XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/16

Análise dos Fatores que Influenciam na Resistência ao Arrancamento em Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos

Alana Benedetto de Oliveira
Mestranda em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, alana.benedetto@usp.br

Matheus Pena da Silva e Silva
Professor Doutor, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil, mpena@ufam.edu.br

RESUMO: Muros de solo reforçado com geossintéticos são fundamentais para a estabilidade de obras civis, porém a complexidade da interação solo-reforço exige maior precisão nos projetos. Este estudo objetivou identificar os principais fatores que influenciam a força máxima de arrancamento na interface solo-geossintético. A metodologia consistiu na análise estatística de uma base de dados secundários, composta por informações de estudos nacionais e internacionais sobre ensaios de arrancamento, processadas com o auxílio do software JAMOVI. Os principais aspectos analisados evidenciaram que variáveis como o diâmetro D_{50} e a densidade seca impactam negativamente a força máxima de arrancamento. Em contrapartida, parâmetros como o diâmetro D_{10}, ângulo de atrito interno, coesão, resistência à tração e alongamento do geossintético, além da sobrecarga aplicada e espessura do reforço, exercem influência positiva, aumentando a resistência da interface. Conclui-se que a seleção criteriosa das propriedades do solo e do tipo de geossintético é indispensável para maximizar a eficiência do sistema, garantindo a segurança e a eficácia de projetos de solo reforçado.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Reforçado, Geossintéticos, Ensaio de Arrancamento, Interação solo-reforço.

ABSTRACT: Geosynthetic-reinforced soil walls are fundamental to the stability of civil works; however, the complexity of the soil-reinforcement interaction demands greater precision in design. This study aimed to identify the main factors influencing the maximum pull-out force at the soil-geosynthetic interface. The methodology consisted of a statistical analysis of a secondary database, composed of information from national and international studies on pull-out tests, processed using JAMOVI software. The main aspects analyzed showed that variables such as diameter D50 and dry density negatively impact the maximum pull-out force. Conversely, parameters such as diameter D10, angle of internal friction, cohesion, tensile strength, and elongation of the geosynthetic, in addition to the applied surcharge and reinforcement thickness, exert a positive influence, increasing the interface resistance. It is concluded that the careful selection of soil properties and the type of geosynthetic is indispensable to maximize the system's efficiency, ensuring the safety and effectiveness of reinforced soil projects.

KEYWORDS: Reinforced soil, Geosynthetics, Pull-out test, Soil-reinforcement interaction.

1 INTRODUÇÃO

A construção de solos reforçados consolidou-se como uma alternativa economicamente vantajosa na engenharia civil, especialmente em regiões com relevo acidentado e condições geotécnicas adversas. Nesse contexto, os muros de solo reforçado com geossintéticos, como geotêxteis e geogrelhas, destacam-se por viabilizar o aproveitamento do solo local, simplificando o processo construtivo, aumentando a resistência a recalques e reduzindo a dependência de materiais externos (Koerner, 2012; Lima, 2016).

A literatura técnica especializada indica que a resistência ao arrancamento em solos reforçados com geossintéticos é influenciada por múltiplos fatores inter-relacionados. Estudos como os de Moraci e Recalcati (2006) e Palmeira (2009) convergem ao apontar que as propriedades dos solos, especialmente ângulo de atrito, granulometria e compacidade, exercem papel preponderante na mobilização da resistência por atrito na interface. Da mesma forma, características dos geossintéticos, como rigidez, abertura da malha e geometria das transversais em geogrelhas, são destacadas como determinantes para o intertravamento mecânico com o solo. Há consenso na literatura de que solos bem graduados e com partículas angulares tendem a proporcionar melhores resultados de arrancamento, enquanto solos finos e coesivos frequentemente apresentam desempenho inferior devido à baixa capacidade de drenagem e à dificuldade de intertravamento (Bathurst et al., 2009; Sieira et al., 2009).

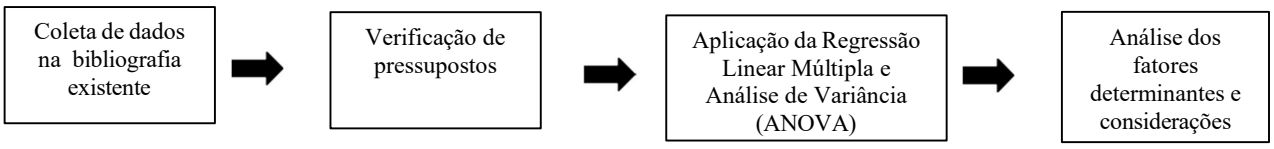
Entretanto, observam-se divergências quanto à magnitude relativa da influência de cada parâmetro. Enquanto algumas pesquisas enfatizam a predominância das propriedades do geossintético sobre o comportamento da interface (Lopes e Ladeira, 1996), outras defendem que as características do solo são o fator preponderante, sobretudo em condições de confinamento elevado (Abramento e Pinto, 1994). Essas controvérsias evidenciam a necessidade de análises integradas que considerem a interação entre os dois materiais de forma sistêmica. Estudos recentes baseados em análises estatísticas de bases de dados experimentais também têm buscado quantificar a influência simultânea dessas variáveis, demonstrando que tanto as propriedades dos solos quanto dos geossintéticos desempenham papel relevante na resistência ao arrancamento, embora com diferentes magnitudes de influência (OLIVEIRA, 2025).

Nesse contexto, o presente estudo contribui ao propor uma abordagem quantitativa baseada em dados da literatura, permitindo não apenas identificar quais propriedades dos solos e geossintéticos exercem maior impacto na força máxima de arrancamento, mas também analisar a natureza dessa influência, positiva ou negativa, e estabelecer correlações e tendências que possam subsidiar decisões de projeto com maior embasamento técnico.

2 METODOLOGIA

A estratégia experimental deste estudo baseia-se no levantamento e na sistematização de dados secundários provenientes da literatura técnica especializada sobre ensaios de arrancamento. Para viabilizar a análise estatística, foram selecionados estudos que abrangem diversos contextos geotécnicos, permitindo a composição de um banco de dados heterogêneo. O tratamento dos dados coletados foi realizado por meio do software estatístico JAMOVI, utilizado para a execução de análises multivariadas. O processo inicia-se com a organização e a padronização das grandezas físicas e mecânicas dos materiais. Na sequência, aplica-se a Análise de Variância (ANOVA) para verificar a significância dos fatores de influência, seguida pelo ajuste de modelos de regressão linear para determinar a correlação entre as propriedades dos solos, dos geossintéticos e a resistência da interface. Para assegurar a robustez das inferências, a metodologia inclui a verificação dos pressupostos estatísticos, como a normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias. Abaixo, apresenta-se um fluxograma que ilustra o processo metodológico desta pesquisa:

Fluxograma 1. Processo metodológico da pesquisa



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Regressão Linear

3.1.1 Coleta de dados

Embora exista um número significativamente maior de estudos sobre ensaios de arrancamento disponíveis na literatura, nem todos apresentavam informações suficientes para compor uma base de dados única e consistente para análise estatística. Dessa forma, foram adotados critérios de seleção baseados na disponibilidade e compatibilidade dos parâmetros investigados neste estudo.

Foram incluídos apenas ensaios que apresentavam, de forma simultânea, a força máxima de arrancamento e as variáveis independentes consideradas na análise, tais como características granulométricas do solo, propriedades geotécnicas, condições de carregamento e parâmetros físicos e mecânicos dos geossintéticos. Diversos trabalhos consultados foram excluídos por apresentarem informações incompletas, ausência de variáveis relevantes ou diferenças metodológicas que impossibilitavam sua comparação direta com os demais dados.

Após a aplicação desses critérios de elegibilidade, obteve-se uma base final composta por 252 resultados de ensaios de arrancamento provenientes de estudos nacionais e internacionais. Considera-se que essa quantidade de observações é adequada para a realização das análises estatísticas propostas, permitindo avaliar de forma consistente a influência dos parâmetros selecionados sobre a força máxima de arrancamento na interface solo-geossintético. Ressalta-se ainda que esta pesquisa constitui uma análise inicial e exploratória do problema. A relação das fontes e estudos consultados encontra-se detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Banco de dados representativo da pesquisa

Pesquisa Utilizada (Caso)	Classificação do Solo	D10 (mm)	D50 (mm)	γd (kN/m3)	ϕ (°)	Coesão (kPa)	Geossintético utilizado	Resist. Tração (kN/m)	Alongamento na ruptura (%)	Espessura do reforço(mm)	Sobrecarga (kPa)	Força Máx. Arrancamento (kN/m)
Teixeira (1999)	Granular	0	0,13	-	36	15	Geogrelha T2	200	12	-	25	20,58
F. Ferreira (2020)	Granular	0,09	1	17,3	46,6	15,8	Geogrelha T2	69,5	8	-	25	36
M.K.A. Ismail (2021)	Granular	-	0,571	16,8	46,8	0	Geogrelha T2	22,34	10	1,2	100	19,68
M.R. Abdi (2011)	Fino	-	0,75	15,5	10	23,2	Geogrelha T2	80	13	0,3	75	51
Malik Rizwan (2022)	Granular	-	-	17,69	42,9	0	Geotêxtil	3,3	6,8	1,2	1,5	0,585
M. Oliveira (2015)	Granular	0,26	0,43	16,45	35,7	38	Geogrelha T1	55	11,5	0,3	40	53
Hutcherson (2012)	Granular	-	-	16,34	34	-	Geogrelha T2	27	-	0,059	48,26	244,51
L. Becker (2006)	Granular	0,02	0,4	18,02	34,2	10	Geogrelha T2	35	12	1	7,2	16,23
A. Koczicki (2022)	Granular	0,09	0,5	16,4	35	0	Geogrelha T2	50	-	1,2	15	4
M.G. Rodriguez (2018)	Granular	0,09	0,5	16,4	35	0	Geogrelha T1	50	-	1	15	2
Sayão (2021)	Fino	-	-	18,1	24	30	Geogrelha T2	97	12	-	50	62,5
J.A. Ferreira (2021)	Granular	0,6	-	22,7	45	-	Geogrelha T2	50	-	1,5	7	7,3
A. Sieira (2008)	Granular	0,07	0,7	16,71	16	37	Geogrelha T2	47	12,8	1,2	25	32,7
L. Heliodora (2009)	Fino	0,07	0,7	-	37	16	Geotêxtil	200	13	2,3	100	107
A.F. Bolt (2000)	Granular	0,61	1,19	16,71	34	-	Geogrelha T2	44	-	0,315	100	43
Ana Cristina Castro F, Sieira, 2008	Granular	0,07	0,7	-	16	37	Geogrelha	47	12	2,6	25	31,1

3.1.2 Anova omnibus

A Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada para determinar a significância estatística das variáveis preditoras no modelo de regressão linear múltipla. Este método permite distinguir as variações causadas por efeitos sistemáticos das variáveis independentes daquelas decorrentes de erros aleatórios ou ruídos experimentais, isolando o impacto individual e simultâneo de cada parâmetro sobre a variável resposta. A identificação da relevância de cada fator baseou-se no critério do p-valor (Probabilidade > F), em que valores inferiores a 0,05 indicam uma correlação estatisticamente robusta, com probabilidade de erro inferior a 5%.

Complementarmente, utilizou-se a estatística F como indicador da magnitude do impacto de cada variável: quanto maior o valor de F, superior é a proporção da variância da força de arrancamento explicada pelo parâmetro em questão, permitindo hierarquizar os fatores de maior influência no comportamento do sistema. Os resultados detalhados desta análise, que fundamentam a precisão das conclusões obtidas, encontram-se sistematizados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados teste ANOVA omnibus

Preditor	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Geossintético utilizado	2465	2	1232,6	22,12	<0,001
Classificação do solo	247	1	246,8	4,43	0,04
D10 (mm)	255	1	255,1	4,58	0,037
D50(mm)	597	1	596,9	10,71	0,002
γd (kN/m³)	283	1	283	5,08	0,029
φ (º)	1029	1	1029,5	18,48	<0,001
Coesão(kPa)	301	1	301	5,4	0,024
Resistência à tração longitudinal do geossintético (kN/m)	774	1	773,9	13,89	<0,001
Alongamento na ruptura no ensaio de tração (%)	464	1	463,9	8,33	0,006
Sobrecarga (kPa)	1185	1	1184,6	21,26	<0,001
Espessura do geossintético (mm)	1281	1	1281,3	23	<0,001
Resíduos	2786	50	55,7		

A análise dos resultados da ANOVA omnibus apresentada na Tabela 1 indica que todos os preditores avaliados exercem influência estatisticamente significante sobre a variável de resposta, uma vez que todos os valores de p situam-se abaixo do limiar de 0,05. Entre os fatores analisados, a espessura do geossintético e o tipo de geossintético utilizado destacam-se como as variáveis de maior impacto, apresentando as maiores razões F e níveis de significância extremamente elevados ($p < 0,001$). Esse cenário sugere que as características intrínsecas do material de reforço e sua geometria nominal são determinantes para o desempenho do sistema, superando inclusive a influência isolada de algumas propriedades do solo.

No que diz respeito aos parâmetros geotécnicos, observa-se que a sobrecarga aplicada e o ângulo de atrito interno possuem um peso estatístico consideravelmente superior à coesão. Tal disparidade indica que o comportamento do modelo é regido primordialmente por mecanismos de atrito e confinamento lateral, sendo a parcela coesiva um fator secundário, embora ainda relevante. Quanto à granulometria, a influência do D50 sobre a variância dos dados é mais pronunciada do que a do D10, sinalizando que a distribuição granulométrica média do aterro desempenha um papel mais crítico na interação solo-geossintético do que o diâmetro efetivo dos finos.

Por fim, as propriedades mecânicas de tração e alongamento também se mostraram fundamentais, com a resistência à tração longitudinal apresentando um impacto robusto. Curiosamente, embora a classificação do solo seja estatisticamente significante (p = 0,04), ela apresenta o menor valor de F (4,43) entre todos os preditores, o que sugere que as propriedades físicas e mecânicas específicas (como peso específico e parâmetros de resistência) explicam a variação dos resultados de forma muito mais precisa do que a simples categorização granulométrica do material. Em suma, o modelo demonstra que o desempenho é uma função complexa onde as variáveis de projeto e os parâmetros de atrito do solo predominam sobre as características de classificação geral.

3.1.3 Verificação de pressupostos

A validade e a confiabilidade das inferências extraídas do modelo de regressão linear foram asseguradas mediante a verificação dos pressupostos estatísticos fundamentais. A independência dos resíduos foi avaliada pelo teste de Durbin-Watson, que apresentou uma estatística de 1,83 (p = 0,088). Este valor, por aproximar-se de 2, indica a ausência de autocorrelação serial significativa, garantindo que as estimativas dos coeficientes sejam imparciais e eficientes. Complementarmente, a normalidade dos resíduos foi confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk (Estatística = 0,985; p = 0,643), onde a manutenção da hipótese nula atesta que os intervalos de confiança e os testes de significância do modelo são estatisticamente válidos.

A análise da colinearidade entre os preditores, realizada por meio do Fator de Inflação da Variância (VIF), revelou valores compreendidos no intervalo de 1,16 a 4,15. Como todos os índices permaneceram significativamente abaixo do limite crítico de 10, e os valores de tolerância mantiveram-se superiores a 0,1, confirma-se que não há redundância excessiva ou multicolinearidade que comprometa a integridade do modelo. A convergência desses resultados demonstra que cada variável exerce uma contribuição independente e robusta, conferindo a precisão necessária para a interpretação dos coeficientes estimados na análise geotécnica proposta.

3.1.4 Regressão linear múltipla

As interações entre solo e geossintético foram investigadas por meio de análise de regressão linear múltipla para cada combinação de materiais. Inicialmente, a intenção era criar modelos globais que integrassem todas as propriedades selecionadas. Contudo, a análise estatística revelou que o tamanho da amostra e a área de abertura da grelha apresentavam valores de p superiores a 0,05, o que impediu a construção de um modelo preditivo unificado e estatisticamente válido que incluísse essas variáveis.

Para viabilizar as previsões, as geogrelhas foram segmentadas em dois grupos distintos: o Tipo 1, composto por materiais de PVC e malhas estruturais de composição indefinida, e o Tipo 2, que reúne materiais de poliéster (PET) e polietileno de alta densidade (PEAD). Diante da impossibilidade de um modelo abrangente, novos modelos foram derivados para cada combinação específica, focando na previsão da força última de arrancamento e omitindo as variáveis sem significância estatística. Os modelos resultantes, juntamente com a validação de suas premissas estatísticas, estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes do modelo de regressão linear

Preditor	Estimativa	Erro-padrão	t	p	Estimativas Estandardizadas
Intercepto	-64,4241	42,3907	-1,52	0,135	-
Geogrelha tipo 2 - Geotêxtil	45,9873	5,1559	6,34	<0,001	2,784
Geogrelha tipo 1 - Geotêxtil	20,7037	7,2572	3,19	0,002	1,253
Solo fino - Solo granular	15,0684	7,1593	2,105	0,04	0,912
D10 (mm)	62,4225	29,1764	2,139	0,037	0,451
D50 (mm)	-29,1175	8,8966	-3,2729	0,002	-0,595
γd (kN/m³)	-3,624	1,6081	-2,2536	0,029	-0,15
ϕ (°)	2,4818	0,5774	4,2983	<0,001	1,023
Coesão (kPa)	0,5571	0,2397	2,3243	0,024	0,463
Resistência à tração (kN/m)	0,0921	0,0247	3,7268	<0,001	0,282
Alongamento na ruptura (%)	0,5407	0,1874	2,8855	0,006	0,347
Sobrecarga (kPa)	0,4376	0,0949	4,6107	<0,001	0,451
Espessura do geossintético (mm)	14,0129	2,9222	4,7953	<0,001	0,64

A análise da regressão linear apresentada fornece informações relevantes sobre os fatores que influenciam a força máxima de arrancamento em sistemas de solo reforçado com geossintéticos. O modelo apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,835, indicando que 83,5% da variabilidade na força máxima de arrancamento é explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo. O valor ajustado do R^2, de 0,796, confirma a qualidade do ajuste, sugerindo que o modelo é robusto e adequado para descrever as relações entre as variáveis analisadas.

A análise da regressão linear múltipla para a força máxima de arrancamento ($F_{máx}$) revela um modelo estatisticamente robusto, onde todos os preditores, à exceção do intercepto, apresentam níveis de significância inferiores a 0,05. O comportamento do sistema é predominantemente governado pelas características de interface do reforço, sendo a Geogrelha tipo 2 o fator de maior impacto positivo no modelo (β = 2,784). Esse resultado indica uma superioridade técnica desse material em relação ao geotêxtil de referência, o que pode ser atribuído ao mecanismo de intertravamento mecânico proporcionado pelas aberturas da geogrelha com as partículas do solo. A espessura do geossintético e sua resistência à tração longitudinal também contribuem positivamente, sugerindo que materiais mais robustos e rígidos facilitam a mobilização de tensões na interface. No que tange aos parâmetros geotécnicos, o ângulo de atrito (ϕ) destaca-se como o preditor de maior relevância relativa (β = 1,023). Fisicamente, essa relação é coerente com a teoria clássica de arrancamento, uma vez que a resistência é gerada primordialmente pelo atrito entre o solo e o geossintético. A coesão, embora estatisticamente significante, exerce um papel secundário na magnitude da força máxima quando comparada ao atrito. Um aspecto interessante reside nos coeficientes negativos do D50 (β = -0,595) e do peso específico seco (γ_d), sugerindo que solos com diâmetros médios menores ou arranjos que favoreçam uma maior superfície de contato específica tendem a otimizar a força de arrancamento neste conjunto de dados. Por outro lado, o D10 apresenta uma correlação positiva, indicando que a fração de partículas correspondente ao diâmetro efetivo auxilia no travamento inicial do reforço.

A influência da sobrecarga aplicada também é confirmada como um motor essencial para a resistência, apresentando um coeficiente positivo e significativo (β = 0,451). O aumento da tensão normal sobre o plano de reforço eleva diretamente a força de atrito disponível, um comportamento esperado em ensaios de arrancamento. Em síntese, a análise dos coeficientes demonstra que o modelo é capaz de capturar as principais nuances físicas do fenômeno, priorizando o tipo de reforço e o ângulo de atrito como as variáveis de projeto mais determinantes. A combinação desses fatores permite uma estimativa precisa da força máxima, fundamentando a aplicação dos materiais em projetos de solo reforçado com alto grau de confiança estatística.

A equação final para a estimativa da força máxima de arrancamento (F_{max}), baseada nos coeficientes da regressão linear múltipla apresentados, é estruturada da seguinte forma:

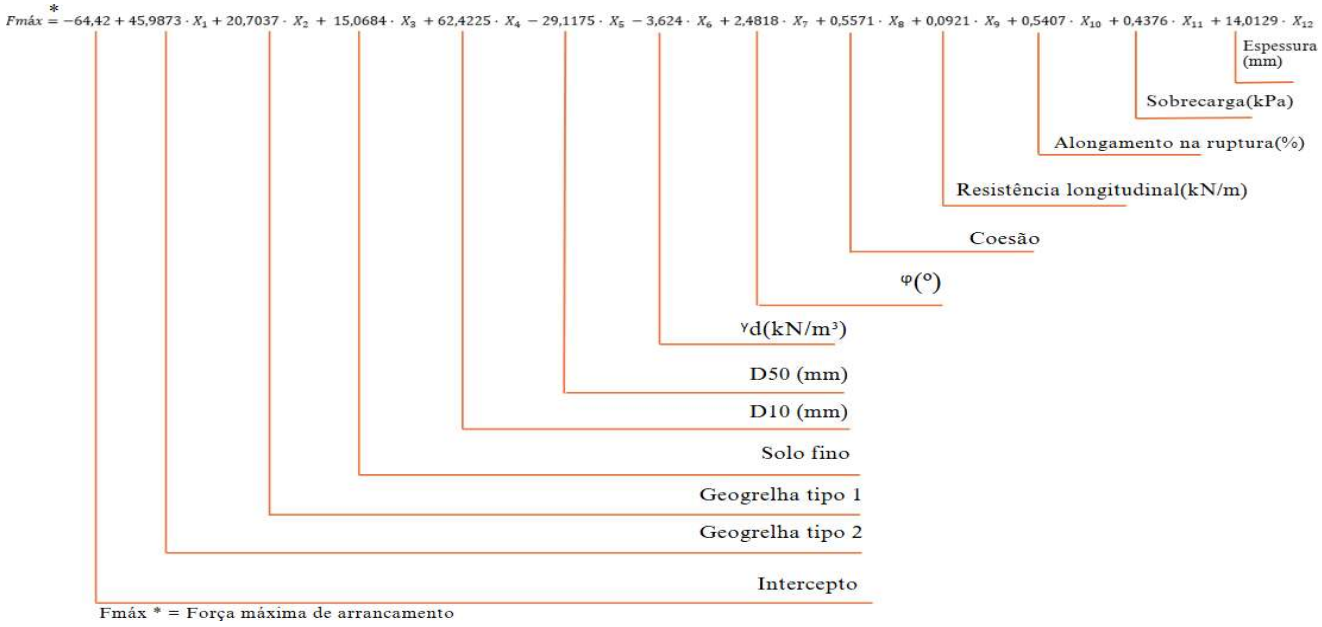


Figura 1. Equação da regressão linear aplicada para a pesquisa

A equação de regressão obtida para a força máxima de arrancamento ($F_{máx}$) constitui um modelo preditivo que traduz a influência ponderada de cada parâmetro do sistema solo-reforço. O intercepto do modelo (-64,42), embora apresente valor negativo, atua como uma constante de ajuste matemático que define o patamar inicial da função no espaço multidimensional das variáveis analisadas. A partir desse referencial, a magnitude dos coeficientes associados às variáveis qualitativas X1 (Geogrelha tipo 2) e X2 (Geogrelha tipo 1) revela um incremento substancial na resistência quando comparadas ao geotêxtil de referência. O coeficiente de +45,9873 para a Geogrelha tipo 2 confirma que a geometria de suas aberturas proporciona um intertravamento mecânico superior, mobilizando mecanismos de resistência passiva que elevam a capacidade de carga de interface de maneira mais eficiente do que o atrito puramente superficial.

A análise dos coeficientes das variáveis contínuas permite identificar a sensibilidade do sistema a variações nas propriedades do solo e do geossintético. O ângulo de atrito (ϕ) e a sobrecarga (σ) apresentam coeficientes positivos (+2,4818 e +0,4376, respectivamente), o que corrobora a fundamentação teórica de que a força de arrancamento é diretamente proporcional à tensão normal e à rugosidade da interface. Paralelamente, a relevância da espessura do geossintético (+14,0129) indica que materiais com maior seção transversal nas barras facilitam a distribuição de tensões e aumentam a área de suporte frontal, corroborando a hipótese de que a rigidez flexural do reforço desempenha um papel crucial na estabilidade da zona de ancoragem.

Por fim, os coeficientes relacionados à granulometria oferecem uma interpretação refinada sobre o encaixe das partículas. Enquanto o diâmetro efetivo (D_{10}) contribui positivamente, o diâmetro médio (D_{50}) apresenta um efeito redutor (-29,1175), sugerindo que, para este conjunto de dados, solos com partículas médias excessivamente grandes podem dificultar o pleno preenchimento das aberturas da geogrelha, reduzindo a eficiência do intertravamento. Somado à correlação negativa do peso específico seco (γ_d), o modelo sugere que a densidade e o arranjo granular devem estar em equilíbrio com as dimensões do reforço para otimizar a resistência. Em suma, a equação representa fielmente a hierarquia dos fatores intervenientes, permitindo não apenas a previsão da força máxima, mas também a compreensão dos mecanismos dominantes que regem a interação solo-geossintético.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a interação entre solo e geossintéticos em sistemas de reforço, com foco na resistência ao arrancamento, por meio de uma abordagem baseada em dados experimentais obtidos de diferentes autores e localidades.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o tipo de geossintético e as características do solo exercem influência significativa na força máxima de arrancamento. A Geogrelha Tipo 2 demonstrou o melhor desempenho como material de reforço, enquanto o Geotêxtil apresentou a menor resistência, possivelmente devido à sua menor rigidez e capacidade de interação com o solo. Em relação ao solo, o solo granular foi identificado como o mais eficiente, com os solos finos apresentando incremento moderado na força de arrancamento, embora de menor magnitude.

Entre as variáveis contínuas, destacaram-se influências positivas e negativas. O diâmetro efetivo dos grãos (D10), a coesão, a espessura do geossintético, sobrecarga, ângulo de atrito e o alongamento à ruptura foram variáveis que contribuíram positivamente para o aumento da força de arrancamento. Por outro lado, o peso específico seco (γd) e o diâmetro médio das partículas (D50) mostraram influência negativa, com aumentos nessas variáveis resultando em menor interação solo-geossintético e, consequentemente, redução na resistência ao arrancamento.

A análise estatística desempenhou um papel essencial ao fornecer uma base quantitativa para a identificação das variáveis mais impactantes no desempenho dos sistemas de solo reforçado, sobretudo nos ensaios de arrancamento. Os resultados da regressão linear múltipla demonstraram que variáveis associadas ao tipo de reforço, às características granulométricas e às propriedades mecânicas do solo apresentam influência estatisticamente significativa sobre a força máxima de arrancamento. Destacaram-se, em magnitude de efeito, o tipo de geossintético empregado, o ângulo de atrito interno do solo e a espessura do reforço, evidenciando que a resistência da interface solo-geossintético depende simultaneamente das propriedades dos materiais envolvidos e das condições de confinamento impostas ao sistema. Esses resultados corroboram as observações apresentadas por Oliveira (2024), que destaca a importância da interação entre as características do solo e do reforço para o desempenho de estruturas de solo reforçado.

Conclui-se que o sucesso no projeto de sistemas reforçados com geossintéticos requer uma abordagem multidisciplinar que leve em conta tanto as características dos materiais quanto as condições geotécnicas locais. Este estudo reforça a importância de uma análise cuidadosa e integrada, contribuindo para a concepção de projetos mais eficientes, seguros e adaptados às diversas realidades práticas.

4.1 Limitações da pesquisa

Embora os resultados forneçam diretrizes valiosas para o dimensionamento, é fundamental reconhecer as fronteiras desta investigação para garantir uma interpretação prudente dos dados. A análise aponta para três limitações principais que acompanham o estudo:

- Simplificações Geométricas e Mecânicas: A pesquisa não contemplou efeitos tridimensionais complexos nem as variações das propriedades mecânicas dos materiais sob condições extremas. Essa simplificação, necessária para a modelagem estatística, pode limitar a aplicabilidade direta em cenários de alta complexidade geométrica;
- lacuna entre laboratório e campo: como as análises basearam-se predominantemente em dados laboratoriais, variáveis críticas do mundo real, como sistemas de drenagem, carregamentos dinâmicos (tráfego ou sismos) e intempéries climáticas, não foram plenamente integradas, o que pode influenciar o desempenho prático dos geossintéticos;
- Representatividade Estatística: A amostragem, embora diversificada, pode não cobrir a totalidade das condições de uso global, sugerindo que a generalização dos resultados deve ser feita com cautela em contextos geotécnicos muito específicos.

Para fortalecer a robustez e a aplicabilidade prática das conclusões, a continuidade da pesquisa deve focar em uma abordagem integrada. Recomenda-se a combinação de análises estatísticas avançadas com monitoramento de campo em tempo real.