitutivo de reproduzir a resposta de tração de geotêxteis intactos e danificados foi avaliada. As conclusões do estudo estão resumidas a seguir.

As propriedades de tração estimadas pela Equação 1 não apresentaram diferença significativa quando comparadas aos valores experimentais, para o material intacto ou danificado, o que demonstra a boa capacidade de ajuste do modelo hiperbólico.

As propriedades de tração ajustadas por  $C_J$  e  $C_T$  não apresentaram diferenças significativas se comparadas aos valores experimentais, para amostras intactas ou danificadas, o que reforça a relação entre os parâmetros do modelo e as propriedades de tração do material.

Os parâmetros do modelo e as propriedades de tração para o material danificado estimados com base nas propriedades de tração do material intacto não apresentaram diferença significativa quando comparados aos parâmetros do modelo obtidos por regressão numérica e às propriedades experimentais do material danificado.

Com base nos parâmetros estimados pela Equação 6 e Equação 7, foi possível descrever com considerável precisão as curvas de tração e de rigidez para o material danificado. Para tanto, devem ser conhecidos os coeficientes de ajuste  $C_J$  e  $C_T$  e os fatores de redução  $RF_T$  e  $RF_J$ .

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado financeiramente pela FCT ("Fundação para a Ciência e a Tecnologia" - Portugal), através da bolsa de doutorado com a referência 2020.07874.BD (primeiro autor).

Este trabalho foi apoiado pela PRR (Plano de Resiliência Português por meio da União Europeia - NextGenerationEU), através do projeto TRANSFORM.

O apoio financeiro da FCT ("Fundação para a Ciência e a Tecnologia" - Portugal) é reconhecido através dos projetos FCT/UIDB/ECI/04450/2020 (RISCO), FCT/UIDB/04708/2020 (CONSTRUCT), e FCT/UIDB/00481/2020 e FCT/UIDP/00481/2020 (TEMA); e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional Centro Portugal (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria PORTUGAL 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

## REFERÊNCIAS

- Bathurst, R. J., & Kaliakin, V. N. (2005). Review of numerical models for geosynthetics in reinforcement applications. *11th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 4(19-24 June), 407–416.
- Bathurst, R. J., & Naftchali, F. M. (2021). Geosynthetic reinforcement stiffness for analytical and numerical modelling of reinforced soil structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4), 921–940. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.01.003>.
- Ezzein, F. M., Bathurst, R. J., & Kongkitkul, W. (2015). Nonlinear load–strain modeling of polypropylene geogrids during constant rate-of-strain loading. *Polymer Engineering & Science*, 55(7), 1617–1627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pen.23999>.
- Field, A. (2017). *Discovering Statistics Using SPSS* (5th ed.). SAGE Publications Ltd.
- Greenwood, J. H., Schroeder, H. F., & Voskamp, W. (2012). *Durability of Geosynthetics*. CUR Building & Infrastructure.
- Haimin, W., Yiming, S., Linjun, D., & Zhaoming, T. (2015). Implementation and verification of a geosynthetic-soil interface constitutive model in the geogrid element of FLAC3D. *Acta Geotechnica Slovenica*, 12(1), 27–35.
- EN ISO 20432 (2007). *Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement*.
- EN ISO 10319 (2015). *Geosynthetics — Wide-width tensile test*.
- EN ISO 10722 (2019). *Geosynthetics — Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading — Damage caused by granular material*.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Ling, H. I., Tatsuoka, F., & Tateyama, M. (1995). Simulating performance of GRS-RW by finite-element procedure. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4), 330–340. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:4\(330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:4(330)).
- Liu, H., & Ling, H. I. (2006). Modeling cyclic behavior of geosynthetics using mathematical functions combined with Masing rule and bounding surface plasticity. *Geosynthetics International*, 13(6), 234–245. <https://doi.org/10.1680/gein.2006.13.6.234>.
- Lombardi, G., Paula, A. M., & Pinho-Lopes, M. (2022). Constitutive models and statistical analysis of the short-term tensile response of geosynthetics after damage. *Construction and Building Materials*, 317, 125972. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125972>.
- Paula, A. M., & 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. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX, Volume 1 - 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE)*.
- Paula, A. M., & Pinho-Lopes, M. (2018b). Simple constitutive models to study the influence of installation damage on the load-strain response of two geogrids. *11th*

*Internat. Conference on Geosynthetics.*

- Perkins, S. W. (2000). Constitutive modeling of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(5), 273–292. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(99\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(99)00021-7)
- Ridruejo, A., González, C., & Llorca, J. (2012). A constitutive model for the in-plane mechanical behavior of nonwoven fabrics. *International Journal of Solids and Structures*, 49(17), 2215–2229. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.04.014>.
- Sheskin, D. J. (2000). Parametric and non parametric statistical procedures: Third edition. In *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures: Third Edition*. Chapman & Hall/CRC.
- Shukla, S. K. (2016). An Introduction to Geosynthetic Engineering. In *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/b21582>.
- Yogendrakumar, K., & Bathurst, R. J. (1992). Numerical Simulation of Reinforced Soil Structure During Blast Loads. *Transportation Research Record*, 1–8.