



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ANDERSON AUGUSTO GUERIN PIMENTA

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA ESTUDO DE
DIMENSIONAMENTO DE UM MURO DE CONTENÇÃO COM PNEUS
E COPRODUTO SIDERÚRGICO DE ACIARIA**

VITÓRIA - ES

2019

ANDERSON AUGUSTO GUERIN PIMENTA

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA ESTUDO DE
DIMENSIONAMENTO DE UM MURO DE CONTENÇÃO COM PNEUS
E COPRODUTO SIDERÚRGICO DE ACIARIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Patrício José Moreira Pires.

Coorientador: Prof. D.Sc. Rômulo Castello Henriques Ribeiro.

VITÓRIA - ES

2019

P644o Pimenta, Anderson Augusto Guerin, 1977-
Obtenção de parâmetros para estudo de dimensionamento de
um muro de contenção com pneus e coproduto siderúrgico de
aciaria / Anderson Augusto Guerin Pimenta. - 2019.
96 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Coorientador: Rômulo Castello Henriques Ribeiro.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Muros de contenção. 2. Reaproveitamento de resíduos. 3.
Coproducto siderúrgico de aciaria. 4. Pneus usados. I. Pires,
Patrício José Moreira. II. Ribeiro, Rômulo Castello Henriques.
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico.
IV. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

Aos meus filhos, Gabriel e Davi, por servirem de incentivo e motivação constante para todas as realizações de minha vida. À minha esposa, Cristiély, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus Professores orientadores Patrício e Rômulo, que me guiaram na realização deste estudo. Aos técnicos de laboratórios, Deivison, Sidneide e Natália, que foram fundamentais para a execução, com louvor, de todos os ensaios.

À ArcelorMittal por ter apoiado a pesquisa e disponibilizado o coproduto que é objeto dessa pesquisa.

Ao Comando do Corpo de Bombeiros Militar do Espírito Santo por me agraciar com horários dedicados ao estudo e por ter me permitido a ininterrupta participação nessa pesquisa.

Aos colegas e todos que de alguma forma me ajudaram a atingir essa conquista, muito obrigado.

RESUMO

PIMENTA, Anderson Augusto Guerin. **Obtenção de parâmetros para estudo de dimensionamento de um muro de contenção com pneus e coproduto siderúrgico de aciaria.** 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. Orientador: Prof. D.Sc. Patrício José Moreira Pires. Coorientador: Prof. D.Sc. Rômulo Castello Henriques Ribeiro.

Atualmente o aumento do número de pessoas vivendo em áreas de risco tem sido uma das características negativas do processo de urbanização e crescimento desordenado das cidades brasileiras. Os deslizamentos de terra são frequentes nas encostas durante os períodos chuvosos, principalmente nos grandes centros urbanos. Uma forma de diminuir os impactos provocados por desastres é com a construção de estruturas de contenção de taludes, sendo alvo desse estudo o uso de muro de contenção com pneus, um tipo de muro de gravidade cuja estrutura possui a finalidade de resistir a empuxos de terra, mantendo a estabilidade graças ao peso próprio. O uso de pneus possui diversas aplicações em engenharia civil, com diversos casos de sucesso pelo mundo, devido à grande oferta de pneus usados. Essa pesquisa aborda o uso de dois resíduos na construção de muros de contenção: pneus usados oriundos de veículos leves e coproduto siderúrgico de aciaria. A indústria do aço no Brasil foi responsável pela produção, em 2017, de 34,4 milhões de toneladas de aço bruto, levando o país a ocupar a nona posição no ranking da produção mundial. No mesmo ano a produção de resíduos de siderurgia foi de 20,9 milhões de toneladas, sendo que 607 kg de resíduo foram gerados para cada tonelada de aço bruto produzido. A utilização desses dois resíduos possibilita limitar o desperdício e reduzir o consumo de matérias primas, e vai ao encontro da correta e eficiente gestão de resíduos sólidos. Para avaliar se os pneus usados se apresentam como alternativa viável às soluções tradicionais na construção de muros de contenção, e se o coproduto siderúrgico melhora as propriedades mecânicas de um muro de contenção, foram realizados ensaios de caracterização do coproduto e do solo; ensaios de compactação com amostras provenientes de adições de coproduto e solo; ensaios de cisalhamento

direto para calcular o ângulo de atrito de interface entre o solo de fundação e o muro de pneus; e cálculos relacionados à densidade do conjunto pneu-solo-coproducto. Obtidos os parâmetros, foi feita uma análise de estabilidade de um muro de contenção projetado com dimensões pré-estabelecidas, mantendo sempre as mesmas proporções e os mesmos procedimentos de ensaios. Os resultados comprovam que: i) os muros de contenção com pneus se mostram eficientes do ponto de vista técnico, sendo alvo de pesquisas em universidades brasileiras e estrangeiras; ii) os resíduos de siderurgia possuem um vasto campo de utilização, com as mais diversas aplicações; iii) a utilização dos dois resíduos em conjunto é de extrema relevância, sendo sua eficácia expressa nos resultados da presente pesquisa.

Palavras-chave: Reaproveitamento de resíduos; muros de contenção; coproducto siderúrgico; pneus usados.

ABSTRACT

PIMENTA, Anderson Augusto Guerin. **Reuse of tires and steel slag for application on retaining walls**. 2019. 96 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) - Post Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espirito Santo, Vitoria, ES, Brazil. Master's advisors: Patrício José Moreira Pires, PhD; Rômulo Castello Henriques Ribeiro, PhD.

Currently, the increase in the number of people living in risk areas has been one of the negative characteristics of urbanization and growth process of Brazilian cities. Landslides are frequent on slopes during rainy periods, especially in large urban centers. One way to reduce the impacts caused by disasters is to construct structures that retain slopes, and the purpose of this study is the use of a retaining wall with tires, a type of weight wall whose structure is intended to withstand lateral earth pressure, maintaining stability due to its own weight. The use of tires has several applications in civil engineering, with several cases of success around the world, due to the large supply of old tires and the lack of equipment or specialized construction techniques. This research discusses the use of two residues in the construction of retaining walls: waste tires from light vehicles and steelworks steelworks. The steel industry in Brazil was responsible for producing 34.4 million tons of steel in 2017, taking the country to the ninth position in the world production ranking. In the same year the production of steel waste was 20.9 million tons, and 607 kg of waste was generated for each ton of steel produced. The use of these two residues allows limiting waste and reducing the consumption of raw materials, and is in line with the correct and efficient management of solid waste. In order to evaluate if used tires are a viable alternative to traditional solutions in the construction of retaining walls, and if the steel co-product improves the mechanical properties of a retaining wall, characterization tests of the co-product and the soil were carried out; compaction tests with samples from mixtures of co-product and soil; direct shear tests to calculate the interface friction angle between the foundation soil and the wall of gravity; and calculations related to the specific mass of the mixture/tire assembly. Once the resistance parameters were obtained, a stability analysis of the designed retaining wall was carried out with pre-established

dimensions, always maintaining the same proportions and the same test procedures. The results show that: i) the tire retaining walls are technically efficient, being the object of research in Brazilian and foreign universities; ii) steel waste has a wide field of use, with the most diverse applications; iii) the use of the two residues together is of extreme relevance, and its effectiveness is expressed in the results of the present research.

Keywords: Reuse of waste; retaining walls; steel slag; used tires.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Quantidade de áreas de risco de grau alto e muito alto nos municípios capixabas.	23
Figura 2: Áreas com risco de inundação na área urbana de Santa Leopoldina/ES.	24
Figura 3: Deslizamento de terra em Colatina/ES durante as chuvas de dezembro de 2013.....	25
Figura 4: Formatos de diferentes tipos de processamento de pneus.	26
Figura 5: Seção de muro de pneus construído em pesquisa da PUC-Rio.....	27
Figura 6: Amarração de pneus em camada inicial e muro concluído.	28
Figura 7: Configuração do pneu: inteiro e com uma parede lateral cortada.	28
Figura 8: Verificações de estabilidade de um muro de contenção com pneus.	30
Figura 9: Processo de produção do aço.	32
Figura 10: Geração de coprodutos e resíduos siderúrgicos por tipo.	33
Figura 11: Destinação das escórias de alto-forno.....	35
Figura 12: Aplicação das escórias de aciaria.	36
Figura 13: Estrutura básica do pneu.....	39
Figura 14: Dimensões do pneu.....	40
Figura 15: Disposição dos pneus nas camadas - em planta.	41
Figura 16: Camada de pneus e elementos utilizados no cálculo da largura do muro.	41
Figura 17: Localização do ponto de coleta do solo pesquisado.	42
Figura 18: Coproduto de Aciaria - Tipo LD, como fornecido.....	43
Figura 19: Interfaces de contato entre elementos constituintes das camadas de um muro de contenção com pneus e coproduto de aciaria.	46

Figura 20: Distribuição de amostras para o ensaio de cisalhamento direto.....	48
Figura 21: Preparação de amostras para ensaio de cisalhamento.....	49
Figura 22: Exemplos de montagem de amostras para ensaio de cisalhamento.	50
Figura 23: Preparação do ensaio de determinação da do conjunto pneu-solo-coproducto.....	51
Figura 24: Seção do muro de pneus e escória a ser projetado e analisado nessa pesquisa.	52
Figura 25: Dimensões e forças atuantes em um muro de gravidade.....	54
Figura 26: Modelo teórico para determinar o coeficiente de atrito de interface para superfícies em contato.....	56
Figura 27: Distribuição horizontal de pneus em uma camada do muro de pneus. .	57
Figura 28: Destaque das duas primeiras camadas do muro a partir do solo de fundação.....	59
Figura 29: Curva granulométrica do solo e do coproduto LD.	63
Figura 30: Curvas de compactação do solo puro e solo com adições de coproduto de aciaria (80S20LD,60S40LD e 40S60LD) na energia Proctor Normal.	64
Figura 31: Resumo dos parâmetros de compactação, ISC e expansão do solo puro e solo com adições de coproduto de aciaria (80S20LD,60S40LD e 40S60LD), na energia Proctor Normal.....	65
Figura 32: Preparação de amostra de solo puro após compactação.....	66
Figura 33: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 100Sx100S.	69
Figura 34: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx100S.	70
Figura 35: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx80S20LD. .	71
Figura 36: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx60S40LD. .	72
Figura 37: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx40S60LD. .	73
Figura 38: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 80S20LDx100S. .	74
Figura 39: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 60S40LDx100S. .	75

Figura 40: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 40S60LDx100S. .	76
Figura 41: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 80S20LDx80S20LD.	77
Figura 42: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 60S40LDx60S40LD.	78
Figura 43: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 40S60LDx40S60LD.	79
Figura 44: Medição do volume interno de um pneu do tipo 165/70 R13.....	80
Figura 45: Compactação de amostra 40S60LD em um pneu do tipo 165/70 R13..	81
Figura 46: Dimensões e empuxo ativo no muro de contenção pesquisado.....	82
Figura 47: Esforços no muro de contenção para o cálculo do fator de segurança contra o deslizamento.....	83
Figura 48: Esforços no muro de contenção para o cálculo do fator de segurança contra o tombamento.....	89
Figura 49: Esforços no muro de contenção para o cálculo do fator de segurança contra o tombamento.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões de alguns pneus encontrados no mercado.	40
Tabela 2: Identificação das amostras e percentuais de solo e coproduto de aciaria.	44
Tabela 3: Massas das amostras na caixa de cisalhamento e no anel superior de cisalhamento.	49
Tabela 4: Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.	53
Tabela 5: Fatores de capacidade de carga para as equações de Terzaghi.	61
Tabela 6: Resumo da caracterização física do solo e do coproduto siderúrgico. ...	62
Tabela 7: Resumo dos valores determinados nos ensaios de compactação e ISC.	65
Tabela 8: Resultados (ângulo de atrito e coesão) do ensaio de cisalhamento direto da amostra com solo puro.	66
Tabela 9: Resultados (ângulo de atrito de interface e coesão) dos ensaios de cisalhamento direto.	67
Tabela 10: Cálculo das áreas ocupadas por pneu e solo/adição de coproduto em uma camada.	80
Tabela 11: Resumo dos valores de densidade do muro com pneus.	81
Tabela 12: Parâmetros iniciais de cálculo do muro de contenção pesquisado.	83
Tabela 13: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 100S.	84
Tabela 14: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 80S20LD.	85
Tabela 15: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 60S40LD.	86

Tabela 16: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 40S60LD.	87
Tabela 17: Resumo do fator de segurança contra o deslizamento para os primeiros níveis do muro de contenção, variando as amostras.....	88
Tabela 18: Resumo do fator de segurança contra o tombamento para o muro de contenção, variando as amostras.....	89
Tabela 19: Resumo do fator de segurança de capacidade de carga para o muro de contenção, variando as amostras.	91

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m ²)
c	Coesão em termos de tensões totais (KPa)
c_f	Coesão do solo de fundação (KPa)
c_p	Coesão do material de preenchimento dos pneus (KPa)
c_r	Coesão do solo do retroaterro (KPa)
e	Excentricidade (m)
E_a	Empuxo ativo (KPa)
E_{ah}	Empuxo ativo horizontal (KPa)
E_{av}	Empuxo ativo vertical (KPa)
FS	Fator de segurança
FS_{desl}	Fator de segurança contra o deslizamento
FS_{tomb}	Fator de segurança contra o tombamento
FS_{capac}	Fator de segurança da capacidade de carga do solo de fundação
H	Altura do muro de pneus (m)
k_a	Coeficiente de empuxo ativo
L	Largura da base do muro de pneus (m)
$q_{máx}$	Capacidade de carga do solo de fundação (kPa)
V	Somatório dos esforços verticais (kN)
W	Peso do muro (kN)
α_{ds}	Coeficiente de eficiência de deslizamento direto
β	Inclinação do retroaterro (°)
θ	Inclinação do muro de pneus (°)

δ	Ângulo de atrito de interface (°)
ϕ_f	Ângulo de atrito interno do solo de fundação (°)
ϕ_p	Ângulo de atrito interno do material de preenchimento dos pneus (°)
ϕ_r	Ângulo de atrito interno do solo do retroaterro (°)
$\sigma_{vm\acute{a}x}$	Tensão vertical máxima (KPa)
$\sigma_{vm\acute{i}n}$	Tensão vertical mínima (KPa)
τ	Tensão cisalhante (KPa)
ω	Ângulo de abatimento do muro de pneus (°)
γ	Massa específica (kN/m ³)
γ_f	Massa específica do solo de fundação (kN/m ³)
γ_p	Massa específica do material de preenchimento dos pneus (kN/m ³)
γ_r	Massa específica do solo do retroaterro (kN/m ³)
100S	Amostra com 100% de solo em sua composição
80S20LD	Amostra com 80% de solo e 20% de coproduto de aciaria em sua composição
60S40LD	Amostra com 60% de solo e 40% de coproduto de aciaria em sua composição
40S60LD	Amostra com 40% de solo e 60% de coproduto de aciaria em sua composição

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 ÁREAS COM RISCO DE DESLIZAMENTO	22
2.2 MUROS DE CONTENÇÃO COM PNEUS	25
2.2.1 Dimensionamento de muros de contenção com pneus	29
2.3 RESÍDUOS SIDERÚRGICOS.....	31
2.3.1 Escória de Alto-Forno	34
2.3.2 Escória de Aciaria LD	35
2.3.3 Escória de Dessulfuração KR	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 MATERIAIS.....	38
3.1.1 Pneus	39
3.1.2 Solo	42
3.1.3 Coproduto de Aciaria - Tipo LD	43
3.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	43
3.2.1 Ensaios de caracterização física	44
3.2.2 Ensaios mecânicos.....	45
3.2.3 Ensaio de cisalhamento direto.....	45
3.2.4 Determinação da densidade do conjunto pneu-solo-coproduto.....	51
3.3 DIMENSIONAMENTO DE UM MURO DE CONTENÇÃO COM PNEUS E COPRODUTO DE ACIARIA	51
3.3.1 Dimensões do muro.....	51
3.3.2 Análises de estabilidade	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	62
4.2 PARÂMETROS MECÂNICOS	63
4.3 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....	66
4.4 DENSIDADE DO CONJUNTO PNEU-SOLO-COPRODUTO	79

4.5 DIMENSIONAMENTO DO MURO	82
4.5.1 Segurança contra o Deslizamento	83
4.5.2 Segurança contra o Tombamento	88
4.5.3 Capacidade de Carga do Solo de Fundação	90
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	92
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
6. REFERÊNCIAS	95

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

A pesquisa aborda o uso de dois resíduos na construção de muros de contenção que têm a função de prevenir movimentos de massa: pneus usados oriundos de veículos leves e coproduto siderúrgico de aciaria.

A utilização de pneus em muros de contenção já foi alvo de trabalhos anteriores, mas normalmente utiliza-se o solo local para preenchimento dos pneus. Nessa pesquisa é abordada a adição de coproduto de aciaria ao solo, com o objetivo de avaliar as vantagens de utilizar os dois resíduos em conjunto. A pesquisa tem um viés de sustentabilidade, visto que abordará o reaproveitamento de resíduos industriais na construção de muros de peso.

Edinçliler *et al.* (2010) destaca que devido ao desenvolvimento industrial e população crescente, grandes quantidades de resíduos de pneus são produzidas. À medida que o montante aumenta, torna-se mais difícil e mais dispendioso eliminá-los com segurança, sem ameaçar a saúde humana e o meio ambiente. A utilização desses resíduos evita o esgotamento dos recursos naturais e consequentes problemas ambientais, elimina os custos de descarte e lhes acrescenta um valor ecológico.

No tocante aos resíduos siderúrgicos, destaca-se que um dos coprodutos de maior geração no país é proveniente da obtenção do aço, seja ela de alto-forno ou de aciaria. O Relatório de Sustentabilidade apresentado pelo Centro de Coprodutos Aço Brasil em 2018 mostra que a geração de coprodutos em 2017 foi de 20,9 milhões de toneladas. Assim, a necessidade de reaproveitamento deste material é grande, visto o enorme volume gerado. Sobressai que tais resíduos são tratados pela indústria siderúrgica como coprodutos e não simplesmente escória, em virtude do valor agregado que ainda possuem para outros segmentos, tendo como exemplo a construção civil.

Outra justificativa para o presente estudo reside na existência de grande quantidade de áreas de risco no estado do Espírito Santo. De acordo com levantamentos elaborados pelo Serviço Geológico Nacional, no estado do Espírito Santo existem 888

setores de risco, afetando diretamente aproximadamente setenta mil pessoas. A possibilidade de utilização de resíduos na construção de muros de peso pode ser útil para reduzir o grau de risco nessas áreas.

A motivação para a pesquisa partiu da vivência do autor na Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Espírito Santo, onde tem contato com a problemática de áreas de risco de deslizamento de terra no estado capixaba. A construção de muros de contenção em áreas suscetíveis a deslizamento é tema sempre em destaque na sociedade brasileira devido à grande quantidade de pessoas que vivem nesses locais e a dificuldade do poder público em eliminar ou diminuir o grau de risco com a execução de obras estruturantes. Por conseguinte, a necessidade de desenvolvimento da temática se apresenta como relevante.

Um facilitador para a pesquisa envolvendo a utilização de escória de aciaria reside no fato de que no estado do Espírito Santo está instalada, desde a década de 1980, a empresa Arcelor Mittal Tubarão, uma unidade de produção integrada de aços planos. A empresa desenvolve pesquisas em parceria com instituições acadêmicas, com o intuito de aperfeiçoar a inserção dos coprodutos em seu ambiente de negócios.

Assim sendo, devido às justificativas apresentadas anteriormente e a existência de expressiva quantidade de áreas de risco de deslizamento sem estruturas de contenção adequadas, fica evidente que pesquisas devem ser feitas com a finalidade de apresentar novos materiais que possam ser utilizados em construção de muros de gravidade de baixo custo e fácil execução.

1.2 OBJETIVOS

A pesquisa tem por objetivo avaliar a viabilidade de construção de um muro de contenção com pneus usados e coproduto de aciaria, com a finalidade de avaliar a eficácia dos dois resíduos em conjunto.

Os objetivos específicos vinculados ao principal estão descritos a seguir:

- Realizar ensaios de caracterização do coproduto de aciaria e do solo.

- Realizar ensaio de cisalhamento direto com solo puro, solo e adições de coproduto de aciaria e pneu para calcular o ângulo de atrito de interface entre o solo de fundação e o muro de pneus e entre suas camadas.
- Definir dimensões e características básicas de um muro de pneus a ser projetado e analisar sua estabilidade externa.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além do presente capítulo de introdução, essa dissertação está organizada com os seguintes capítulos:

- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica sobre áreas de risco de deslizamento, muros de contenção com pneus, e a fabricação de aço e consequente geração de resíduos e coprodutos pela indústria siderúrgica;
- Capítulo 3: Aponta os materiais utilizados e a metodologia de pesquisa seguida nesse trabalho;
- Capítulo 4: Expõe os resultados obtidos e as análises de todos os ensaios realizados no programa experimental;
- Capítulo 5: Descreve as conclusões obtidas através das análises realizadas ressaltando as principais contribuições da pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 6: Indica as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁREAS COM RISCO DE DESLIZAMENTO

O desenvolvimento social e econômico brasileiro foi caracterizado por diferentes maneiras de uso e ocupação do solo, revelando distribuição heterogênea da população no território. Este processo, associado à variabilidade climática anual, contribui para a ocorrência de desastres relacionados a deslizamentos de terra e inundações. Verifica-se que nos últimos vinte anos o número de desastres tem aumentado, devido à intensificação de eventos extremo em muitas regiões, e em razão do incremento da população que vive em áreas de risco (DIAS *et al.*, 2018).

Calvello *et al.* (2015) mostra que os deslizamentos de terra provocados pelas chuvas são fenômenos perigosos, que ocorrem em diversas regiões do mundo. O perigo para a vida associada a esses fenômenos pode ser mitigado agindo sobre o risco (reduzindo a probabilidade de ocorrência, a distribuição espacial ou a intensidade dos fenômenos) ou sobre as consequências (reduzindo a vulnerabilidade ou o tempo de exposição de pessoas em risco).

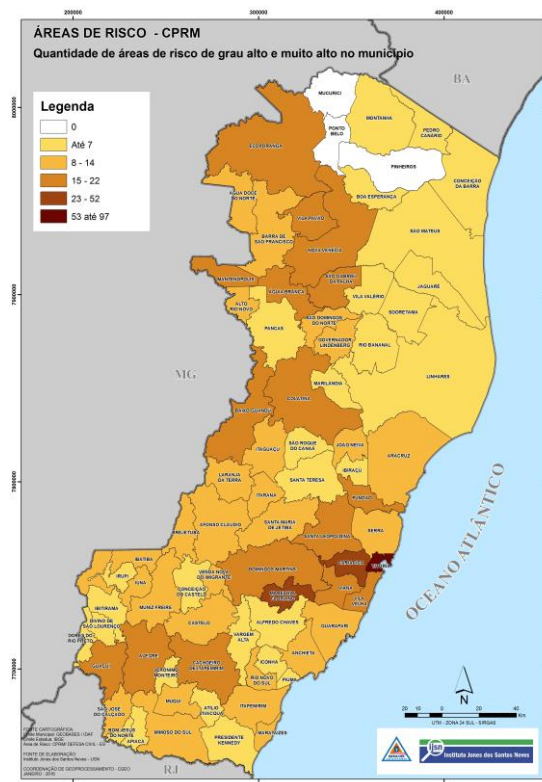
Atualmente o aumento do número de pessoas vivendo em áreas de risco de deslizamentos tem sido uma das características negativas do processo de urbanização e crescimento desordenado das cidades brasileiras. Essas ocorrências são muito frequentes nas ocupações das encostas serranas e nos grandes centros urbanos durante os períodos chuvosos, principalmente na Região Sudeste do Brasil (IPT, 2007).

Apesar da possibilidade de ocorrência de escorregamentos em todas as áreas de maior declividade, inegavelmente os maiores desastres ocorrem em localidades de assentamentos de baixo padrão construtivo. Dessa forma, uma política eficiente de prevenção de riscos de deslizamentos em encostas deve considerar como áreas prioritárias de atuação os assentamentos precários e deve também fazer parte das políticas municipais de habitação, saneamento e planejamento urbano (TOMINAGA *et al.*, 2009).

De forma a mitigar problemas como esses, a *United Nations Disaster Relief Organization* (UNDRO) elaborou, em 1991, um modelo de abordagem para o enfrentamento de acidentes naturais. De acordo com esse modelo, os programas de mitigação de desastres da UNDRO incluem a seguinte sequência de ações de prevenção e preparação para os desastres: 1) identificação dos riscos; 2) análises dos riscos; 3) medidas de prevenção; 4) planejamento para situações de emergência; 5) informações públicas e treinamento (UNDRO, 1991).

Após os últimos desastres ocorridos no Brasil, principalmente o que aconteceu na Região Serrana do Rio de Janeiro no verão de 2011, o Governo Federal elaborou o Programa Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres do Governo Federal e organizou várias ações, dentre elas o mapeamento de áreas de risco geológico, classificadas em níveis muito alto e alto, relacionadas principalmente com movimentos de massa e inundações. Tal tarefa pertence ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), (BRASIL, 2011). No Estado do Espírito Santo o CPRM finalizou a setorização de riscos em 2015, abrangendo todos os 78 municípios capixabas, de acordo com a Figura 1.

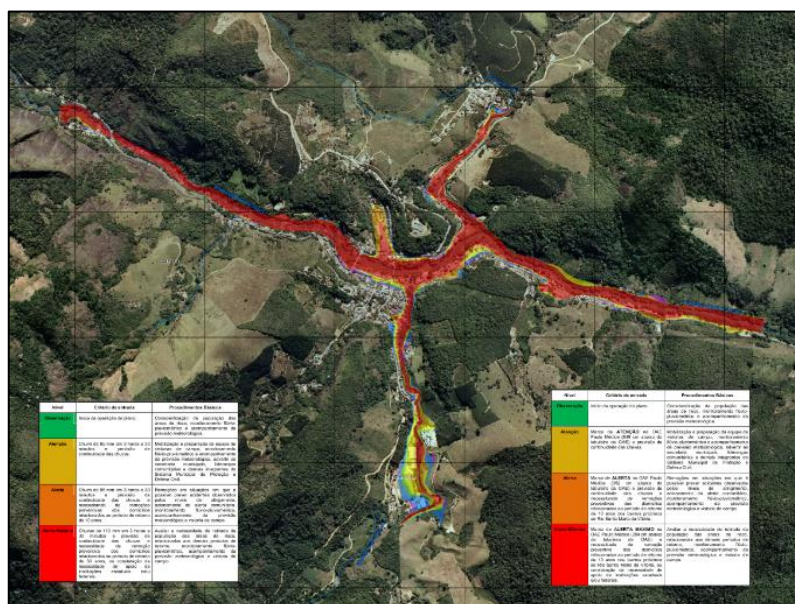
Figura 1: Quantidade de áreas de risco de grau alto e muito alto nos municípios capixabas.



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), organizado por Instituto Jones dos Santos Neves.

Além da setorização de riscos realizada pelo CPRM, o Governo do Estado do Espírito Santo contratou a elaboração de Planos Diretores de Águas Pluviais (PDAP) e Planos Municipais de Redução de Risco (PMRR) para dezessete municípios prioritários. O PDAP tem o objetivo de fornecer subsídios técnicos e institucionais ao município que permitam reduzir os impactos das inundações na cidade e criar as condições para uma gestão sustentável da drenagem urbana (ESPÍRITO SANTO, 2013). A Figura 2 exemplifica os polígonos com risco de inundação na área urbana de Santa Leopoldina/ES.

Figura 2: Áreas com risco de inundação na área urbana de Santa Leopoldina/ES.



Fonte: Plano Diretor de Águas Pluviais (PDAP) do município.

O PMRR objetiva formular estratégias, diretrizes e procedimentos que efetivamente consigam ampliar o conhecimento sobre os processos geodinâmicos, riscos e desastres, com proposição de ações estruturais e não estruturais.

No Espírito Santo é recorrente, entre os meses de novembro e janeiro, a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que deixa o Estado coberto por densas nuvens durante vários dias e provoca chuvas significativas. Esse sistema foi o principal responsável pela chuva extrema ocorrida no mês de dezembro de 2013, mais precisamente entre os dias 12 e 24 (SILVA *et al.*, 2014).

O evento resultou, sobretudo, em enxurradas, inundações e deslizamentos de terra, como exemplificado na Figura 3. De um total de 78 municípios, 55 foram diretamente afetados e mais de 60 mil pessoas precisaram, em algum momento, deixar seus lares. Vinte e seis pessoas morreram.

Figura 3: Deslizamento de terra em Colatina/ES durante as chuvas de dezembro de 2013.



Fonte: Jornal *on-line* Folha Vitória¹.

2.2 MUROS DE CONTENÇÃO COM PNEUS

O muro de contenção com pneus é um tipo de muro de peso, cuja estrutura possui a finalidade de resistir a empuxos de terra, mantendo a estabilidade graças ao peso próprio e evitando, entre outros fenômenos, o deslizamento de terra (SIEIRA, 2009).

O'Shaughnessy (1997) evidencia que o uso de pneus possui diversas aplicações em engenharia civil, com diversos casos de sucesso pelo mundo, em países como França, Canadá, Reino Unido, Suíça, Alemanha, Estados Unidos e Brasil. As estruturas com pneus se apresentam como economicamente viáveis devido à grande oferta de pneus usados e por não necessitarem de equipamentos ou técnicas

¹ Disponível em: <http://www.folhavitoria.com.br/geral/noticia/2013/12/numero-de-mortos-vitimas-da-chuva-no-es-e-corrigido-para-23.html>. Acesso em: set. 2016.

especializadas de construção, todavia, precisam de adequado dimensionamento, realizado por profissional qualificado.

Os pneus usados são um fardo ambiental e financeiro em muitas regiões do mundo. Existem mais de 500 milhões de pneus armazenados nos Estados Unidos. No Canadá, esse valor é de cerca de 28 milhões. Aproximadamente 70% destes pneus foram reutilizados em algum tipo de mercado secundário. Cerca de 30% destes pneus usados são armazenados em aterros sanitários. Todos os anos, cerca de 3 milhões de toneladas de pneus usados são gerados na Europa (EDINÇLILER, 2010). O reaproveitamento de pneus previne o esgotamento dos recursos naturais, evita custos de estocagem e problemas ambientais, além de dar valor ecológico a esses resíduos.

Figura 4: Formatos de diferentes tipos de processamento de pneus.



Fonte: Edinçliler (2010).

Em um outro artigo, Yoon (2003) discute uma série de testes de laboratório com placa de carga em areia reforçada com pneus. Com base nos testes, foram extraídas as seguintes conclusões: i) a areia reforçada com pneus tinha mais de duas vezes a capacidade de carga da areia fofa; ii) a redução de recalque devido ao reforço foi de cerca de 70% para areia fofa e 34% para areia compactada; iii) a combinação de bandas de rodagem e paredes laterais (flancos) foi responsável por maior aumento na capacidade de carga.

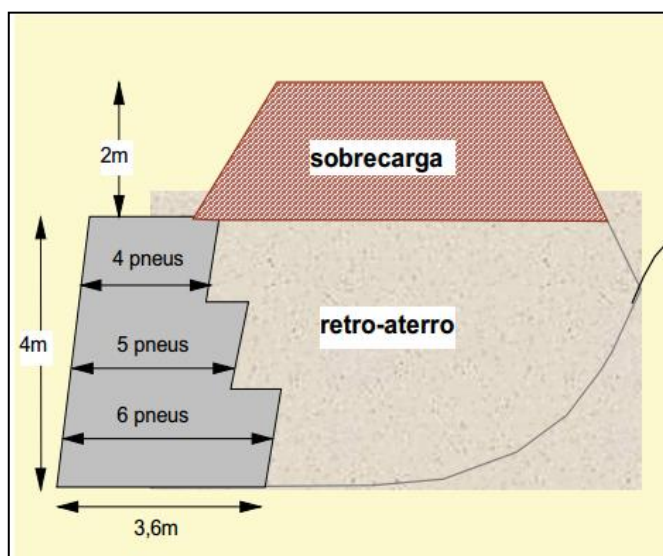
Li (2014) discute a utilização de pneus inteiros como reforço em aterros, e conclui que: i) o reforço do pneu melhorou significativamente a resistência dos aterros e que esforços duas vezes superiores foram mobilizados dentro da massa de solo; ii) na

ruptura, o reforço manteve as tensões verticais aproximadamente constantes, não permitindo uma redução abrupta observada nos aterros não reforçados; iii) com a presença de reforço, recalques foram reduzidos à metade, com a melhor configuração de reforço encontrada quando o espaço entre camadas é pequeno; iv) a deformação horizontal do aterro não reforçado é muito maior do que os aterros reforçados.

Long (1996) descreve o uso de pneus não somente em muros de contenção, mas também em estruturas de absorção de energia para diminuir o efeito de queda de blocos ou avalanches, como reforço em estruturas de solo reforçado em taludes com inclinação elevada, como elemento de redistribuição de tensões em dutos enterrados e com a finalidade de reduzir o empuxo ativo em aterros.

Pesquisas realizadas com estruturas de contenção construídas com pneus partem de uma geometria semelhante, com altura entre quatro e cinco metros e comprimento variando de 10 a 15 metros, normalmente divididas em seções contíguas. Os pneus são lançados sobre o solo de fundação, amarrados entre si e preenchidos com solo, posteriormente compactado para o lançamento de uma nova camada até a altura projetada. Na Figura 5 observa-se o esquema construtivo de uma das seções do muro construído em pesquisa desenvolvida pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Figura 5: Seção de muro de pneus construído em pesquisa da PUC-Rio.



Fonte: Sieira (2009).

Outra característica avaliada é a amarração entre pneus, que pode ser feita com elementos metálicos ou com cordas poliméricas. Sieira (2009), Huat *et al.* (2008) e O'Shaughnessy (1997) concluem que cordas de polipropileno são as mais indicadas devido ao baixo custo e resistência satisfatória, conforme exemplificado na Figura 6.

Figura 6: Amarração de pneus em camada inicial e muro concluído.



Fonte: Huat *et al.* (2008).

Outro item analisado é quanto a configuração do pneu, ou seja, se deve ter uma de suas paredes laterais cortada ou se devem permanecer inteiros, como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Configuração do pneu: inteiro e com uma parede lateral cortada.



Fonte: Sieira (2009).

De acordo com O'Shaughnessy (1997) a presença das duas paredes em pneus inteiros tende a diminuir a resistência ao arrancamento. O conjunto pneu cortado-solo apresenta uma densidade maior quando comparados ao conjunto pneu inteiro-solo, pois a ausência da parede lateral permite uma compactação mais eficiente no interior do pneu, enquanto o pneu inteiro permanece com vazios devido à dificuldade de compactar o solo. Com isso, o pneu cortado permite uma resistência friccional maior

em virtude do melhor contato entre ele e o solo, além de favorecer a execução da compactação do material de preenchimento.

Sieira *et al.* (2001) salientam que a retirada da parede lateral facilita o preenchimento dos pneus com o solo, reduzindo o índice de vazios do conjunto pneu-solo e tornando-o menos deformável e mais homogêneo do que o pneu inteiro. A desvantagem do pneu inteiro se baseia na necessidade de uma máquina específica que corte as laterais, o que aumenta o custo do serviço. Porém, o pneu sem a parede lateral aumenta a velocidade de execução da construção do muro.

Quanto ao solo empregado no preenchimento dos pneus, no retroaterro e na sobrecarga, todos os autores pesquisados observam que solo local foi utilizado, mesmo quando não apresentara as melhores características geotécnicas, prevalecendo o custo da matéria prima como fator preponderante para sua utilização.

De acordo com os autores, a construção do muro experimental com pneus mostrou a viabilidade da técnica, que se apresenta como uma alternativa que combina a eficiência mecânica do pneu e o baixo custo de execução quando comparada às técnicas convencionais de estabilização de encostas. Além disso, cabe destacar a facilidade de execução, o que não abdica a necessidade de acompanhamento por profissional habilitado.

2.2.1 Dimensionamento de muros de contenção com pneus

Para o dimensionamento de muros de contenção com pneus, O'Shaughnessy (1997) propõe uma sequência lógica de projeto para uma estrutura com inclinação de face entre 70° e 90°, geometria prismática e altura máxima de 10 metros.

Passo 1: estabelecer a geometria do muro, escopo do projeto e cargas externas, definindo as dimensões do muro e sua inclinação, características do retroaterro, tipo de pneus a serem usados e método de amarração entre eles, localização de cargas externas e condições ambientais.

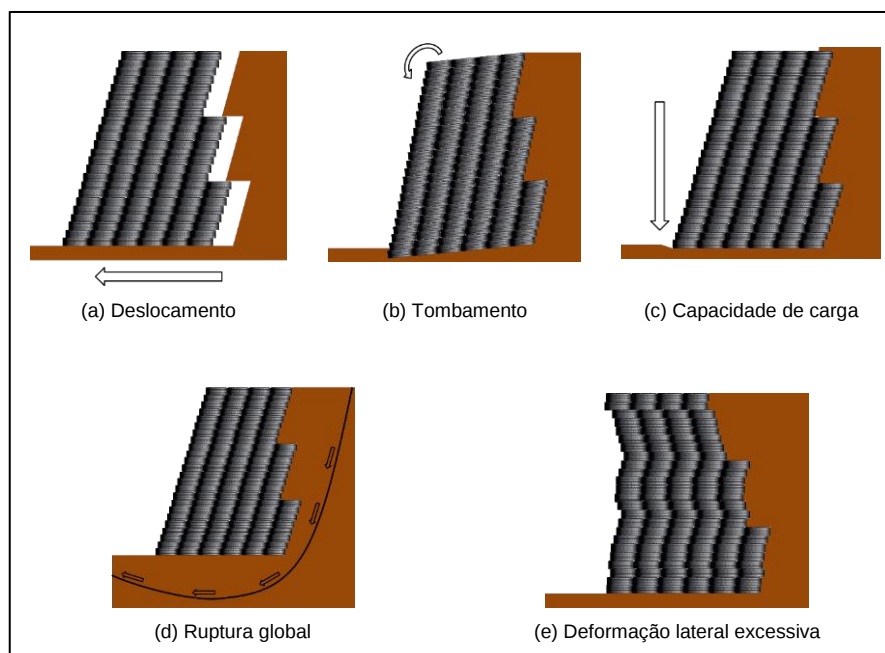
Passo 2: determinar as propriedades do solo de fundação por intermédio de ensaios de campo e de laboratório para definir os parâmetros de resistência do solo (ângulo

de atrito interno e coesão), massa específica, parâmetros de deformabilidade e localização do lençol freático.

Passo 3: determinar as propriedades do solo de preenchimento dos pneus com ensaios que definam a caracterização do solo, as características de compactação (umidade ótima e massa específica seca), os parâmetros de resistência (ângulo de atrito interno e coesão), características químicas e biológicas que possam afetar a durabilidade dos pneus.

Passo 4: estabelecer fatores de segurança e critérios de construção. O autor lista alguns valores mínimos que, segundo ele, podem ser modificados em função de regulações locais (Figura 8).

Figura 8: Verificações de estabilidade de um muro de contenção com pneus.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

- i. verificação de estabilidade quanto ao deslocamento: 1,5;
- ii. verificação de estabilidade quanto ao tombamento: 2,0;
- iii. verificação de estabilidade quanto à capacidade de carga do solo de fundação: 2,0;
- iv. verificação quanto à estabilidade global: 1,5;

- v. verificação quanto a deformação lateral excessiva: a) solo granular: 10 mm por metro da altura do muro; b) solo coesivo: 40 mm por metro da altura do muro.

Passo 5: definir a configuração das camadas de pneus quanto a forma de distribuição (layout) e largura total.

Passo 6: estabelecer os parâmetros de interface entre solo e pneu com a realização de ensaio de cisalhamento direto para calcular o ângulo de atrito de interface (δ).

Passo 7: determinar o empuxo lateral a montante do muro e a distribuição de tensão vertical na base.

Passo 8: checar a estabilidade do muro com os parâmetros definidos no Passo 4.

Passo 9: estimar os recalques do muro e compará-los com o recalque admissível.

Passo 10: avaliar deformações laterais no muro. Sieira *et al.* (2001) propõe simulação numérica, com programa de elementos finitos, para avaliar a magnitude dos parâmetros de deformabilidade do conjunto solo-pneus.

2.3 RESÍDUOS SIDERÚRGICOS

A Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define o resíduo sólido como “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade”, e traz como um de seus princípios “o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social” (BRASIL, 2010).

A ABNT NBR 10.004 (2004) divide os resíduos em:

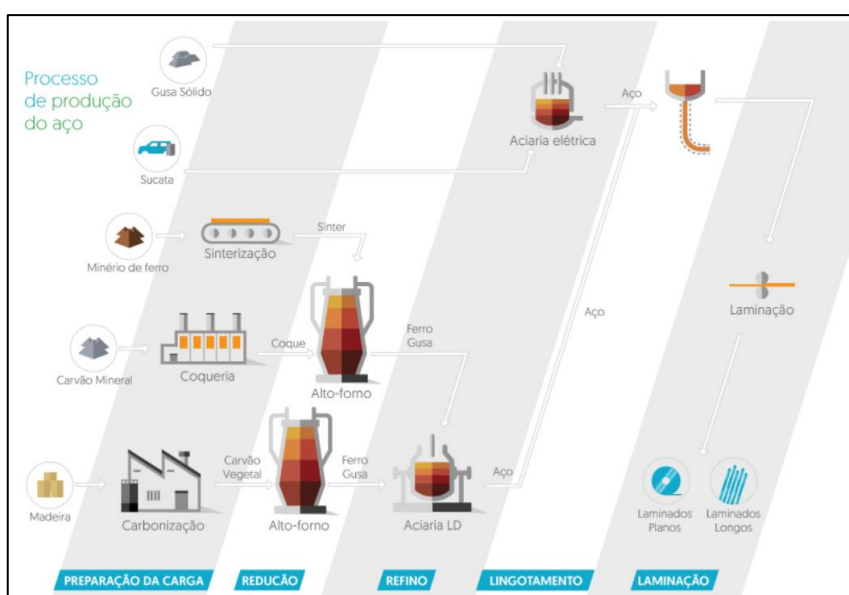
- a) Resíduos classe I - Perigosos;
- b) Resíduos classe II - Não perigosos:
 - i. Resíduos classe II A - não inertes;
 - ii. Resíduos classe II B - inertes.

Os resíduos perigosos (classe I) são aqueles que, de acordo com os critérios da ABNT NBR 10.004 (2004), apresentem alguma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Aqueles que não se enquadram nessas classificações são considerados como não perigosos (classe II). Os resíduos classe II A (não inertes) podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos classe II B (inertes) são aqueles que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Segundo Baltazar (2001), a fabricação do aço pode ser dividida em três etapas:

- A redução do ferro gusa, que ocorre dentro do alto forno, proporcionada pela associação do oxigênio do ferro ao carvão em altas temperaturas liquefazendo o ferro e transformando-o em ferro gusa;
- O refino, que ocorre na aciaria, é feito mediante a queima de impurezas e adições ao ferro gusa transformando-o em aço;
- A laminação, que é um processo de solidificação do aço, moldando-o às diversas formas de utilização por outras indústrias, como chapas e bobinas.

Figura 9: Processo de produção do aço.

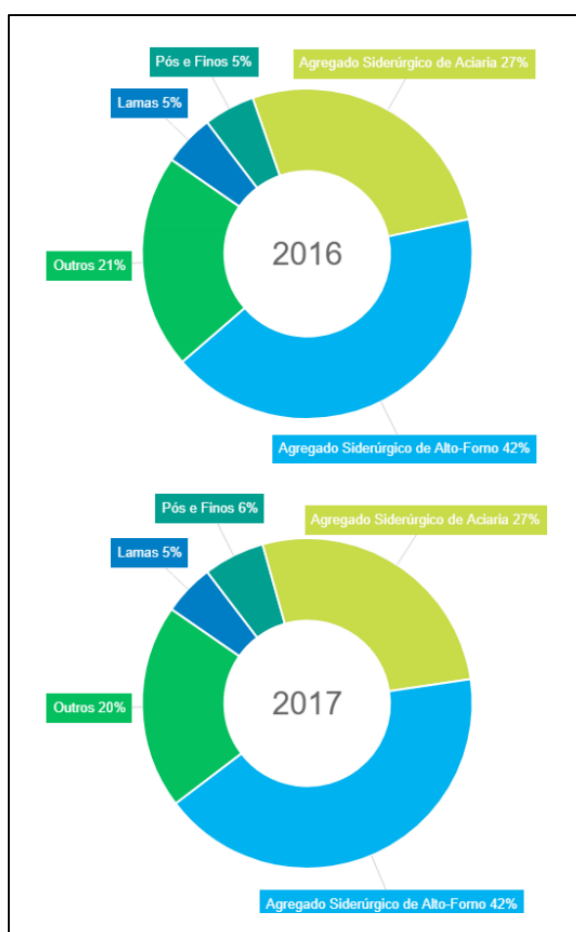


Fonte: Instituto Aço Brasil (2018).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2018), do processo de fabricação do aço resultam os resíduos siderúrgicos, para os quais foram desenvolvidas tecnologias que permitem sua utilização como matéria-prima ou fonte de energia.

Os principais resíduos gerados, também denominados pela indústria siderúrgica como coprodutos, são as escórias de alto-forno e de aciaria, e pós e lamas oriundos de sistemas de controle atmosférico (Figura 10).

Figura 10: Geração de coprodutos e resíduos siderúrgicos por tipo.



Fonte: Relatório de sustentabilidade 2018. Instituto Aço Brasil (2018).

A escória de alto-forno, utilizada principalmente na fabricação de cimento para a construção civil, é obtida no processo de produção do ferro-gusa nos altos-fornos das siderúrgicas.

A escória de aciaria é um resíduo gerado numa fase posterior da produção, no processo de refino do aço. Estudos indicam que, após resfriamento, beneficiamento e

controle de qualidade, essas escórias podem ser aplicadas em lastros ferroviários, sub-bases, bases e capas asfálticas de pavimentos rodoviários, melhoramento de estradas vicinais, gabiões, rip-raps, corretivos e fertilizantes de solos.

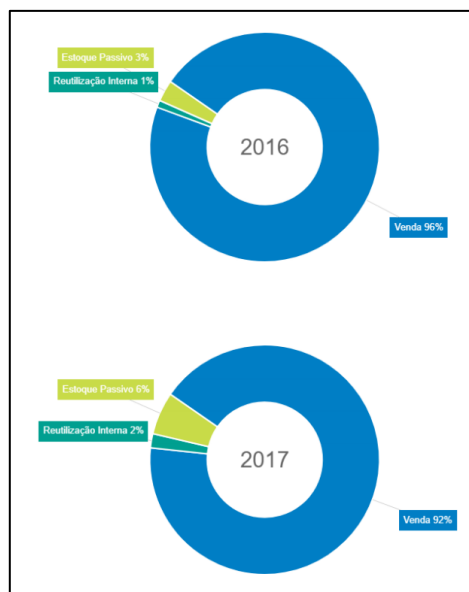
Baltazar (2001) define a escória como material fundido formado por reações químicas entre a matéria prima, os materiais fundidos no forno e as impurezas oxidadas durante o processo siderúrgico. A função da escória é agregar as impurezas do processo, separando-as do metal. A escória de alto-forno apresenta cerca de 4% de carbono em sua constituição química, enquanto as escórias de aciaria apresentam até 1,7%.

2.3.1 Escória de Alto-Forno

Gonçalves (2016) define a escória de alto-forno como coproduto gerado no processo inicial de transformação do minério de ferro em aço, em que o ferro é transformado em ferro-gusa por redução de óxidos e separação das impurezas. A escória formada no processo é separada do ferro-gusa por diferença de densidade.

A escória de alto-forno é quimicamente composta por sílica, alumina, cálcio, ferro e magnésio. A composição mineralógica varia em função da velocidade de resfriamento a qual é submetida (BALTAZAR, 2001).

Como ilustrado na Figura 11, o reaproveitamento da escória de alto-forno ocorre com frequência na construção civil como matéria-prima de cimento. Também pode ser utilizada como aditivo ou agregado para concreto, pavimentação, dentre outros.

Figura 11: Destinação das escórias de alto-forno.

Fonte: Relatório de sustentabilidade 2018. Instituto Aço Brasil (2018).

2.3.2 Escória de Aciaria LD

A escória de aciaria, de acordo com Baltazar (2001), pode ser classificada quanto a sua origem em função dos dois tipos de fornos em que são produzidas: de arco elétrico e a oxigênio básico.

Para a produção do aço em fornos de arco elétrico a principal matéria prima é a sucata. Após a adição de fundentes, formam-se dois tipos de escórias: oxidantes e redutoras, também conhecidas como escórias negras e brancas.

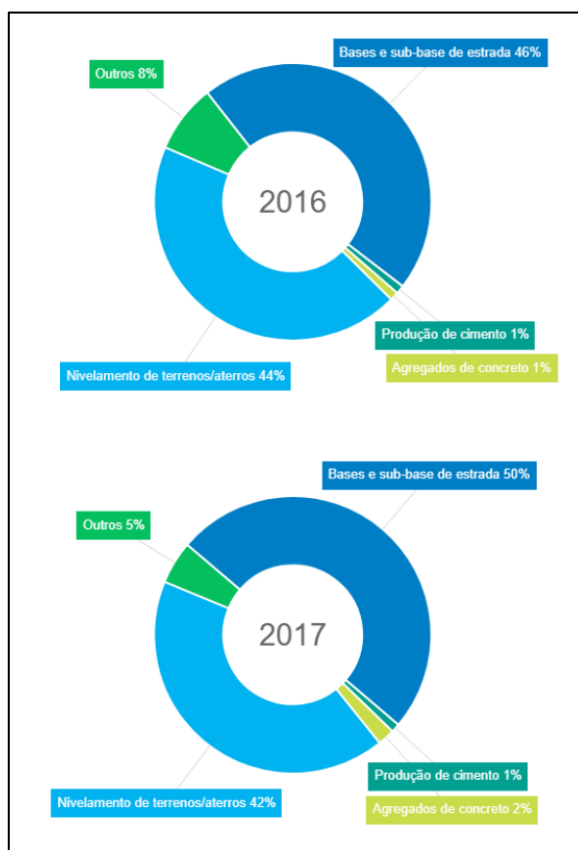
As escórias de forno a oxigênio básico são também chamadas de escórias de conversor ou LD, e utilizam o método de sopro a oxigênio no conversor com lança vertical. Essas escórias têm composição química variável, em função do tipo de forno, tipo de aço fabricado, da matéria prima utilizada e das práticas de funcionamento, com características, propriedades e aplicações diferenciadas.

Segundo Gonçalves (2016), a escória de aciaria possui alto peso específico, com massa específica variando entre 3 g/cm³ e 3,5 g/cm³, e possui uma característica cimentante. A cimentação entre os grãos de escória ocorre devido a compostos presentes na sua composição química, que quando entram em contato com a

água formam uma película de hidratos na superfície da escória e propiciam um comportamento estrutural rígido dos materiais. As escórias de aciaria apresentam ainda uma expansão considerável, devido à presença de óxidos de cálcio e magnésio livres, necessitando de um rigoroso controle de estabilidade volumétrica, principalmente quando empregadas em corpos rígidos.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2018), e demonstrado na Figura 12, a escória de aciaria é aplicada em bases e sub-bases de estradas, na produção de cimento, na agronomia, em aterros e regularização de terrenos.

Figura 12: Aplicação das escórias de aciaria.



Fonte: Relatório de sustentabilidade 2018. Instituto Aço Brasil (2018).

2.3.3 Escória de Dessulfuração KR

Essa escória, assim como o a do tipo LD, é produzido na etapa de beneficiamento denominada aciaria, em reatores Kambara. Segundo Gonçalves (2016), os aços

produzidos com menor teor de enxofre possuem maior valor de mercado em função de melhores características mecânicas e estéticas, além de maior resistência.

Nos reatores Kambara, o ferro-gusa é misturado com agentes dessulfurantes, como barrilha, cal, calcário e magnésio, e após agitação provocada por paletas a escória KR se forma por diferença de densidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada nessa pesquisa é composta por uma série de ensaios laboratoriais para obtenção de parâmetros de projeto para dimensionamento de muro de pneus contendo adições de solo com coproduto de aciaria. Tal análise é relevante pois não existem referências na literatura, correspondentes a interações entre os materiais ensaiados no presente trabalho.

Por ocasião da análise laboratorial foram realizados ensaios de caracterização física do solo e do coproduto de aciaria; ensaios mecânicos de compactação, expansão e ISC (Índice de Suporte Califórnia) do solo e das adições de solo e coproduto de aciaria; ensaio de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resistência das amostras (solo e adições de solo e coproduto de aciaria) com a finalidade de calcular o ângulo de atrito das interfaces envolvendo o muro e o solo de fundação, e entre as camadas do muro de contenção; e determinação da densidade do conjunto solo-pneu-coproduto.

Após obtenção dos parâmetros de resistência, foi feita uma análise de estabilidade do muro de contenção, projetado com dimensões pré-estabelecidas. A fim de eliminar outras variáveis do processo foram mantidas sempre as mesmas proporções e os mesmos procedimentos de ensaios nas adições formadas entre solo e coproduto de aciaria.

De tal modo, a metodologia de pesquisa utilizada nesse trabalho é a Prática Experimental, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Inicialmente são apresentados os materiais utilizados na pesquisa no item 3.1, no item 3.2 é apresentada a metodologia de ensaios empregados no trabalho, e no item 3.3 o dimensionamento do muro proposto e respectivas análises de estabilidade.

3.1 MATERIAIS

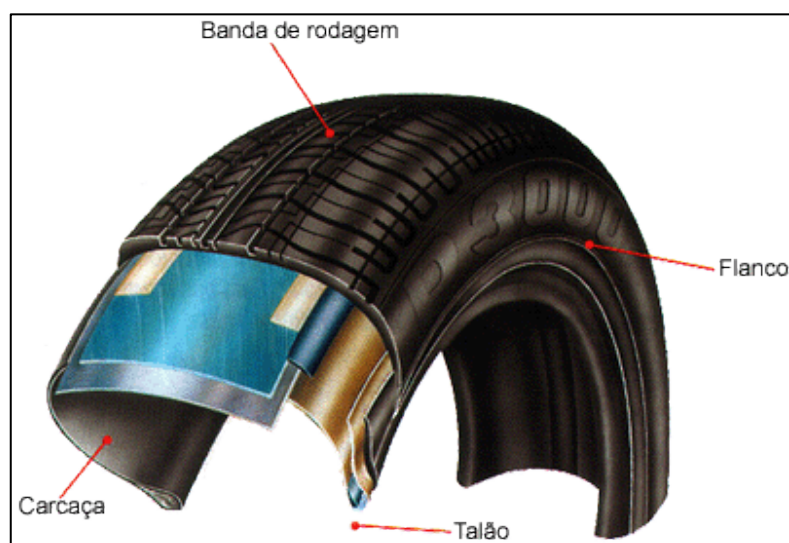
Os materiais utilizados nos ensaios dessa pesquisa foram pneu usados de veículos leves, solo e coproduto de aciaria.

3.1.1 Pneus

Os pneus são fabricados em borracha, reforçados com fibras poliméricas e metais, resultando num material com alta resistência a tensões radiais, que pode absorver grandes deformações. As propriedades mecânicas dos pneus permanecem disponíveis mesmo depois de encerrada a sua vida útil como elemento de rodagem (SIEIRA, 1998).

A estrutura básica do pneu é apresentada na Figura 13.

Figura 13: Estrutura básica do pneu.



Fonte: Freitas (2010).

Nessa pesquisa os cálculos estão condicionados a pneus de veículos leves. As especificações técnicas gravadas no flanco do pneu indicam o nome do fabricante, localizador dos indicadores de desgaste, tipo de construção interna, largura, diâmetro interno, índice de carga, código de velocidade, modelo, certificação do INMETRO e tipo de montagem.

A nomenclatura comercial do pneu considera a largura da banda de rodagem, a altura do flanco e o diâmetro interno (aro). Por exemplo, para um pneu do tipo 175/70 R13, tem-se as seguintes informações:

- Largura da banda de rodagem (L): 175 milímetros;
- Altura do flanco é igual a 70% da largura (x): 122,5 milímetros;
- Aro de 13 polegadas (Di): 330,2 milímetros.

Para obtenção do diâmetro externo é usada a Equação 3.1:

$$D_e = D_i + 2.x.L \quad (3.1)$$

Onde:

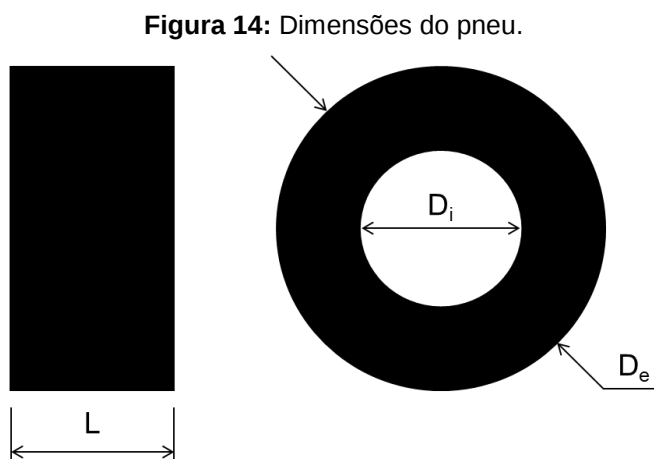
D_e - diâmetro externo;

D_i - diâmetro interno;

x - porcentagem da largura;

L - largura da banda de rodagem.

Na Figura 14 é possível visualizar as dimensões utilizadas na Equação 3.1.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Da Equação 3.1 foi extraída a Tabela 1, que apresenta as dimensões de alguns modelos de pneus encontrados no mercado.

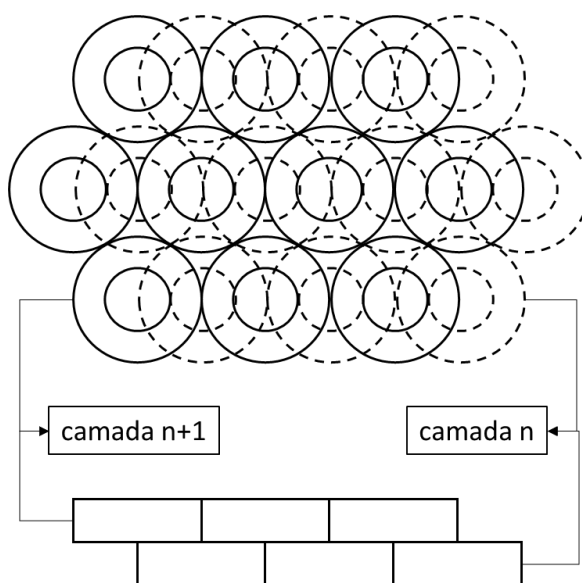
Tabela 1: Dimensões de alguns pneus encontrados no mercado.

Tipo de pneu	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Largura (mm)
165/70 R13	561,2	330,2	165
175/70 R13	575,2	330,2	175
185/70 R13	589,2	330,2	185
165/70 R14	586,6	355,6	165
175/70 R14	600,6	355,6	175
185/70 R14	614,6	355,6	185

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Durante a construção do muro de contenção, deve-se respeitar a distribuição ortorrômbica dos pneus com a finalidade de diminuir espaços vazios e aumentar o entrosamento entre os pneus. A Figura 15 apresenta a disposição dos pneus nas camadas.

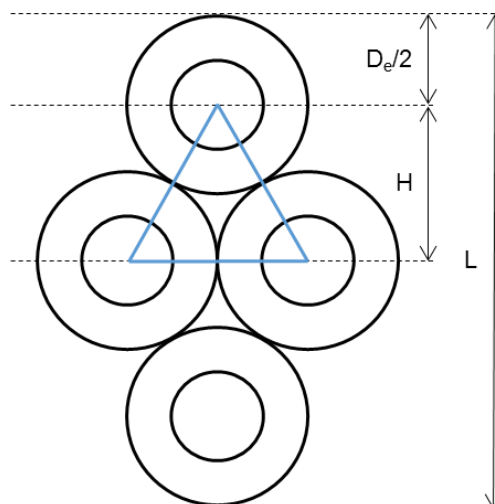
Figura 15: Disposição dos pneus nas camadas - em planta.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

O comprimento do muro e sua largura são função da quantidade e tipo de pneus utilizados. A Figura 16 apresenta a representação de uma camada do muro e os elementos utilizados no cálculo de sua largura.

Figura 16: Camada de pneus e elementos utilizados no cálculo da largura do muro.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Um triângulo equilátero é evidenciado na Figura 16. Geometricamente obtém-se a Equação 3.2, utilizada no cálculo da largura da camada.

$$L = D_e + \frac{\sqrt{3}}{2} D_e (n - 1) \quad (3.2)$$

Onde:

L - largura da camada;

D_e - diâmetro externo;

n - número de linhas de pneus na direção da largura da camada (para exemplificar, na Figura 16 são apresentadas três linhas de pneus).

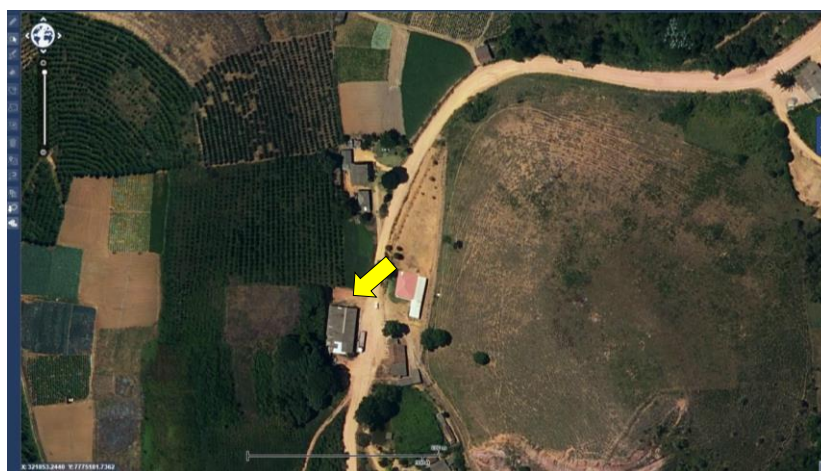
Por exemplo, para uma camada de seis linhas de pneus tipo 175/70 R13, tem-se que:

$$L = 575,2 + \frac{\sqrt{3}}{2} (575,2)(6 - 1) = 3,065 \text{ metros}$$

3.1.2 Solo

O solo utilizado para esta pesquisa é um solo argiloso já utilizado em outras pesquisas no Laboratório de Solos e Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFES, originário do distrito de Caramuru, localizado no município capixaba de Santa Maria de Jetibá (Figura 17). As características do solo são mostradas no próximo capítulo.

Figura 17: Localização do ponto de coleta do solo pesquisado.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

3.1.3 Coproduto de Aciaria - Tipo LD

O coproduto de aciaria utilizado na pesquisa, do tipo LD, proveniente de processo de refino do aço realizado na aciaria, é oriundo da empresa Arcelor Mittal Tubarão (Figura 18). A partir do material cedido pela empresa, foi feita a amostragem e os ensaios para obtenção dos resultados. As características do coproduto são mostradas no próximo capítulo.

Figura 18: Coproduto de Aciaria - Tipo LD, como fornecido.



Fonte: Acervo pessoal.

3.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em etapas, com a finalidade de organizar a coleta de dados e posterior parametrização:

- Etapa 1 - Caracterização física do solo e do coproduto de siderurgia;
- Etapa 2 - Ensaios mecânicos de compactação, expansão e ISC (Índice de Suporte Califórnia) do solo e das adições de solo e coproduto de siderurgia;
- Etapa 3 - Ensaio de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resistência das amostras (solo e adições);
- Etapa 4 - Determinação da densidade do conjunto pneu-solo e pneu- adições.

3.2.1 Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização do solo que são parte dessa pesquisa, com as respectivas normas de referência, são os seguintes:

- Determinação do teor de umidade - ABNT NBR 6457;
- Análise granulométrica - ABNT NBR 7181;
- Limites de consistência (liquidez e plasticidade) - ABNT NBR 7180 e NBR 6459;
- Determinação da massa específica dos grãos - ABNT NBR 6508.

A caracterização do coproduto de siderurgia foi feita de acordo com os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica - ABNT NBR 7181;
- Determinação da massa específica dos grãos - ABNT NBR 6508;
- Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água - ABNT NBR NM 53.

Com o objetivo de avaliar o efeito da adição de coproduto de siderurgia no solo utilizado para preencher os pneus que constituem o muro de contenção a ser projetado, foram realizados ensaios com o solo propriamente dito e com as seguintes adições de coproduto siderúrgico de aciaria (Tabela 2).

Tabela 2: Identificação das amostras e percentuais de solo e coproduto de aciaria.

Identificação da Amostra	Percentual de solo (%)	Percentual de coproduto de aciaria (%)
100S	100	0
80S20LD	80	20
60S40LD	60	40
40S60LD	40	60

Fonte: Adaptado pelo Autor.

3.2.2 Ensaio mecânicos

O Ensaio de Compactação (ABNT NBR 7182) foi realizado com o objetivo de obter a umidade ótima de compactação a ser utilizada durante a construção do muro e a massa específica máxima utilizadas nos ensaios seguintes. Realizaram-se ensaios de compactação na energia do Proctor Normal (600 kJ/m³), com o cilindro grande.

Realizado com o material compactado, o ISC é a relação entre a pressão necessária para produzir uma determinada penetração de um pistão padrão em corpos de prova de solo saturado e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. O procedimento do ensaio é descrito pela ABNT NBR 9895 (ABNT, 2016). Como prevê a norma, a expansibilidade e curva de compactação foram determinadas juntamente como ensaio de ISC.

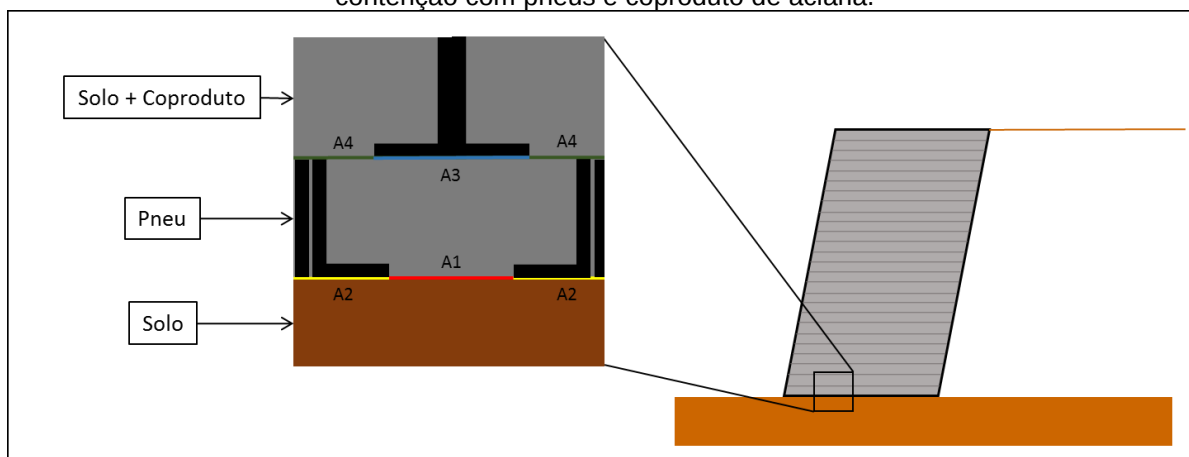
3.2.3 Ensaio de cisalhamento direto

Nessa pesquisa foi executado o ensaio de cisalhamento direto, seguindo a norma ASTM D3080/D3080M. Durante o ensaio de cisalhamento direto são realizadas leituras de deslocamento horizontal, força cisalhante aplicada e deslocamento vertical, para cada força normal aplicada. O resultado do ensaio é registrado graficamente pela variação da tensão cisalhante em função do deslocamento e, adicionalmente, pela variação da altura do corpo de prova em função do deslocamento. Das curvas tensão versus deslocamento dos vários corpos de prova são tomados os valores máximos das tensões tangenciais que, conjugados com as tensões normais correspondentes, permitem a obtenção da envoltória de resistência do solo segundo o critério de Mohr-Coulomb, e, por conseguinte, a determinação dos parâmetros de resistência do solo: intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ).

Para essa pesquisa, o ensaio de cisalhamento foi realizado com o objetivo de determinar o ângulo de atrito de interface (δ) entre os diferentes materiais utilizados (solo, coproduto de aciaria e pneu). Bowles (1992) salienta que ângulo de atrito de interface depende das propriedades do solo e da magnitude e direção do movimento do muro, e que o seu valor pode variar de 0,4 a 0,8 de ϕ . A coesão, nas mesmas condições, pode variar de 0,5 a 0,7 de c .

Para então obter, o ensaio de cisalhamento direto foi realizado com uma modificação: um pedaço da parede lateral de pneu foi cortado e colocado na interface com o solo puro, bem como na interface entre pneu e solo com adições de coproduto de aciaria, com o objetivo de obter o ângulo de atrito de interface e coesão. Procedimento idêntico, com o mesmo objetivo, foi realizado na interface entre a amostra de solo de fundação e as diferentes adições de solo e coproduto de aciaria, simulando a interface entre camadas do muro de contenção. A Figura 19 ilustra uma vista esquemática de um corte do muro para visualização das camadas que o compõe.

Figura 19: Interfaces de contato entre elementos constituintes das camadas de um muro de contenção com pneus e coproduto de aciaria.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Onde:

- A1** - interface de contato entre o solo puro e solo com adição de coproduto;
- A2** - interface de contato entre o solo puro e pneu;
- A3** - interface de contato entre o solo com adição de coproduto e pneu;
- A4** - interface de contato entre o solo com adição de coproduto de uma camada com o de outra camada.

As onze amostras foram distribuídas de acordo com a Figura 20, onde:

- 100Sx100S** - ensaio realizado com uma amostra de solo sem adição de coproduto de aciaria;
- 100S x Pneu** - ensaio realizado com interface de solo sem adição de coproduto de aciaria e uma amostra retirada do flanco de um pneu;

100S x 80S20LD - ensaio realizado com interface de solo sem adição de coproduto de aciaria e solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 80% solo e 20% coproduto;

100S x 60S40LD - ensaio realizado com interface de solo sem adição de coproduto de aciaria e solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 60% solo e 40% coproduto;

100S x 40S60LD - ensaio realizado com interface de solo sem adição de coproduto de aciaria e solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 40% solo e 60% coproduto;

80S20LD x Pneu - ensaio realizado com interface de solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 80% solo e 20% coproduto, e uma amostra retirada do flanco de um pneu;

60S40LD x Pneu - ensaio realizado com interface de solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 60% solo e 40% coproduto, e uma amostra retirada do flanco de um pneu;

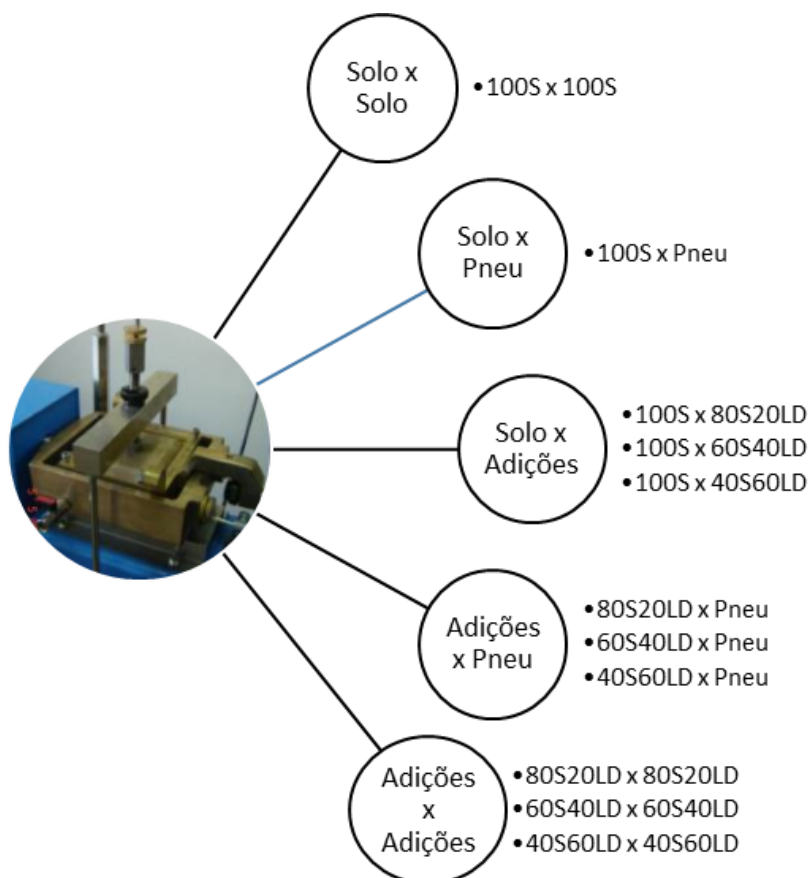
40S60LD x Pneu - ensaio realizado com interface de solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 40% solo e 60% coproduto, e uma amostra retirada do flanco de um pneu;

80S20LD x 80S20LD - ensaio realizado com interface de duas amostras de solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 80% solo e 20% coproduto;

60S40LD x 60S40LD - ensaio realizado com interface de duas amostras de solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 60% solo e 40% coproduto;

40S60LD x 40S60LD - ensaio realizado com interface de duas amostras de solo com adição de coproduto de aciaria, na proporção de 40% solo e 60% coproduto.

Figura 20: Distribuição de amostras para o ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Para realizar os ensaios de cisalhamento direto, foram adotadas as seguintes etapas:

- Obtenção da umidade ótima ($\omega_{ót}$) e massa específica aparente seca máxima (γ_d) para amostra de solo puro e amostras de solo com adições de coproduto de aciaria, a partir dos ensaios de compactação;
- Medição do volume interno da caixa de cisalhamento e do anel de cisalhamento superior (650 cm^3 e 206 cm^3 respectivamente);
- Cálculo para obtenção da massa total (úmida) da amostra de solo puro e amostras de solo com adições de coproduto de aciaria a serem compactadas na caixa de cisalhamento e no anel de cisalhamento superior. Os resultados estão expressos na Tabela 3;

Tabela 3: Massas das amostras na caixa de cisalhamento e no anel superior de cisalhamento.

Amostra	γ_d (kN/m ³)	$\omega_{ót}$ (%)	γ (kN/m ³)	Massa da amostra na caixa (g)	Massa da amostra no anel (g)
100S	17,70	16,00	20,53	1334,58	423,05
80S20LD	19,30	12,90	21,82	1418,53	449,66
60S40LD	20,20	13,50	22,93	1490,26	472,40
40S60LD	22,10	10,20	24,38	1584,46	502,26

Fonte: Adaptado pelo Autor.

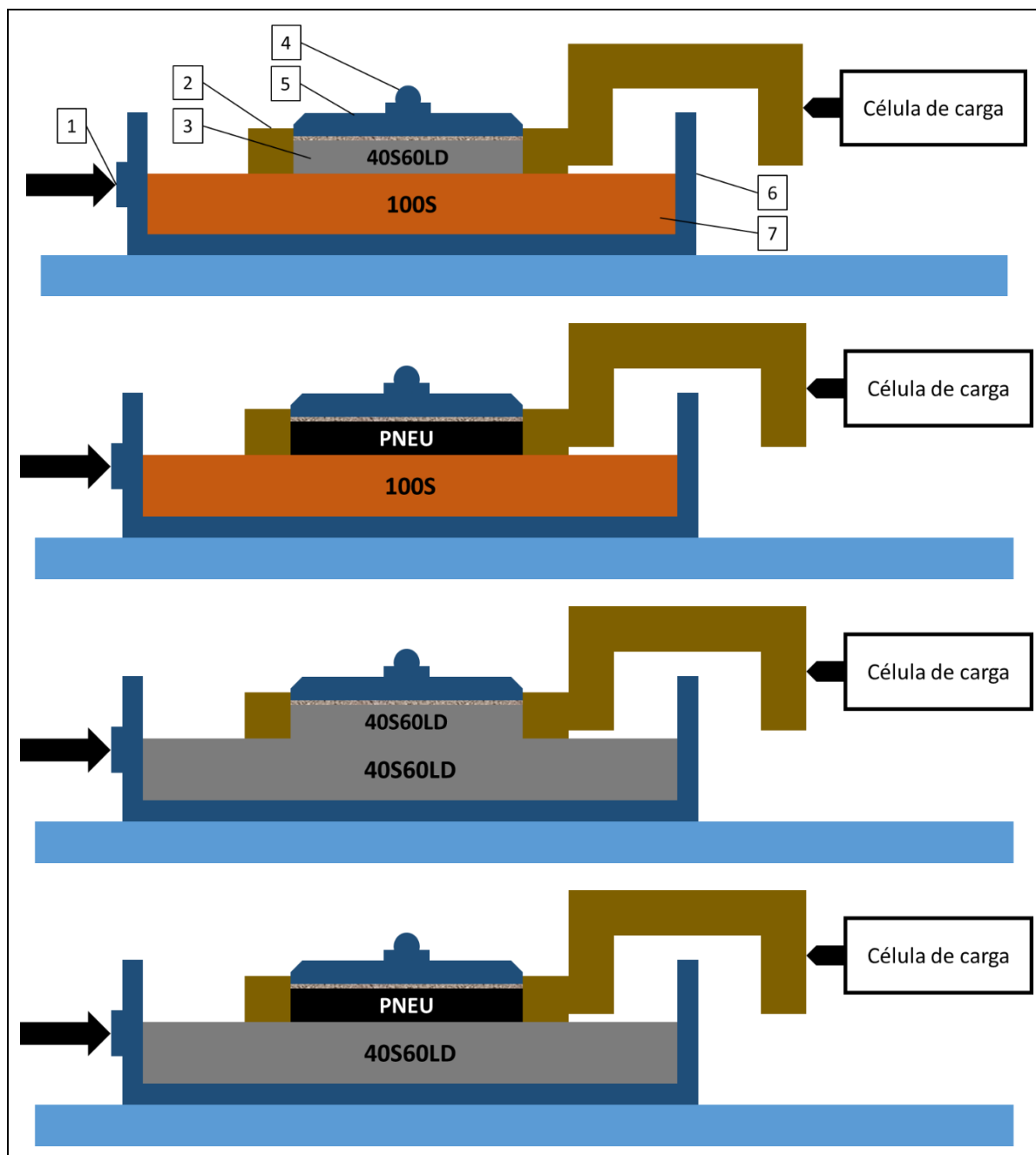
- Compactação das amostras na caixa de cisalhamento e no anel de cisalhamento superior (Figura 21) e realização do ensaio propriamente dito.

Figura 21: Preparação de amostras para ensaio de cisalhamento.

Fonte: Acervo pessoal.

As amostras foram ensaiadas com a seguinte montagem (Figura 22).

Figura 22: Exemplos de montagem de amostras para ensaio de cisalhamento.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Legenda: 1) Pistão (motor) para deslocamento; 2) Anel de cisalhamento superior; 3) Amostra superior; 4) Rótula (local de aplicação da solicitação normal); 5) Cabeçote; 6) Caixa de cisalhamento; 7) Amostra inferior.

3.2.4 Determinação da densidade do conjunto pneu-solo-coproduto

Com o objetivo de determinar a densidade do conjunto pneu-solo-coproduto, um pneu cortado foi inicialmente preenchido com água, para determinar seu volume interno.

Figura 23: Preparação do ensaio de determinação da do conjunto pneu-solo-coproduto.



Fonte: Acervo pessoal.

Obtido o volume, foram calculadas as massas de solo e adições que deveriam ser compactadas para preenchimento do pneu. Após a pesagem do conjunto, e com auxílio do software AutoCAD da Autodesk® para calcular as áreas dos interstícios entre os pneus, foi possível estimar a densidade do conjunto pneu-solo-coproduto.

3.3 DIMENSIONAMENTO DE UM MURO DE CONTENÇÃO COM PNEUS E COPRODUTO DE ACIARIA

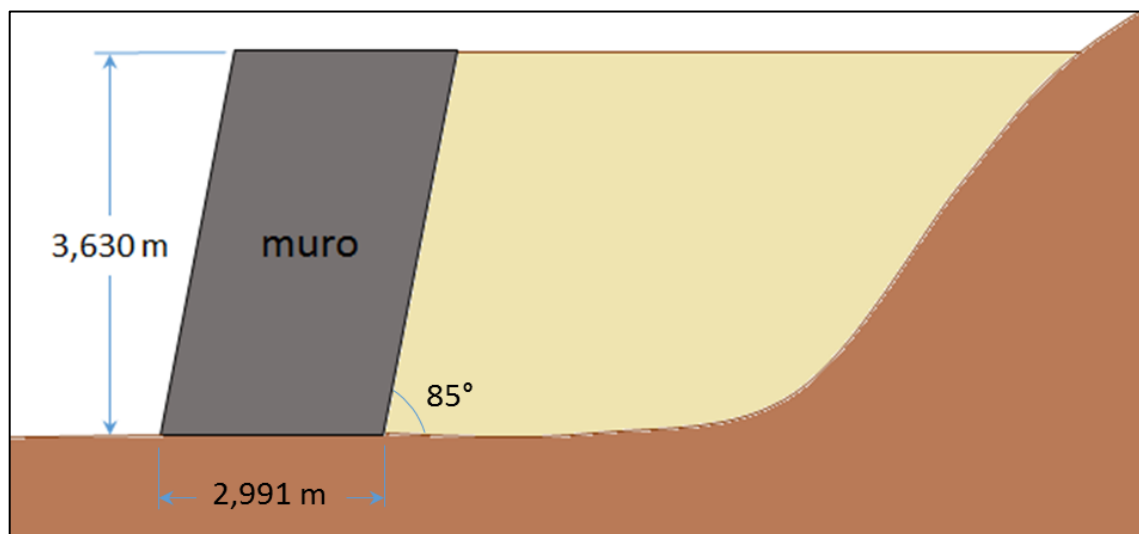
3.3.1 Dimensões do muro

Em sua pesquisa, O'Shaughnessy (1997) sugere que para a construção de um muro de contenção com pneus e solo a inclinação da face varie entre 70° e 90° , altura (H) de até 10 metros e uma largura regular de dimensão aproximada de $0,85H$.

O muro construído no Rio de Janeiro, tema de pesquisa de Sieira *et al.* (2001), tinha inclinação aproximada de 83° , altura de 4 metros e largura da base de 3,6 metros.

Nesse estudo o muro a ser projetado e analisado possui as seguintes dimensões, evidenciadas na Figura 24.

Figura 24: Seção do muro de pneus e escória a ser projetado e analisado nessa pesquisa.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Além da altura (H) de 3,630 metros e largura da base (L) de 2,991 metros, a inclinação (θ) é de 85° , ou seja, o ângulo de abatimento (ω) é de 5° . A dimensão da largura do muro foi calculada em função de uma linha de seis pneus do tipo 165/70 R13, conforme exemplo da seção 3.1.1.

3.3.2 Análises de estabilidade

A ABNT NBR 11682 (2009) prevê que o dimensionamento de muros de gravidade deve atender à verificação da estabilidade quanto ao tombamento, deslizamento e capacidade de carga da fundação. A norma prevê ainda que para um alto nível de segurança contra danos a vidas humanas, materiais e ambientais, o Fator de Segurança (FS) mínimo adotado deve ser 1,5, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.

Nível de segurança contra danos a vidas humanas Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 11682 (2009).

O'Shaughnessy (1997) adota como Fator de Segurança os seguintes valores: i) verificação de estabilidade quanto ao deslocamento: 1,5; ii) verificação de estabilidade quanto ao tombamento: 2,0; iii) verificação de estabilidade quanto às tensões no solo de fundação: 2,0.

Para os cálculos de Fator de Segurança deve-se calcular inicialmente o empuxo ativo, que pode ser definido como a pressão lateral exercida pelo solo sobre uma estrutura, e que é usualmente estimado pelo método de equilíbrio plástico, definido pela envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb (BOWLES, 1982).

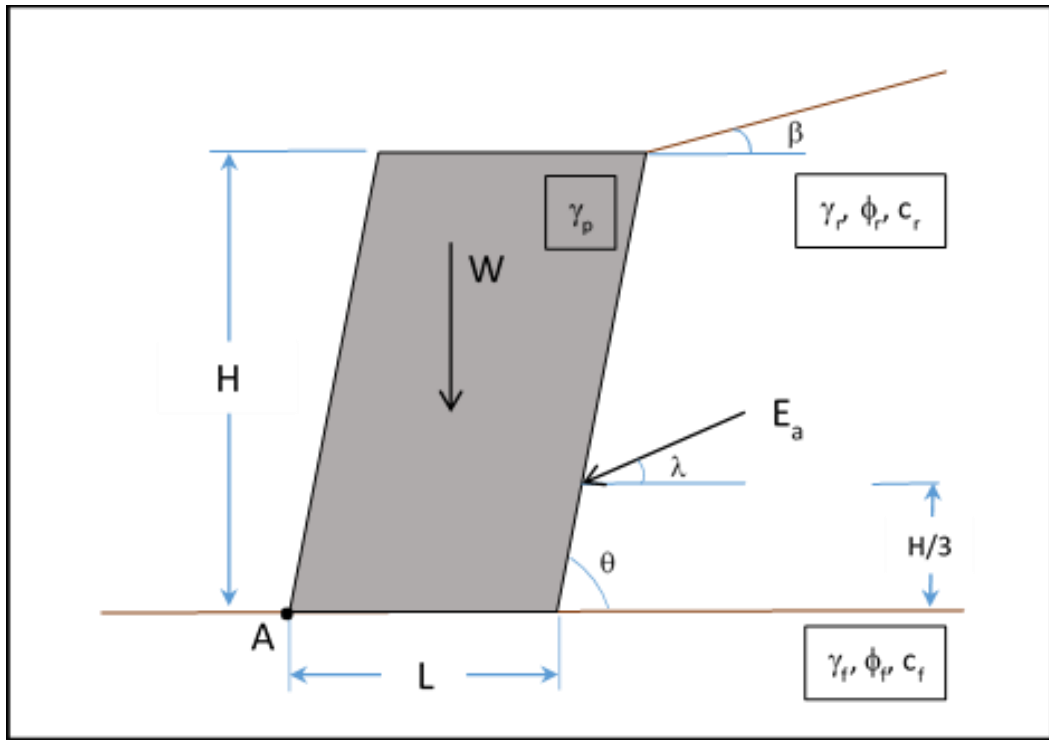
Ainda de acordo com Bowles (1982), a teoria de empuxo proposta por Coulomb admite algumas hipóteses:

- O solo é isotrópico e homogêneo, e possui ângulo de atrito interno e coesão definidos;
- A superfície de ruptura é plana;
- As forças de atrito são uniformemente distribuídas ao longo da superfície plana de ruptura;
- A cunha de ruptura é um corpo rígido;
- Existe atrito entre o solo e o muro.

As principais limitações da teoria de Coulomb subsistem na proposta de solo homogêneo e de superfície plana de ruptura.

Para os cálculos considera-se a Figura 25, que possui dimensões e forças atuantes em um muro de gravidade.

Figura 25: Dimensões e forças atuantes em um muro de gravidade.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

O empuxo ativo para retroaterro de solos não coesivos é dado por:

$$E_a = \frac{\gamma_r H^2 k_a}{2} \quad (3.3)$$

Onde k_a , o coeficiente de empuxo ativo, é dado por:

$$k_a = \frac{\sin^2(\theta + \phi_r)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_r + \delta) \sin(\phi_r - \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + \beta)}} \right]^2} \quad (3.4)$$

a) Segurança contra o Deslizamento

Consiste na verificação do equilíbrio das componentes horizontais das forças (resistentes e solicitantes), com a aplicação de um fator de segurança adequado. A Equação 3.5 evidencia o cálculo do fator de segurança contra o deslizamento:

$$FS_{dest} = \frac{\Sigma F_{h_{resistentes}}}{\Sigma F_{h_{solicitantes}}} \quad (3.5)$$

A força horizontal solicitante é identificada na Figura 24 como a componente horizontal do empuxo (Equação 3.6), que será usada no cálculo do FS_{desl} .

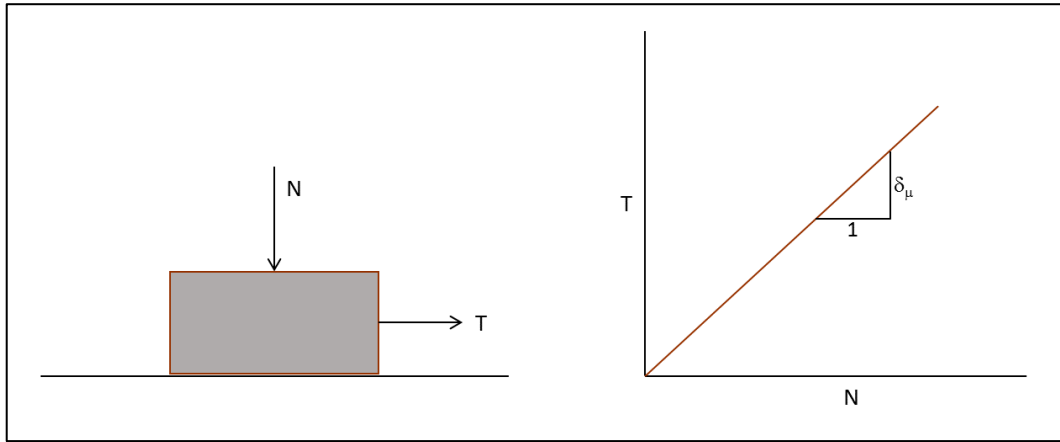
$$\Sigma F_{h_{solicitantes}} = E_a \cos \lambda \quad (3.6)$$

A força horizontal resistente é oriunda da fricção, do atrito entre o muro de pneus e o solo de fundação. Lambe e Whitman (1969) destacam que a resistência de cisalhamento entre duas partículas é a força que deve ser aplicada para causar um movimento relativo entre elas. A força e a quantidade de ligações formadas na interface entre as duas partículas são influenciadas pela natureza química e física de suas superfícies.

Ainda de acordo com os dois autores, há duas leis básicas que regulam o atrito entre dois corpos: i) a resistência ao cisalhamento entre os dois é proporcional à força normal entre eles; ii) a resistência ao cisalhamento entre os dois corpos independe de suas dimensões.

O modelo teórico para obtenção do coeficiente de atrito de interface μ é mostrado na Figura 26.

Figura 26: Modelo teórico para determinar o coeficiente de atrito de interface para superfícies em contato.



Fonte: Adaptado de Mitchell (1976).

A partir do modelo da Figura 26, pode-se obter o coeficiente de atrito de interface da Equação 3.7.

$$\mu = \frac{T}{N} = \tan \delta_{\mu} \quad (3.7)$$

Ou seja:

$$T = N \tan \delta_{\mu} \quad (3.8)$$

Onde δ_{μ} , o verdadeiro ângulo de atrito intergranular, é uma propriedade composicional determinada pelo tipo de minerais do solo (MITCHELL, 1976).

A partir do modelo teórico, O'Shaughnessy (1997) apresenta uma equação para definir a força horizontal resistente:

$$\Sigma F_{h_{resistentes}} = (\gamma_p HL) \tan \delta' \quad (3.9)$$

Onde:

- O produto $\gamma_p HL$ representa a sollicitação normal (N), referente ao peso do muro de pneus;

- O ângulo de atrito efetivo da interface é definido como δ' .

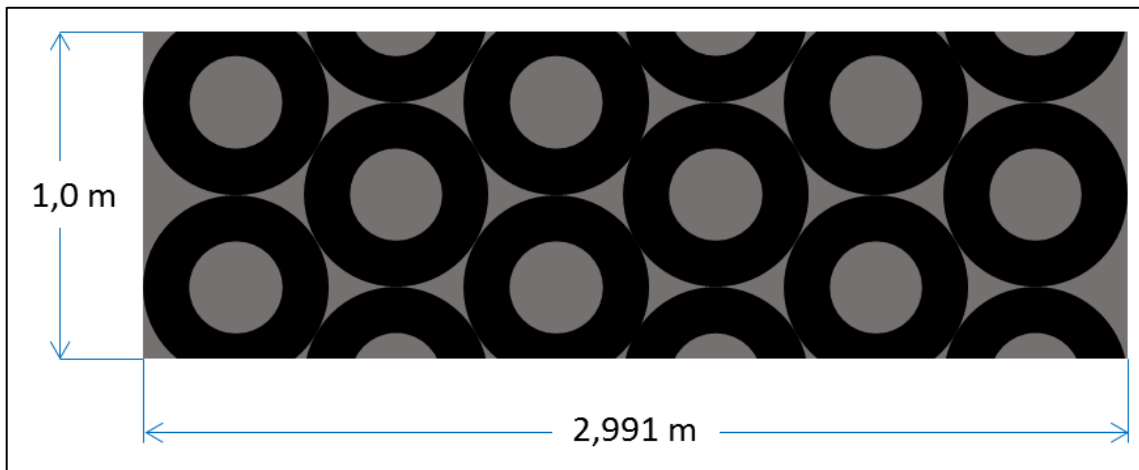
Nesse caso não foi considerada a parcela da solicitação normal (N) referente à componente vertical do empuxo ativo, pois ela age a favor da segurança e tende a aumentar o valor numérico do FS_{desl} .

Considerando o muro de pneus como uma estrutura monolítica, o FS_{desl} pode então ser calculado:

$$FS_{desl} = \frac{\Sigma F_{h_{resistentes}}}{\Sigma F_{h_{solicitantes}}} = \frac{(\gamma_p HL) \tan \delta'}{E_a \cos \lambda} \quad (3.10)$$

Onde δ' , nesse caso, é referente à interface entre o solo de fundação e a primeira camada do muro de pneus. Por ser construído com materiais diferentes (pneu, solo e coproduto de aciaria), há que se considerar as superfícies das áreas de contato de cada um dos materiais constituintes. Para os cálculos, foi considerado o pneu tipo 165/70 R13 e uma distribuição em seis linhas de pneus por camada, com largura igual a 2,991 metros em uma faixa de 1,0 metro, conforme a Figura 27.

Figura 27: Distribuição horizontal de pneus em uma camada do muro de pneus.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Os ângulos de atritos efetivos das interfaces δ' foram obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, conforme previsto no item 3.2.3.

A Equação 3.11 expressa o cálculo do FS_{desl} para a primeira camada, entre o solo de fundação e o muro de pneus, considerando as áreas de contato.

$$FS_{desl} = \frac{\gamma_p HL (A_1 \tan \delta'_1 + A_2 \tan \delta'_2)}{E_a \cos \lambda} \quad (3.11)$$

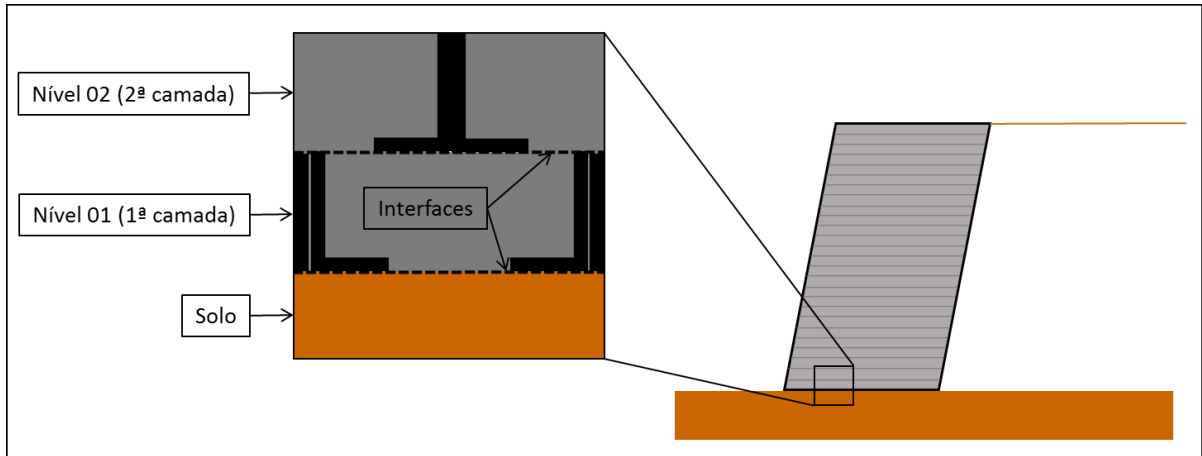
Onde:

- A_1 representa o percentual da área de contato entre o solo de fundação e o material de preenchimento do muro de pneus, de acordo com a área total considerada (evidenciada na Figura 27);
- A_2 representa o percentual da área de contato entre o solo de fundação e os pneus, de acordo com a área total considerada (evidenciada na Figura 27);
- δ'_1 representa o ângulo de atrito efetivo da interface da área de contato entre o solo de fundação e o material de preenchimento do muro de pneus;
- δ'_2 representa o ângulo de atrito efetivo da interface da área de contato entre o solo de fundação e os pneus.

Os resultados serão expressos por camada, uma vez que a altura do pneu é conhecida. Cada um dos níveis representa uma das camadas de pneus, e o empuxo é calculado em função da altura específica, permitindo o cálculo do FS_{desl} em todas áreas de contato entre camadas do muro de contenção.

A Figura 28 evidencia as duas primeiras camadas do muro, a partir do solo de fundação, com destaque para as interfaces do Nível 01 e 02. Como as interfaces se dão com materiais diferentes, é fundamental a análise de segurança segmentada por nível, considerando os diferentes ângulos de atritos efetivos das interfaces.

Figura 28: Destaque das duas primeiras camadas do muro a partir do solo de fundação.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

A Equação 3.12 expressa o cálculo do FS_{dest} do Nível 02 e nas camadas superiores,

$$FS_{dest} = \frac{\gamma_p HL (A_3 \tan \delta'_3 + A_4 \tan \delta'_4)}{E_a \cos \lambda} \quad (3.12)$$

Onde:

- A_3 representa o percentual da área de contato entre o material de preenchimento e os pneus, de acordo com a área total considerada (evidenciada na Figura 27);
- A_4 representa o percentual da área de contato entre o material de preenchimento de camadas subsequentes, de acordo com a área total considerada (evidenciada na Figura 27);
- δ'_3 representa o ângulo de atrito efetivo da interface da área de contato entre o material de preenchimento e os pneus;
- δ'_4 representa o ângulo de atrito efetivo da interface da área de contato entre o material de preenchimento de camadas subsequentes.

b) Segurança contra o Tombamento

Consiste em verificar a possibilidade da estrutura, considerada como monolítica, girar em torno da extremidade externa inferior do muro de contenção (ponto A mostrado na

Figura 25), sendo o fator de segurança calculado como a razão entre os momentos resistentes e os momentos solicitantes. Os momentos resistentes estão relacionados com o peso próprio do muro, e os momentos solicitantes são função do empuxo ativo, considerando suas componentes horizontal e vertical.

$$FS_{tomb} = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{sol}} = \frac{(\gamma_p HL) \left(\frac{L}{2} + \frac{H}{2 \tan \theta} \right) + E_{av} \left(L + \frac{H}{3 \tan \theta} \right)}{\frac{E_{ah} H}{3}} \quad (3.13)$$

c) Capacidade de Carga do Solo de Fundação

Consiste na verificação da segurança contra a ruptura e deformações excessivas do terreno de fundação, considerando uma distribuição linear de tensões na base. O FS é calculado pela razão entre a capacidade de carga do solo de fundação ($q_{m\acute{a}x}$) e tensão vertical máxima na base do muro (σ_v).

$$FS_{capac} = \frac{q_{max}}{\sigma_v} \quad (3.14)$$

A capacidade de carga do solo de fundação ($q_{m\acute{a}x}$) é calculada pela seguinte equação, indicada por Karl Terzaghi (BOWLES, 1982).

$$q_{max} = c_f' N_c + q_s N_q + \frac{\gamma_f (L - 2e) N_\gamma}{2} \quad (3.15)$$

Onde:

- q_s é a sobrecarga efetiva na base do muro (q_s é igual a zero se o muro estiver apoiado sobre o solo de fundação);
- N_c , N_q e N_γ são fatores de capacidade de carga, cuja relação com o ângulo de atrito é evidenciada na Tabela 5.

Tabela 5: Fatores de capacidade de carga para as equações de Terzaghi.

ϕ [°]	N_c	N_q	N_γ
0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5
10	9,6	2,7	1,2
15	12,9	4,4	2,5
20	17,7	7,4	5,0
25	25,1	12,7	9,7
30	37,2	22,5	19,7
34	52,6	36,5	36,0
35	57,8	41,4	42,4
40	95,7	81,3	100,4
45	172,3	173,3	297,5
48	258,3	287,9	780,1
50	347,5	415,1	1153,2

Fonte: Bowles, 1982.

As seguintes equações determinam as tensões verticais na base do muro.

$$\sigma_{v_{m\acute{a}x}} = \frac{\Sigma F_v}{L} \left(1 + \frac{6e}{L}\right) \quad (3.16)$$

$$\sigma_{v_{m\acute{i}n}} = \frac{\Sigma F_v}{L} \left(1 - \frac{6e}{L}\right) \quad (3.17)$$

Onde $\sigma_{v_{m\acute{a}x}}$ e $\sigma_{v_{m\acute{i}n}}$ são as tensões verticais, máxima e mínima, na base do muro; ΣF_v é o somatório das forças verticais; e é a excentricidade da resultante das forças na base (Equação 3.13).

$$e = \frac{L}{2} - \frac{\Sigma M}{\Sigma F_v} \quad (3.18)$$

Onde o somatório dos momentos é representado por ΣM . Além da verificação quanto ao fator de segurança, deve se garantir que $\sigma_{v_{m\acute{i}n}} > 0$ e $e < L/6$ para evitar tensões de tração na base do muro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Tabela 6 mostra o resumo da caracterização física do solo e do coproduto siderúrgico. Apesar da caracterização geotécnica ser destinada a solos, a título de comparação, o coproduto LD foi igualmente classificado. Segundo a classificação de solos de aplicação rodoviária desenvolvida pela American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO (sistema HRB - Highway Research Board), o coproduto é considerado “excelente a bom” (A-1-a), por possuir partículas maiores e natureza não plástica (NP).

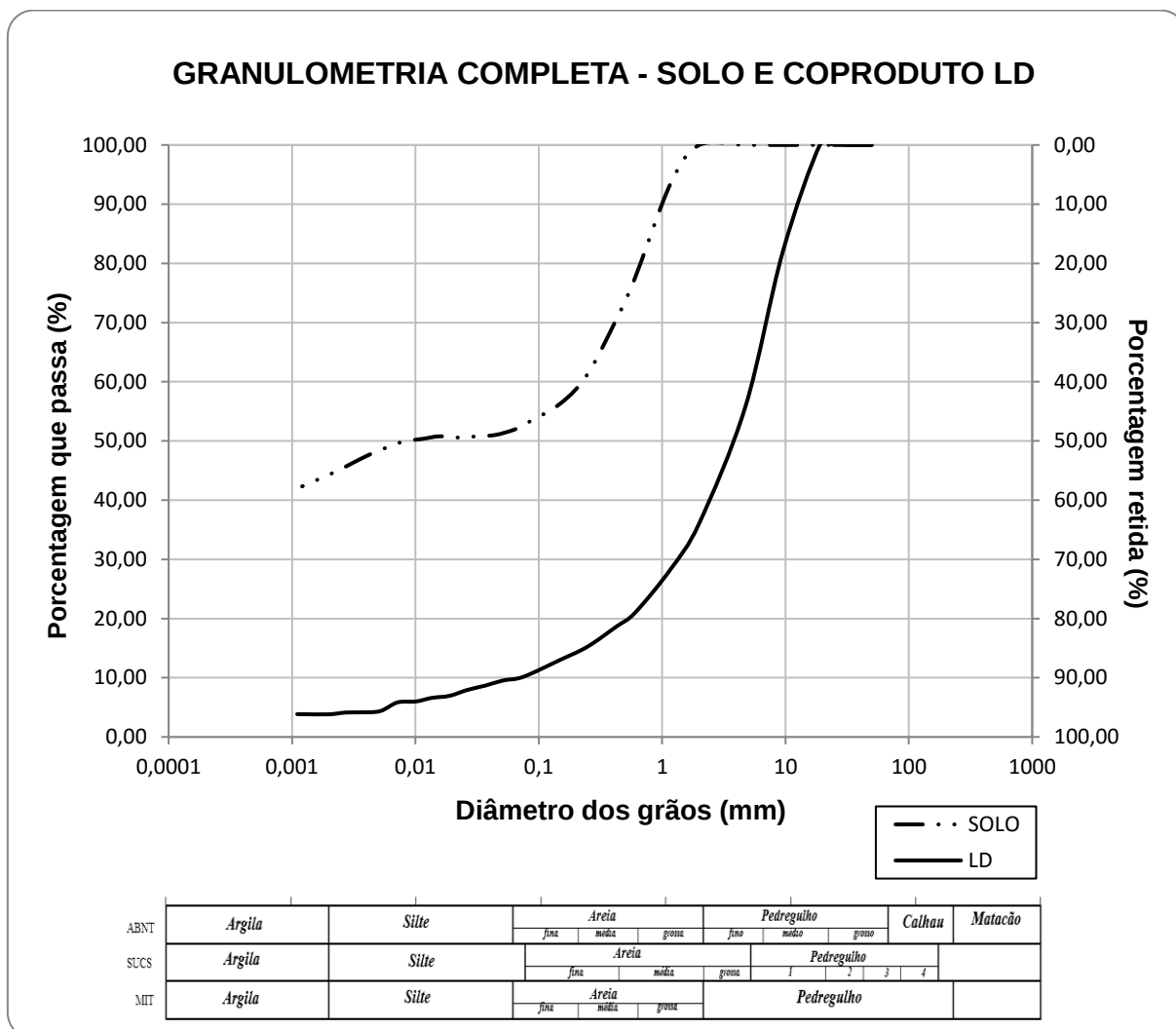
Tabela 6: Resumo da caracterização física do solo e do coproduto siderúrgico.

Propriedade		Amostra	
		Solo	Coproduto LD
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)		2,67	3,46
Limite de liquidez (%)		55,4	-
Limite de plasticidade (%)		27,4	-
Índice de plasticidade (%)		28,0	NP
Fração Passante (%)	4,8 mm (#4)	100,0	55,9
	2,0 mm (#10)	100,0	36,1
	0,42 mm (#40)	70,5	18,6
	0,075 mm (#200)	52,7	10,2
Coeficiente de uniformidade (C _u)		-	71,92
Coeficiente de curvatura (C _c)		-	5,11
Classificação	AASHTO	A-7-6	A-1-a
	SUCS	CH	SP-SM
Índice de Grupo (IG)		12	0

Fonte: Adaptado pelo autor.

A Figura 29 apresenta as curvas granulométricas do solo e do coproduto LD. A partir dos coeficientes de uniformidade e de curvatura, o coproduto LD pode ser classificado como mal graduado, com granulometria aberta.

Figura 29: Curva granulométrica do solo e do coproduto LD.

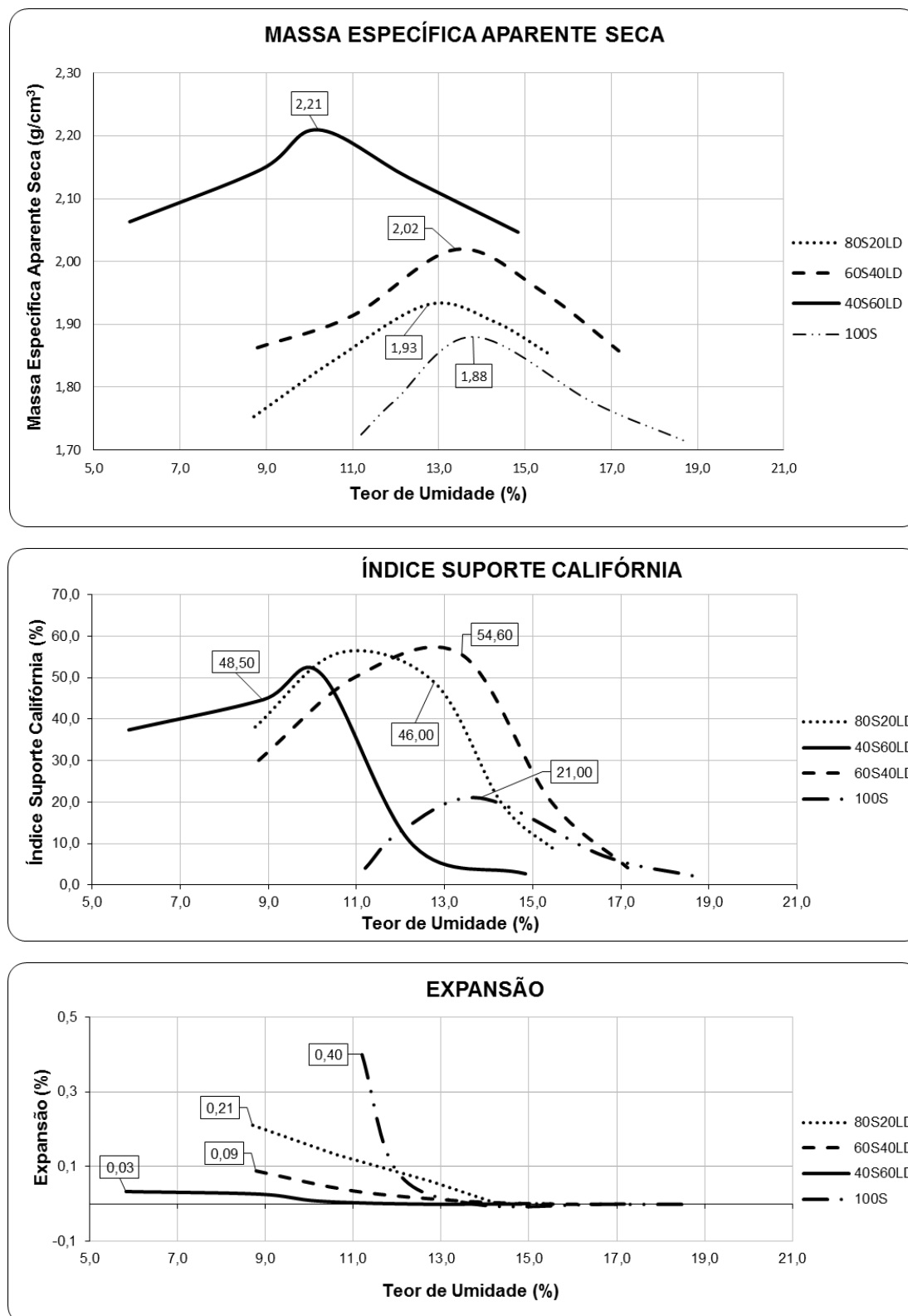


Fonte: Adaptado pelo Autor.

4.2 PARÂMETROS MECÂNICOS

O solo e as suas adições com coproduto de aciaria foram submetidos aos ensaios de Compactação, conduzidos na energia equivalente ao Proctor normal, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão, cujos resultados são mostrados na Figura 30.

Figura 30: Curvas de compactação do solo puro e solo com adições de coproduto de aciaria (80S20LD, 60S40LD e 40S60LD) na energia Proctor Normal.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

A melhora das propriedades determinadas nas amostras com adição de coproduto de aciaria (80S20LD, 60S40LD, 40S60LD), quando comparadas à amostra de solo puro (100S), é nítida em todos os três gráficos. A Tabela 7 resume os valores determinados em ensaios.

Tabela 7: Resumo dos valores determinados nos ensaios de compactação e ISC.

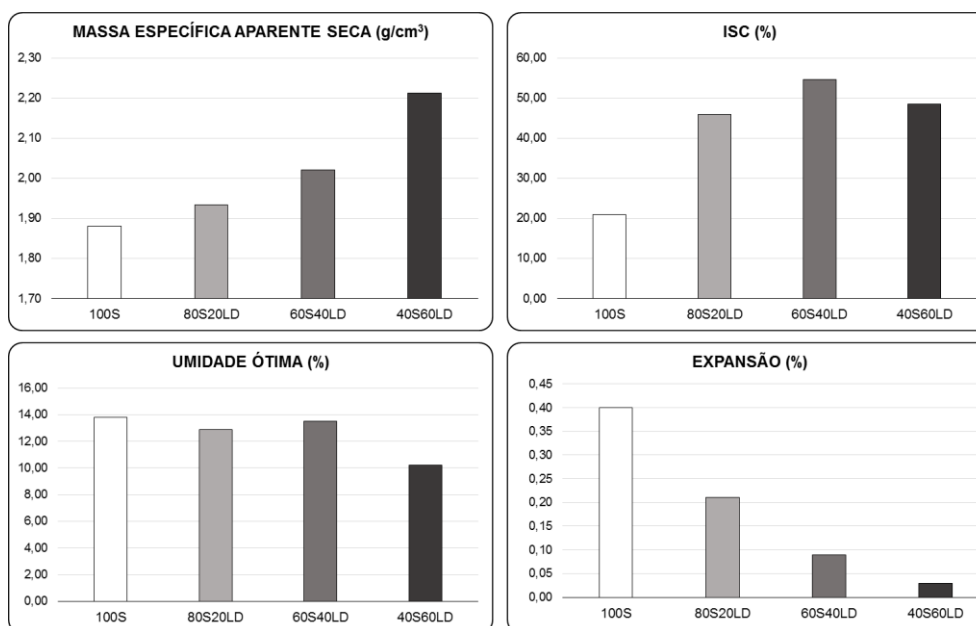
Amostra	Umidade ótima (%)	Massa esp. aparente seca máxima (g/cm ³)	ISC (%)	Expansão (%)
100S	13,80	1,88	21,00	0,40
80S20LD	12,90	1,93	46,00	0,21
60S40LD	13,50	2,02	54,60	0,09
40S60LD	10,20	2,21	48,50	0,03

Fonte: Adaptado pelo Autor.

É possível perceber que a umidade ótima cai com a adição do coproduto siderúrgico, mas não de forma linear. Por outro lado, a massa específica aparente seca máxima aumenta continuamente com a adição do coproduto. O ISC na umidade ótima aumenta, enquanto a expansão diminui continuamente.

A Figura 31 resume os resultados obtidos para todas as adições de solo e coproduto de aciaria durante o ensaio de compactação, expansão e ISC.

Figura 31: Resumo dos parâmetros de compactação, ISC e expansão do solo puro e solo com adições de coproduto de aciaria (80S20LD, 60S40LD e 40S60LD), na energia Proctor Normal.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

4.3 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com onze amostras, sendo que a amostra com solo puro foi ensaiada após ser retirada do cilindro de compactação, conforme pode ser visto na Figura 32.

Figura 32: Preparação de amostra de solo puro após compactação.



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados dos valores do ângulo de atrito e coesão da amostra com solo puro são expressos na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados (ângulo de atrito e coesão) do ensaio de cisalhamento direto da amostra com solo puro.

Amostra	Ângulo de Atrito - ϕ (°)	Coesão (kPa)
100Sx100S	36,26	6,91

Fonte: Adaptado pelo autor.

As demais amostras, com adições de coproduto de aciaria, são identificadas na Tabela 9, onde se observam os valores de ângulo de atrito de interface e coesão encontrados, além da relação entre ângulo de atrito de interface (δ) das adições e o ângulo de atrito (ϕ) da amostra com solo puro.

Tabela 9: Resultados (ângulo de atrito de interface e coesão) dos ensaios de cisalhamento direto.

Interface	Ângulo de Atrito de Interface - δ (°)	Coesão (kPa)	δ/ϕ
PNEUx100S	30,00	0,86	0,83
PNEUx80S20LD	29,10	6,56	0,80
PNEUx60S40LD	32,44	0,00	0,89
PNEUx40S60LD	30,20	5,46	0,83
80S20LDx100S	28,37	11,18	0,78
60S40LDx100S	30,38	10,36	0,84
40S60LDx100S	32,66	7,96	0,90
80S20LDx80S20LD	32,36	13,43	0,89
60S40LDx60S40LD	32,73	1,80	0,90
40S60LDx40S60LD	27,29	25,45	0,75

Fonte: Adaptado pelo autor.

Os ângulos de atrito de interface (δ) obtidos nos ensaios de cisalhamento direto das adições variaram de 27,29° (40S60LDx40S60LD) a 32,73° (40S60LDx100S), com valor médio igual a 30,55°. Os valores são próprios de cada amostra ensaiada, e a variabilidade se deve a heterogeneidade das adições de solo e coproduto de aciaria.

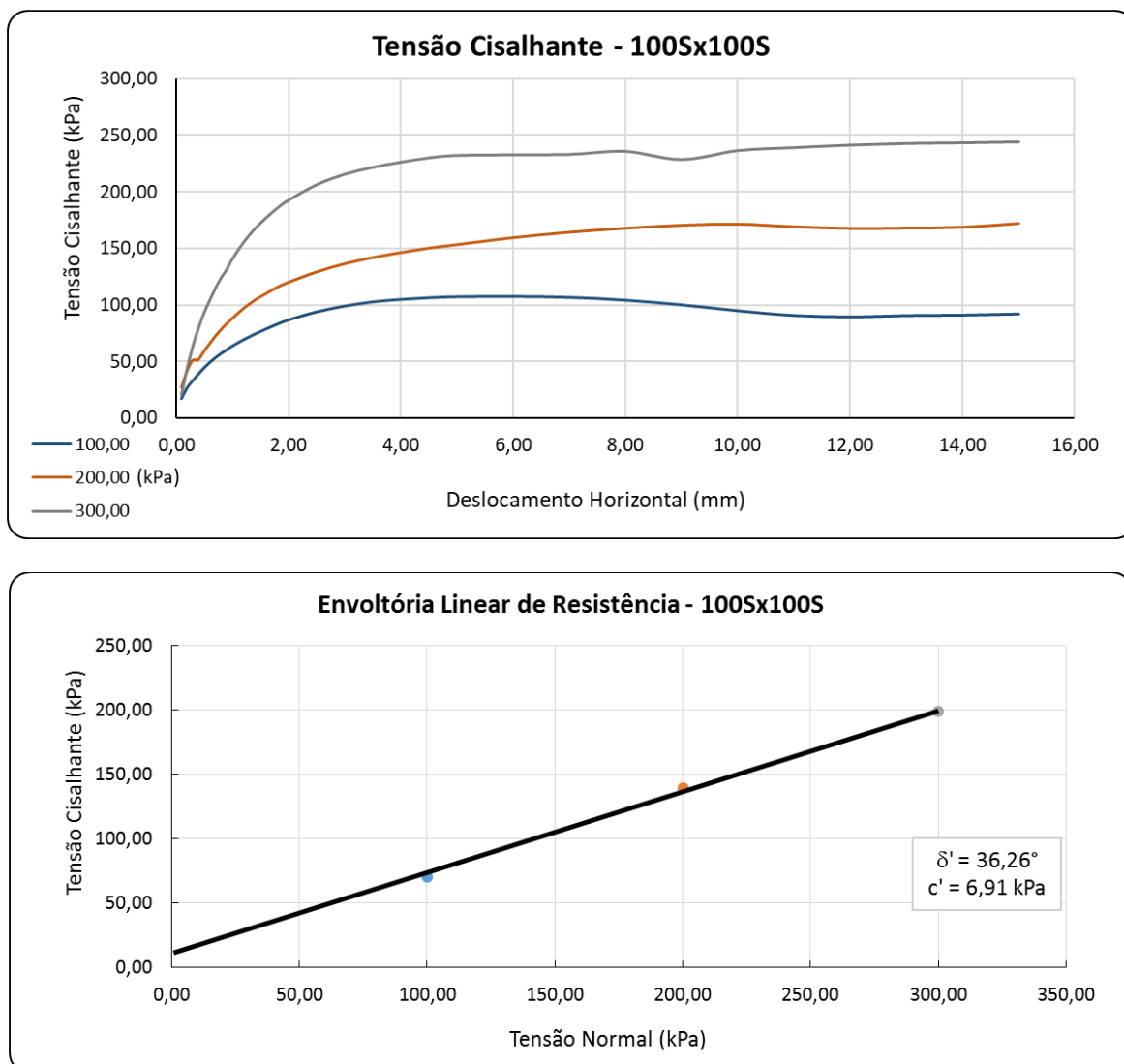
Em sua pesquisa, cujos principais dados foram obtidos após a construção de um muro experimental no Rio de Janeiro, Sieira (1998) realizou ensaios de cisalhamento direto com uma amostra indeformada de solo para obter os parâmetros de resistência, encontrando ângulo de atrito (ϕ) de 35°.

Em pesquisa realizada em Ottawa, Canadá, O'Shaughnessy (1997) realizou ensaios de cisalhamento direto com amostras de solo obtidas em ensaios de compactação, e o ângulo de atrito (ϕ) encontrado foi de 32°. O autor também realizou ensaios de cisalhamento para obter o ângulo de atrito de interface (δ) entre o solo e um pedaço de pneu, e o valor encontrado foi de 26°. A relação entre ângulo de atrito de interface entre solo e pneu (δ) e o ângulo de atrito (ϕ) da amostra com solo puro, convencionada como δ/ϕ , foi de 0,81.

Observa-se que os valores encontrados das relações entre os ângulos de atrito de interface (δ) das adições e o ângulo de atrito (ϕ) da amostra com solo puro, que variaram de 0,75 a 0,90, são coerentes com o definido por O'Shaughnessy (1997).

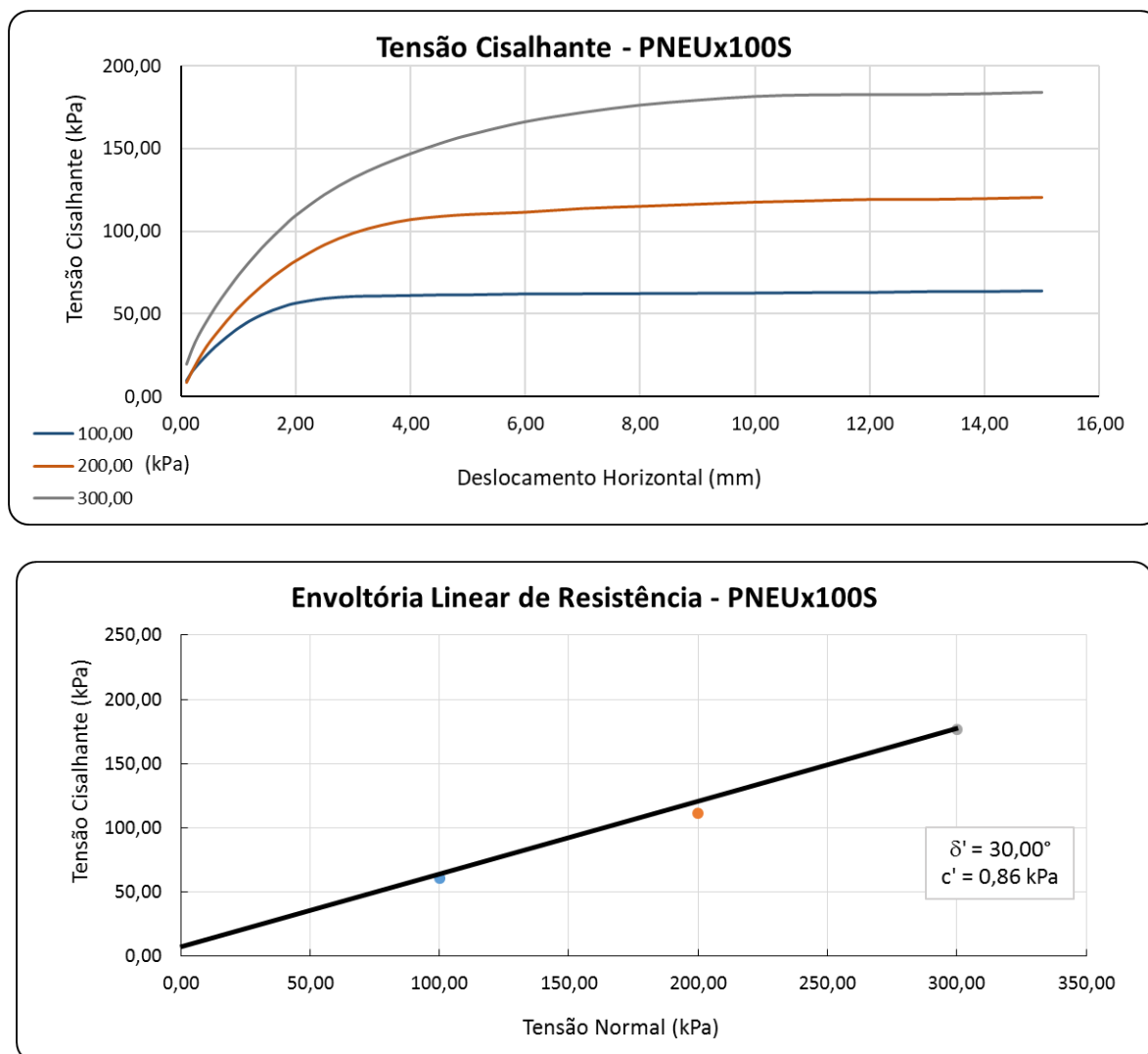
Nas Figuras de 33 a 43 são apresentados os gráficos de Tensão Cisalhante e Envoltória Linear de Resistência de cada uma das interfaces ensaiadas.

Os gráficos não apresentaram picos de ruptura e a distribuição dos pontos permitiu que a envoltória linear de resistência fosse bem construída em todos os gráficos. O critério de ruptura utilizado foi o proposto por De Campos e Carrillo (1995), baseado na inclinação da curva tensão *versus* deslocamento. Por esse critério, a ruptura pode ser assumida quando apresenta uma inclinação constante, e a tensão cisalhante de ruptura corresponderá ao valor no início da tendência linear da curva.

Figura 33: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 100Sx100S.

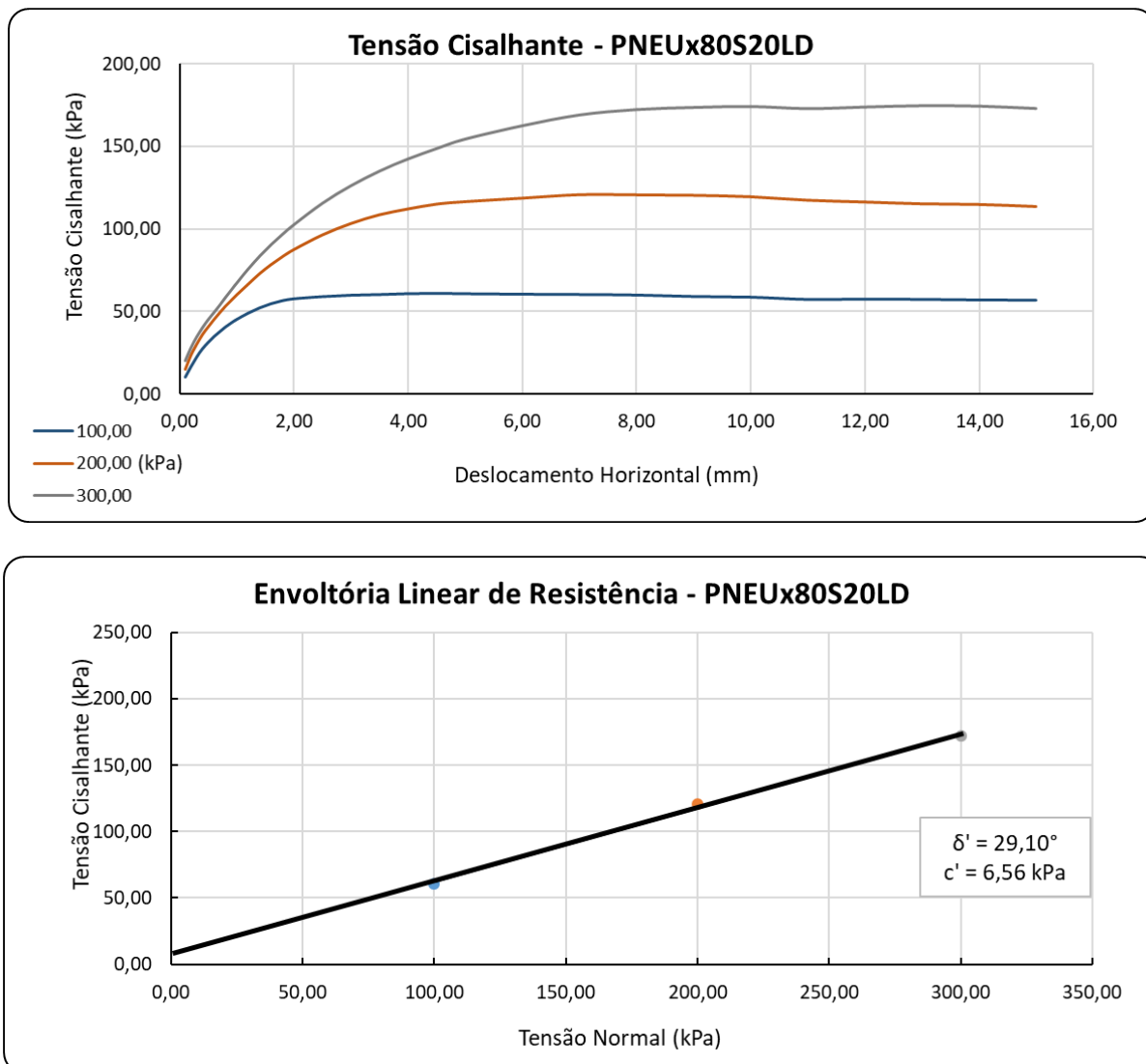
Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 34: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx100S.



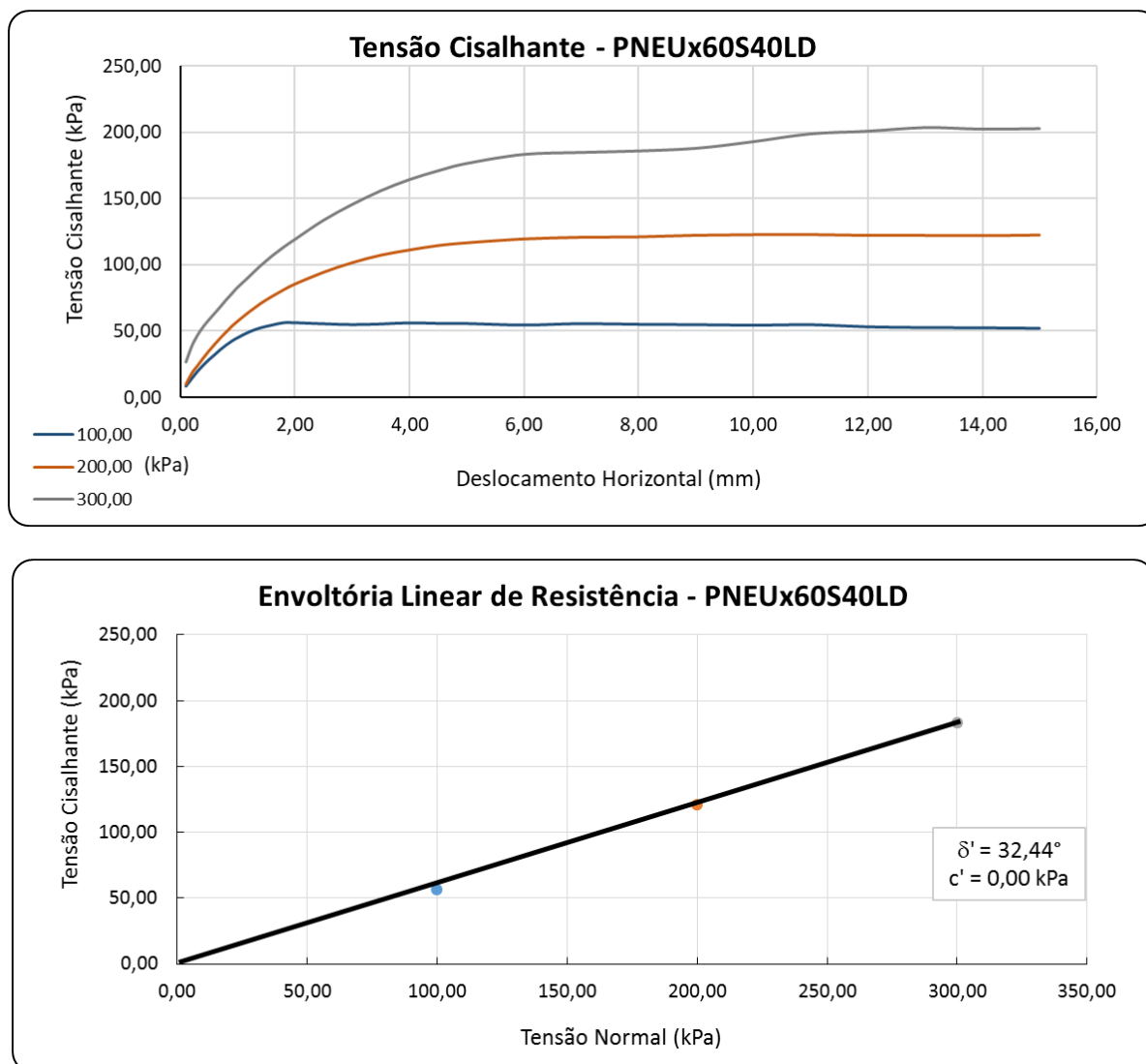
Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 35: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx80S20LD.



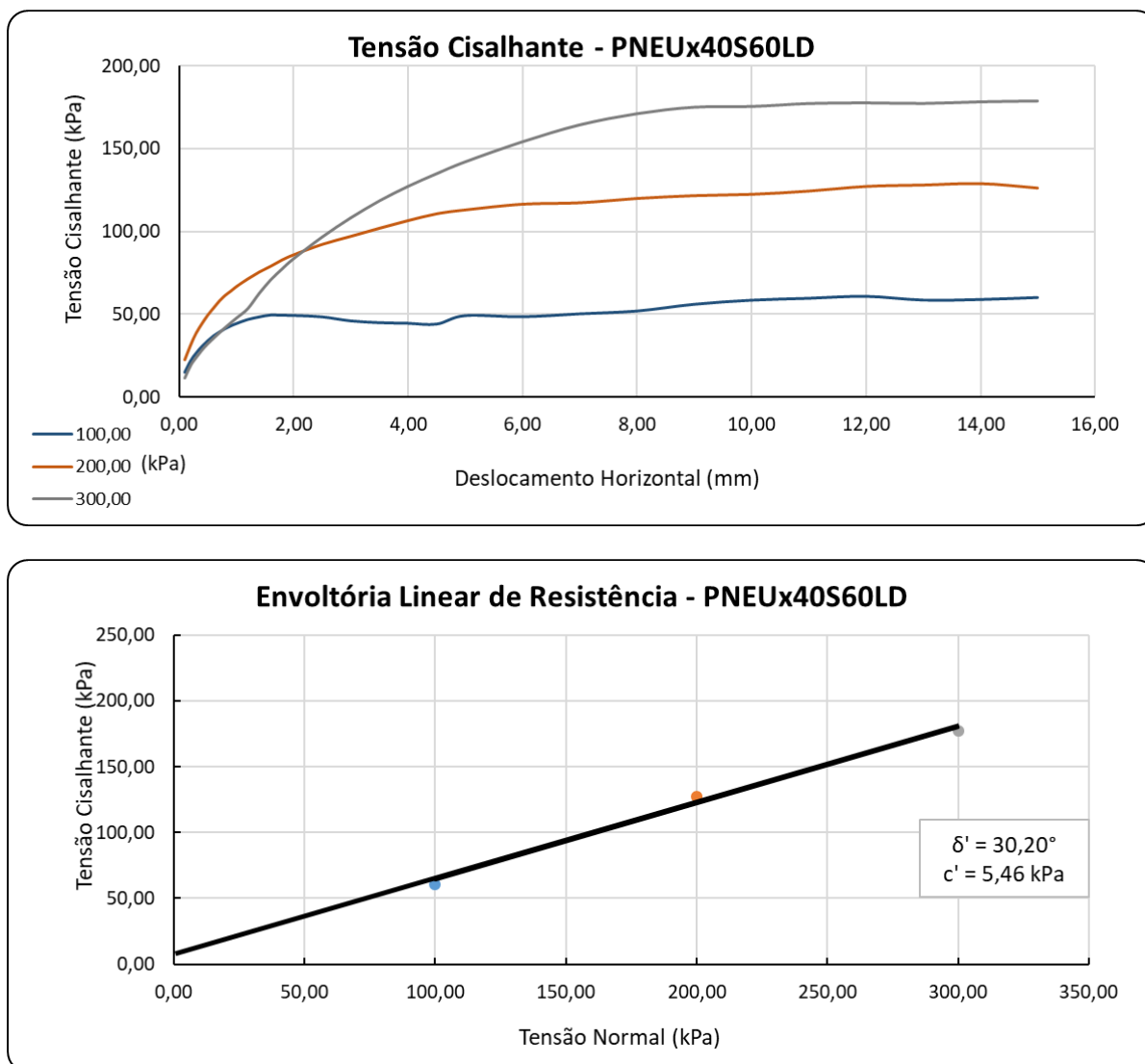
Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 36: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx60S40LD.

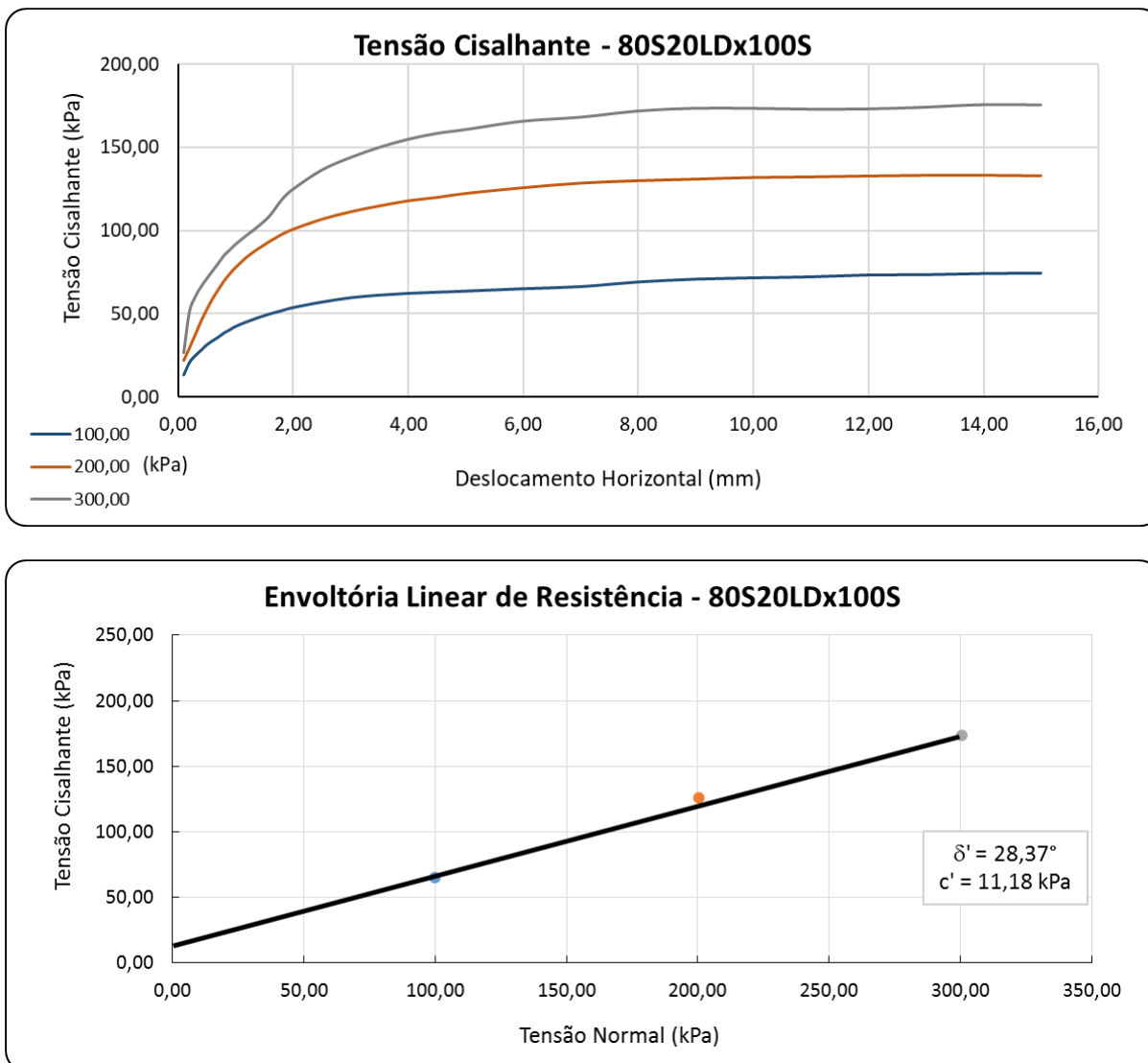


Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 37: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra PNEUx40S60LD.

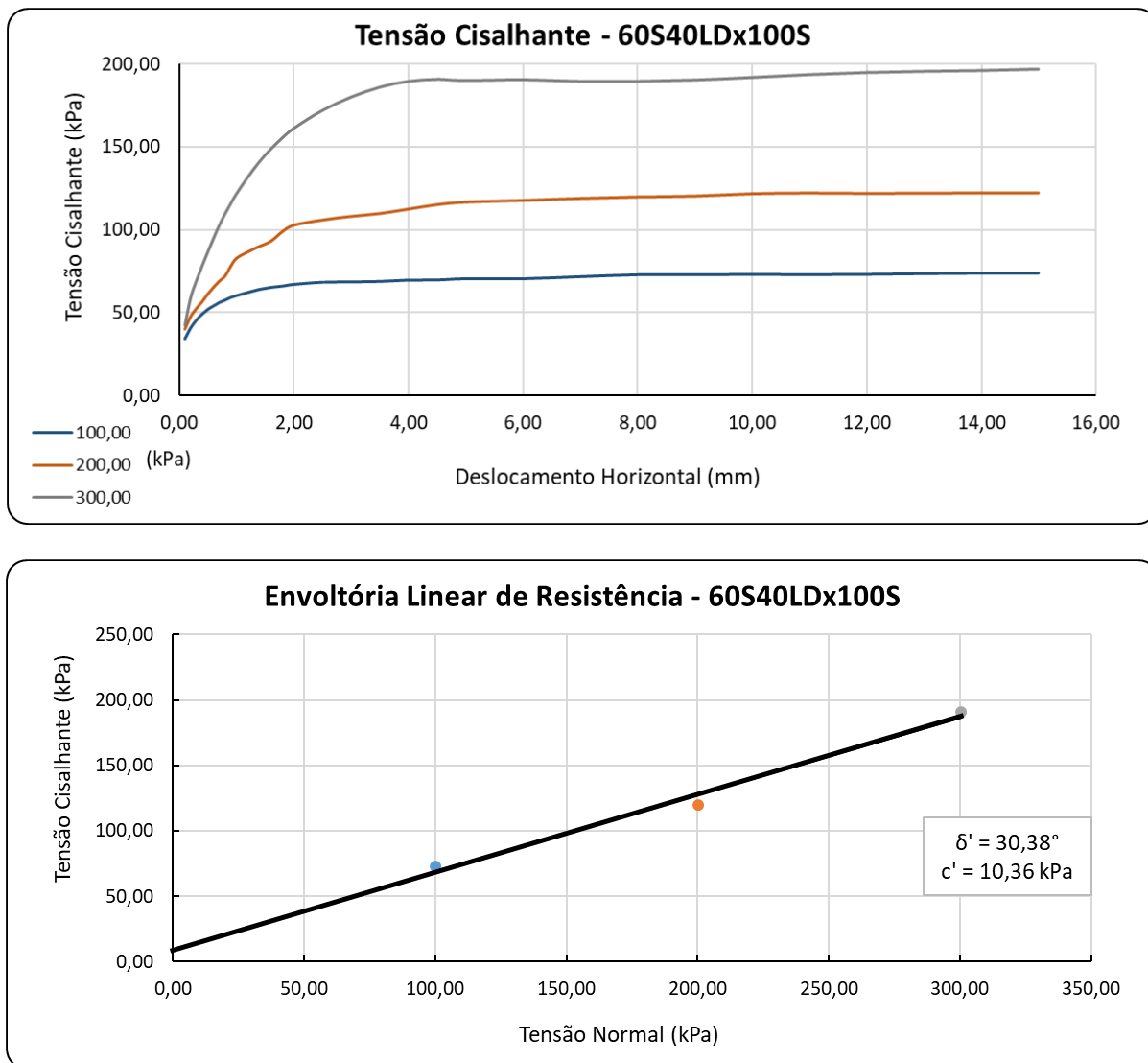


Fonte: Adaptado pelo Autor.

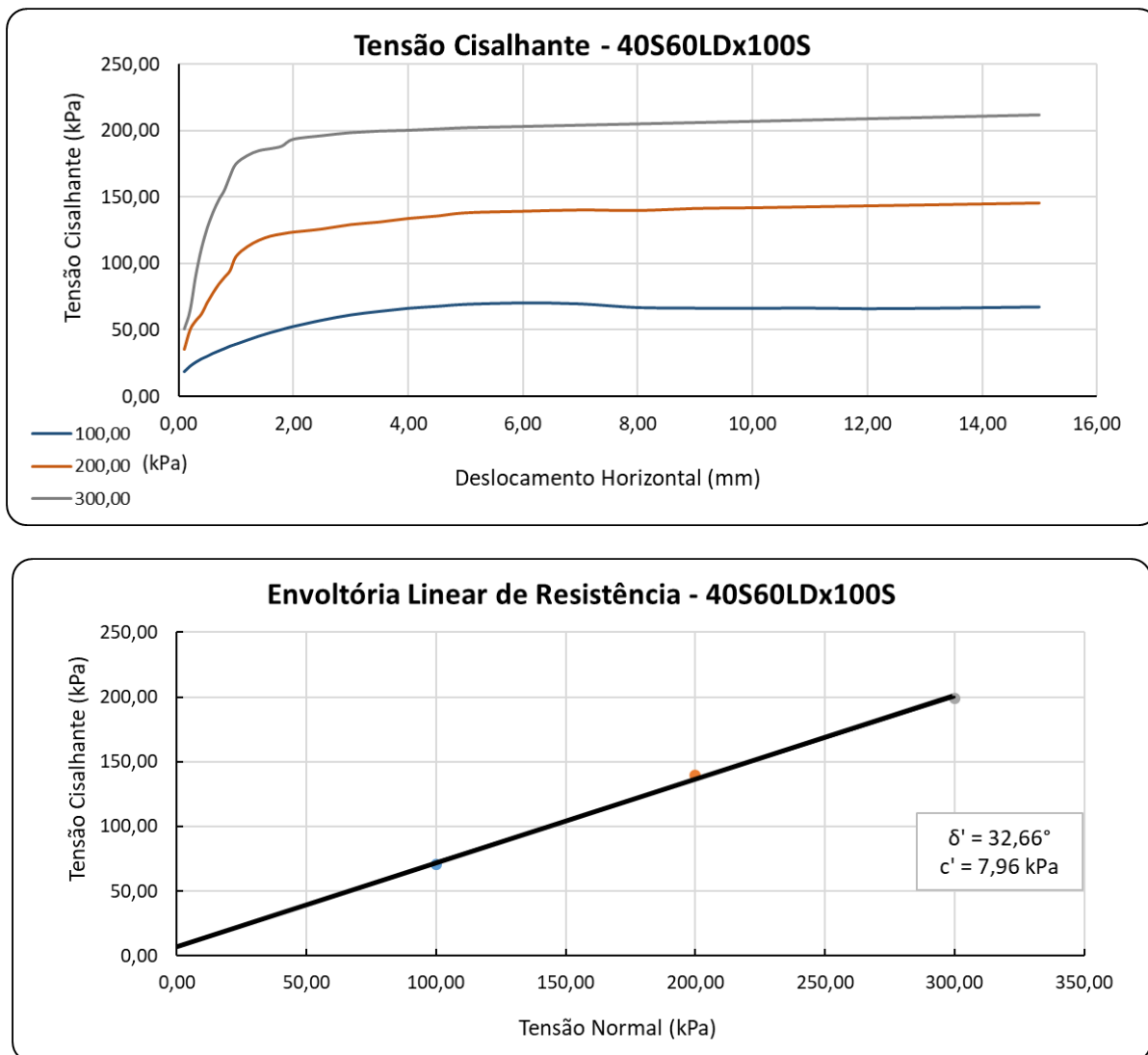
Figura 38: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 80S20LDx100S.

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 39: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 60S40LDx100S.

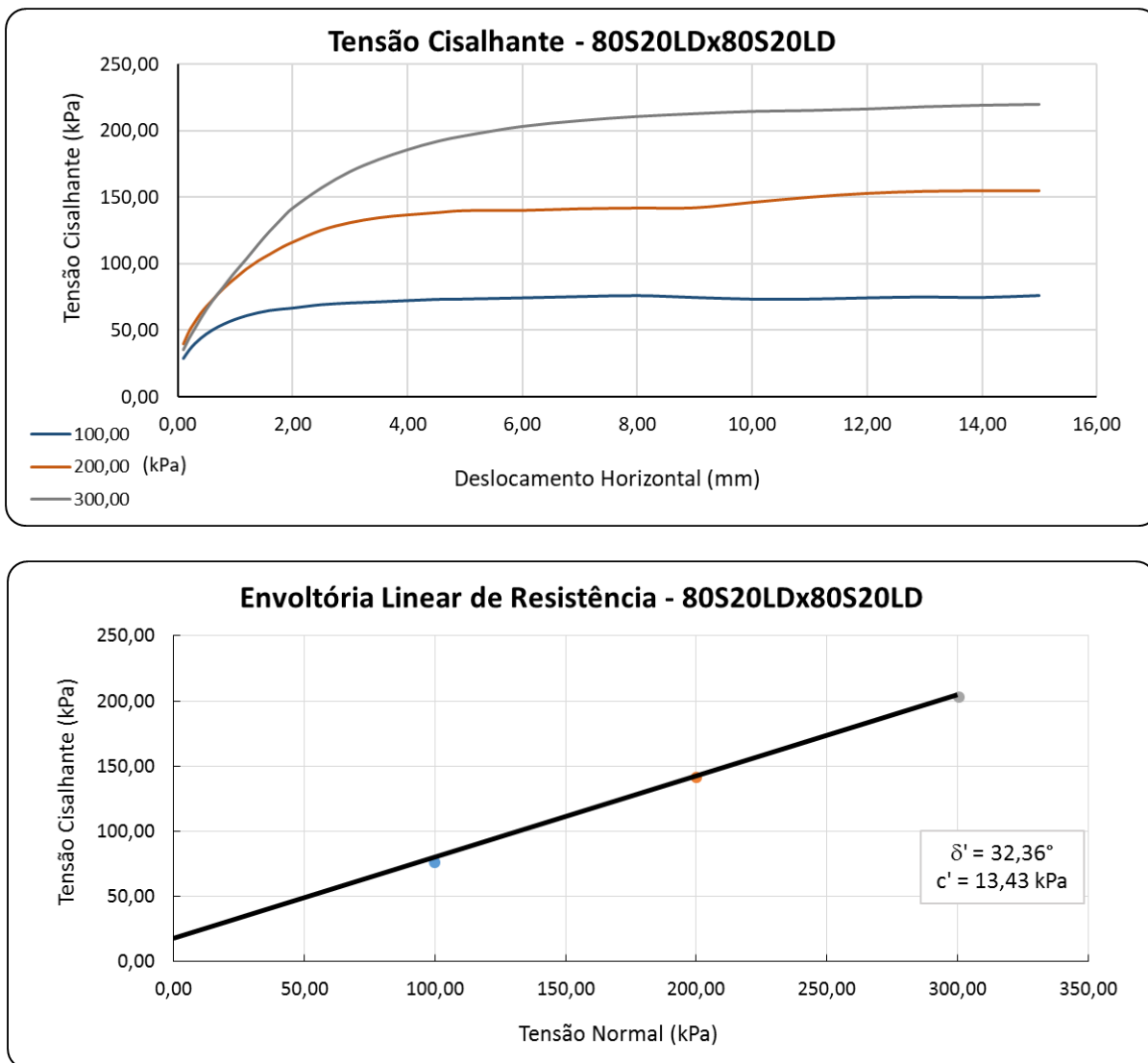


Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 40: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 40S60LDx100S.

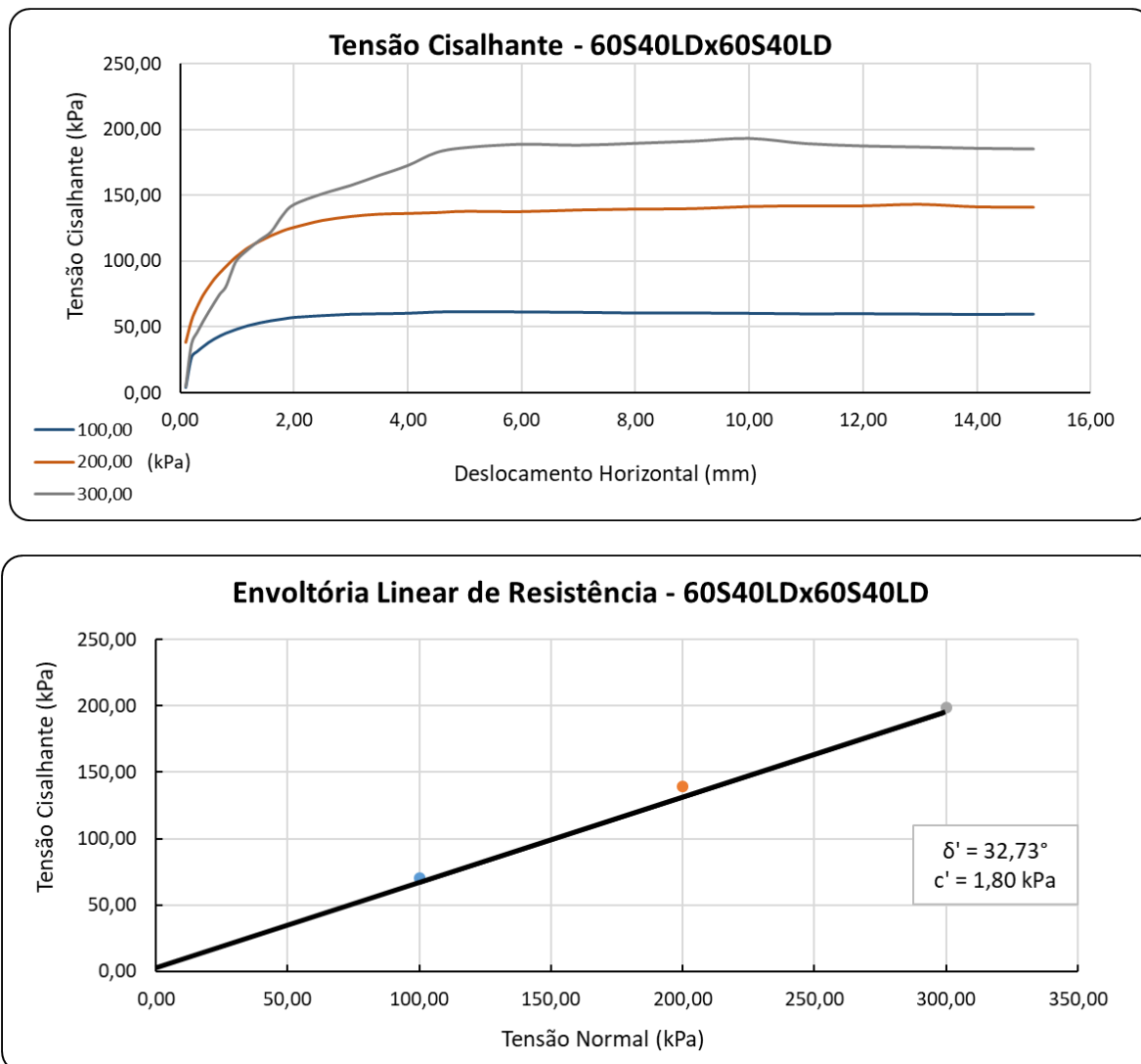
Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 41: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 80S20LDx80S20LD.



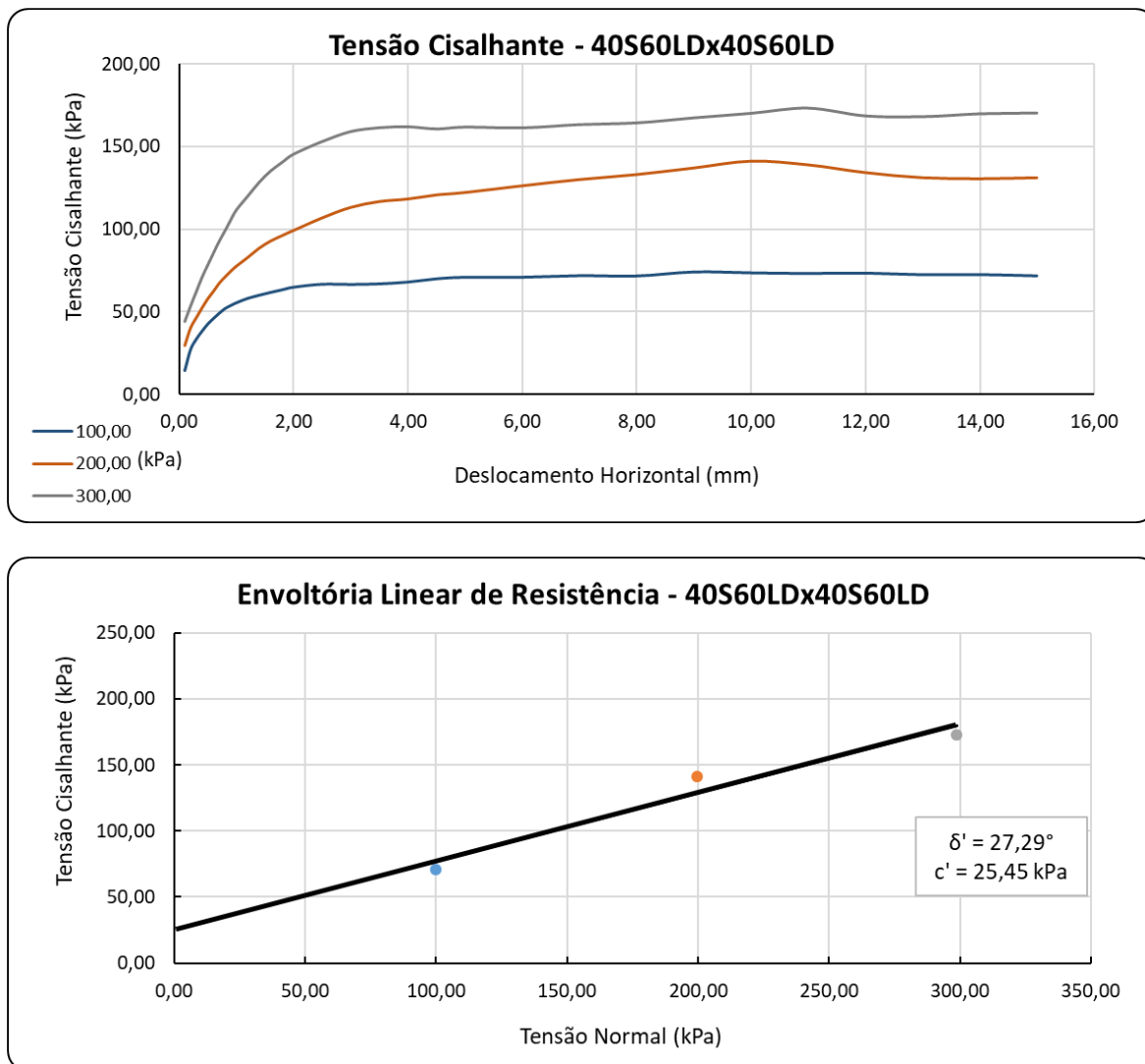
Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 42: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 60S40LDx60S40LD.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Figura 43: Gráficos com parâmetros de resistência da amostra 40S60LDx40S60LD.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

4.4 DENSIDADE DO CONJUNTO PNEU-SOLO-COPRODUTO

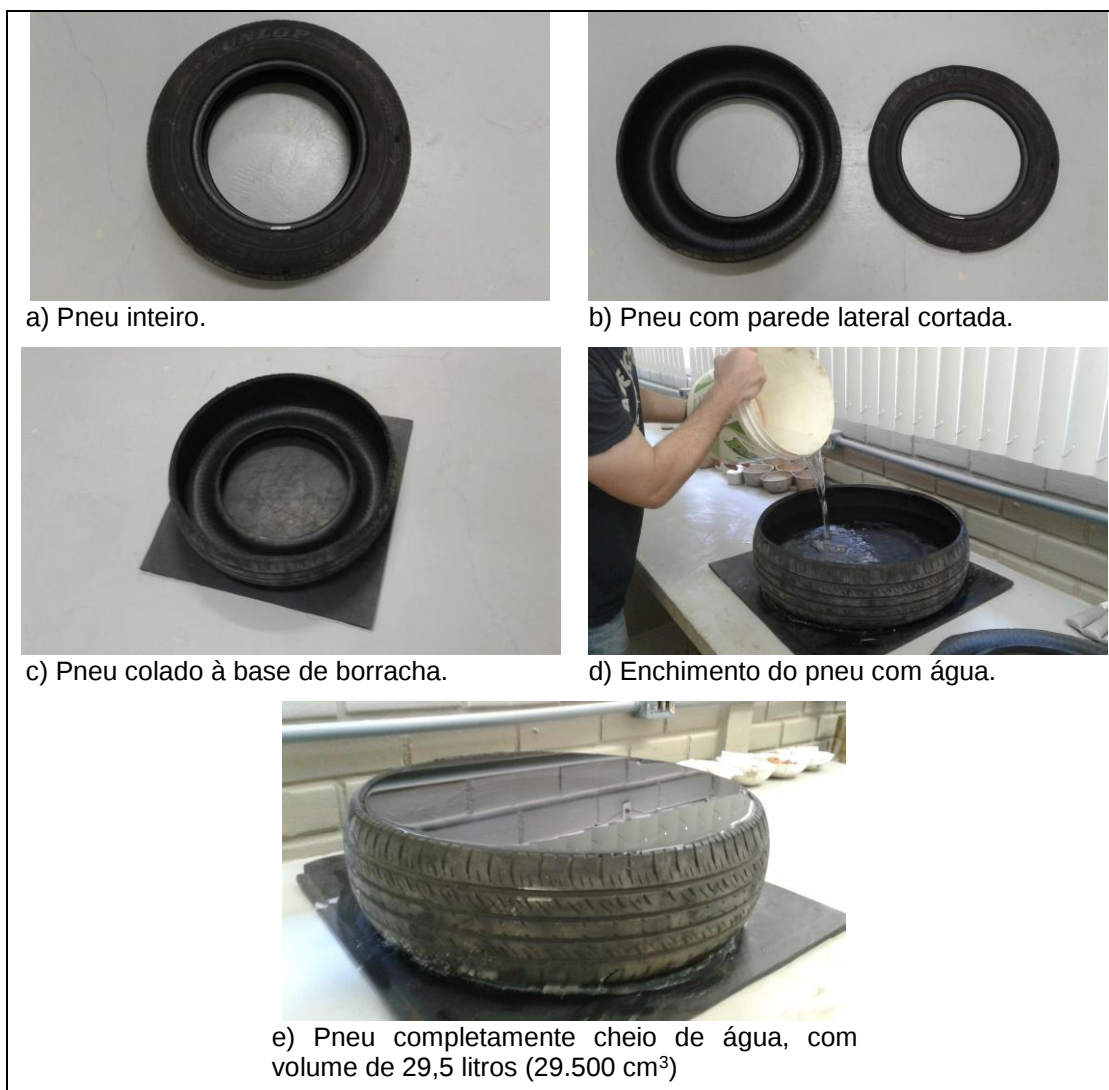
Para o cálculo da densidade do conjunto pneu-solo-coproduto (γ_p), inicialmente foi feita a medida das áreas mostradas na Figura 27 com o auxílio do software AutoCAD da Autodesk®, onde se obteve o resultado expresso na Tabela 10.

Tabela 10: Cálculo das áreas ocupadas por pneu e solo/adição de coproduto em uma camada.

Descrição	Área (m ²)	Área ocupada (%)
Área total	2,991	100,00
Área de pneu	1,765	59,02
Área de solo/adição de coproduto	1,226	40,98

Fonte: Adaptado pelo Autor.

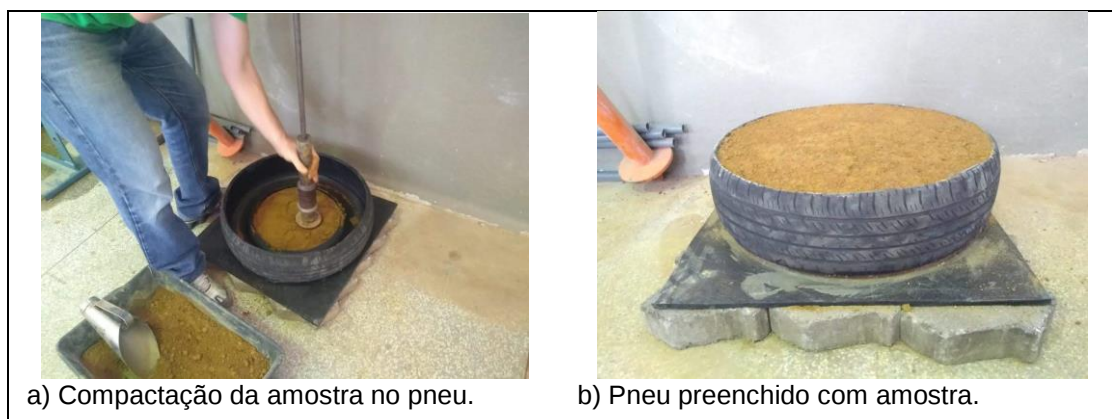
A área total da camada do muro foi calculada para uma faixa de 1,0 metro e largura de 2,991 metros, obtida a partir da Equação 3.2 para o pneu do tipo 165/70 R13. Num segundo momento foi realizada a medida volumétrica de um pneu do tipo 165/70 R13, como se vê na sequência de fotos da Figura 44.

Figura 44: Medição do volume interno de um pneu do tipo 165/70 R13.

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Posteriormente o mesmo pneu foi preenchido por compactação manual (Figura 45) com a adição de solo e coproduto de aciaria identificada como 40S60LD (40% de solo e 60% de coproduto) e pesado.

Figura 45: Compactação de amostra 40S60LD em um pneu do tipo 165/70 R13.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

O preenchimento de um pneu com uma das adições tem o objetivo de confirmar se tal hipótese em grande escala era possível, pois todos os cálculos e testes anteriores foram realizados em um anel utilizado na prensa de cisalhamento, que possui pequenas dimensões (10 x 10 x 2 cm; volume de 200 cm³).

O resultado desse ensaio demonstra que é possível chegar à densidade determinada no ensaio de compactação ao preencher manualmente o pneu, a mesma densidade utilizada no anel de cisalhamento, por ocasião do ensaio de cisalhamento direto.

Após os cálculos considerando o volume de solo com adição de coproduto de aciaria que preenche os pneus e que preenche os interstícios entre os pneus na camada, foi elaborada a Tabela 11 com os resultados.

Tabela 11: Resumo dos valores de densidade do muro com pneus.

Amostra	Densidade do solo/adição (kN/m³)	Densidade do muro com pneus - γ_p (kN/m³)	Relação entre densidade do muro e solo/adição (%)	Incremento de γ_p com adição de coproduto (%)
100S	21,39	17,35	81,07%	-
80S20LD	21,82	17,67	80,96%	1,87%
60S40LD	22,93	18,50	80,70%	6,67%
40S60LD	24,38	19,59	80,39%	12,97%

Fonte: Adaptado pelo Autor.

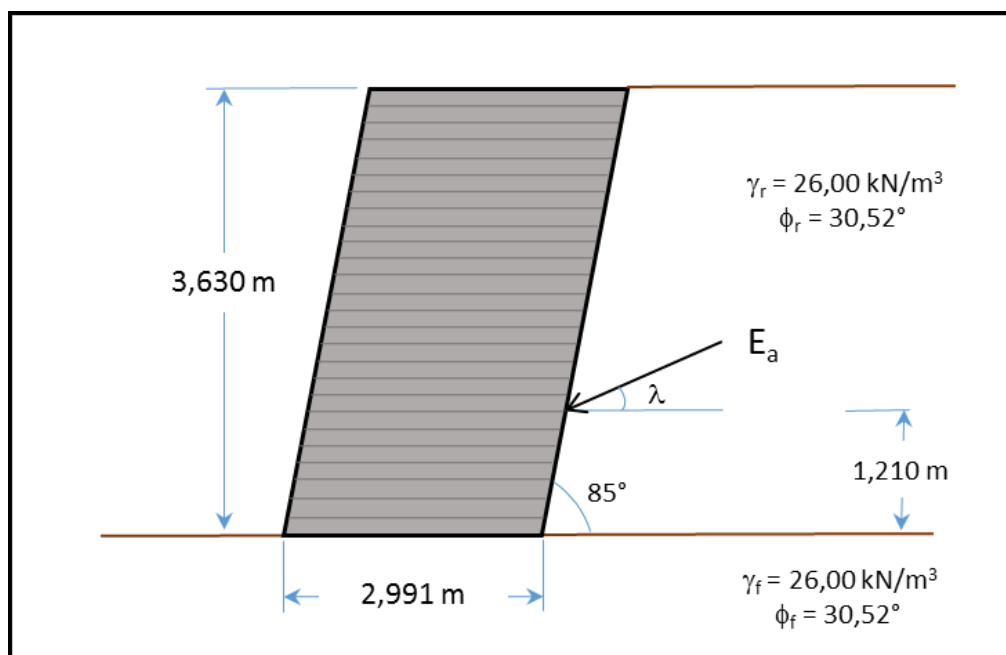
Percebe-se a diminuição dos valores de densidade do muro devido aos pneus, que possuem baixa densidade quando comparados às adições de solo com coproduto de aciaria. O'Shaughnessy (1997) destaca que para pneus preenchidos com solo coesivo, valores aceitáveis seriam da ordem de 80%, ou seja, $\gamma_p = 0,80 \times \gamma_r$. Para solos granulares esse valor poderia chegar a 95%.

No presente estudo foram encontrados valores de aproximadamente 80%, conforme referendado por O'Shaughnessy.

4.5 DIMENSIONAMENTO DO MURO

Para as análises de estabilidade do muro de pneus, foram consideradas as dimensões apresentadas na Figura 46. O pneu escolhido para os cálculos é o 165/70 R13. Com essa configuração o muro deve ser construído com 22 camadas de pneus.

Figura 46: Dimensões e empuxo ativo no muro de contenção pesquisado.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Os valores do empuxo ativo (E_a) e do ângulo entre o empuxo ativo e a direção horizontal (λ) dependem de outros fatores e serão apresentados na Tabela 12, onde também são evidenciados os parâmetros calculados em função do solo e das adições de coproduto de aciaria.

Tabela 12: Parâmetros iniciais de cálculo do muro de contenção pesquisado.

Parâmetro	Amostra			
	100S	80S20LD	60S40LD	40S60LD
γ_p (kN/m ³)	17,35	17,67	18,50	19,59
k_a	0,2004	0,1994	0,1996	0,1999
E_a (kN/m)	34,33	34,16	31,19	43,74
δ (°)	32,57	29,33	30,16	34,24
λ (°)	27,57	24,33	25,16	26,09

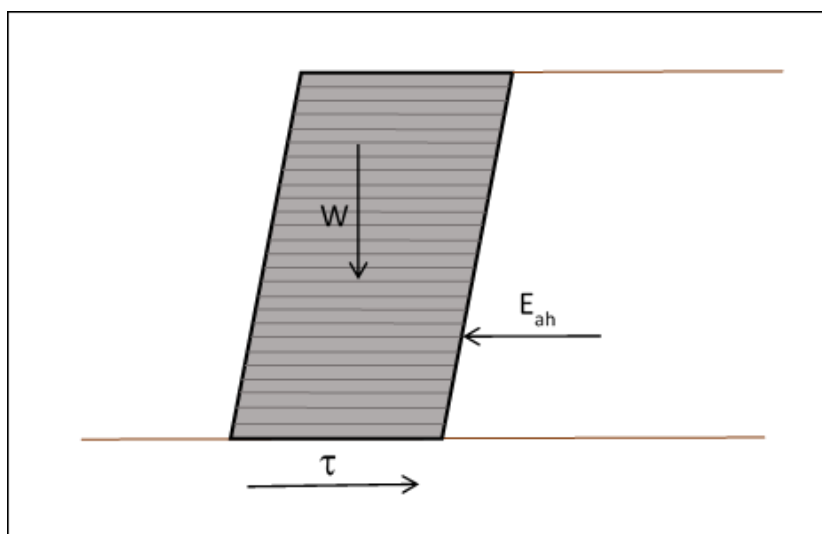
Fonte: Adaptado pelo Autor.

Observa-se que os valores do coeficiente de empuxo ativo (k_a) e do empuxo ativo (E_a) variam pouco, pois dependem do solo do retroaterro e de fatores geométricos do muro. O mesmo ocorre com o ângulo de atrito de interface (δ), que também depende de fatores geométricos.

4.5.1 Segurança contra o Deslizamento

A Figura 47 ilustra os esforços considerados na análise de estabilidade relacionada com a segurança contra o deslizamento, com a finalidade de se obter o Fator de Segurança contra o Deslizamento (FS_{desl}). São eles o peso do muro (W), o empuxo ativo horizontal (E_{ah}) e a tensão de cisalhamento ao longo da base (τ).

Figura 47: Esforços no muro de contenção para o cálculo do fator de segurança contra o deslizamento.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Para o pneu 165/70 R13 o muro terá uma altura de 3,630 metros, com 22 camadas. Foram elaboradas as Tabelas 13 a 16, com os cálculos de FS_{desl} . O Nível 1 é referente ao contato entre a primeira camada de pneus e o solo de fundação, na base do muro. Os demais níveis são referentes ao contato entre as camadas sucessivas.

Tabela 13: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 100S.

Nível	Altura (m)	E_{ah} (kPa)	σ (kPa)	$A_x \tan \delta'_x$	$A_{x+1} \tan \delta'_{x+1}$	FS_{desl}
1	3,630	30,43	62,96	0,30	0,34	3,97
2	3,465	27,73	60,10	0,30	0,34	4,16
3	3,300	25,15	57,24	0,30	0,34	4,37
4	3,135	22,70	54,38	0,30	0,34	4,60
5	2,970	20,37	51,52	0,30	0,34	4,85
6	2,805	18,17	48,65	0,30	0,34	5,14
7	2,640	16,10	45,79	0,30	0,34	5,46
8	2,475	14,15	42,93	0,30	0,34	5,82
9	2,310	12,32	40,07	0,30	0,34	6,24
10	2,145	10,63	37,21	0,30	0,34	6,72
11	1,980	9,05	34,34	0,30	0,34	7,28
12	1,815	7,61	31,48	0,30	0,34	7,94
13	1,650	6,29	28,62	0,30	0,34	8,73
14	1,485	5,09	25,76	0,30	0,34	9,70
15	1,320	4,02	22,90	0,30	0,34	10,91
16	1,155	3,08	20,03	0,30	0,34	12,47
17	0,990	2,26	17,17	0,30	0,34	14,55
18	0,825	1,57	14,31	0,30	0,34	17,46
19	0,660	1,01	11,45	0,30	0,34	21,83
20	0,495	0,57	8,59	0,30	0,34	29,11
21	0,330	0,25	5,72	0,30	0,34	43,66
22	0,165	0,06	2,86	0,30	0,34	87,32

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Tabela 14: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 80S20LD.

Nível	Altura (m)	E_{ah} (kPa)	σ (kPa)	$A_x \tan \delta'_x$	$A_{x+1} \tan \delta'_{x+1}$	FS_{desl}
1	3,630	31,12	64,14	0,22	0,34	3,46
2	3,465	28,36	61,22	0,37	0,23	3,89
3	3,300	25,72	58,31	0,37	0,23	4,08
4	3,135	23,21	55,39	0,37	0,23	4,30
5	2,970	20,84	52,48	0,37	0,23	4,54
6	2,805	18,58	49,56	0,37	0,23	4,80
7	2,640	16,46	46,65	0,37	0,23	5,10
8	2,475	14,47	43,73	0,37	0,23	5,44
9	2,310	12,60	40,82	0,37	0,23	5,83
10	2,145	10,87	37,90	0,37	0,23	6,28
11	1,980	9,26	34,99	0,37	0,23	6,80
12	1,815	7,78	32,07	0,37	0,23	7,42
13	1,650	6,43	29,15	0,37	0,23	8,16
14	1,485	5,21	26,24	0,37	0,23	9,07
15	1,320	4,12	23,32	0,37	0,23	10,21
16	1,155	3,15	20,41	0,37	0,23	11,66
17	0,990	2,32	17,49	0,37	0,23	13,61
18	0,825	1,61	14,58	0,37	0,23	16,33
19	0,660	1,03	11,66	0,37	0,23	20,41
20	0,495	0,58	8,75	0,37	0,23	27,21
21	0,330	0,26	5,83	0,37	0,23	40,82
22	0,165	0,06	2,92	0,37	0,23	81,64

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Tabela 15: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 60S40LD.

Nível	Altura (m)	E_{ah} (kPa)	σ (kPa)	$A_x \tan \delta'_x$	$A_{x+1} \tan \delta'_{x+1}$	FS_{desl}
1	3,630	30,95	67,16	0,24	0,34	3,77
2	3,465	28,20	64,11	0,38	0,26	4,35
3	3,300	25,58	61,06	0,38	0,26	4,57
4	3,135	23,08	58,00	0,38	0,26	4,81
5	2,970	20,72	54,95	0,38	0,26	5,08
6	2,805	18,48	51,90	0,38	0,26	5,37
7	2,640	16,37	48,84	0,38	0,26	5,71
8	2,475	14,39	45,79	0,38	0,26	6,09
9	2,310	12,53	42,74	0,38	0,26	6,53
10	2,145	10,81	39,69	0,38	0,26	7,03
11	1,980	9,21	36,63	0,38	0,26	7,61
12	1,815	7,74	33,58	0,38	0,26	8,31
13	1,650	6,39	30,53	0,38	0,26	9,14
14	1,485	5,18	27,47	0,38	0,26	10,15
15	1,320	4,09	24,42	0,38	0,26	11,42
16	1,155	3,13	21,37	0,38	0,26	13,05
17	0,990	2,30	18,32	0,38	0,26	15,23
18	0,825	1,60	15,26	0,38	0,26	18,27
19	0,660	1,02	12,21	0,38	0,26	22,84
20	0,495	0,58	9,16	0,38	0,26	30,46
21	0,330	0,26	6,11	0,38	0,26	45,69
22	0,165	0,06	3,05	0,38	0,26	91,37

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Tabela 16: Cálculos de estabilidade quanto a segurança contra o deslizamento - Amostra 40S60LD.

Nível	Altura (m)	E_{ah} (kPa)	σ (kPa)	$A_x \tan \delta'_x$	$A_{x+1} \tan \delta'_{x+1}$	FS_{desl}
1	3,630	30,75	71,13	0,26	0,34	4,18
2	3,465	28,02	67,90	0,30	0,24	3,94
3	3,300	25,41	64,66	0,30	0,24	4,13
4	3,135	22,93	61,43	0,30	0,24	4,35
5	2,970	20,58	58,20	0,30	0,24	4,59
6	2,805	18,36	54,96	0,30	0,24	4,86
7	2,640	16,26	51,73	0,30	0,24	5,17
8	2,475	14,29	48,50	0,30	0,24	5,51
9	2,310	12,45	45,26	0,30	0,24	5,90
10	2,145	10,74	42,03	0,30	0,24	6,36
11	1,980	9,15	38,80	0,30	0,24	6,89
12	1,815	7,69	35,56	0,30	0,24	7,51
13	1,650	6,35	32,33	0,30	0,24	8,27
14	1,485	5,15	29,10	0,30	0,24	9,18
15	1,320	4,07	25,87	0,30	0,24	10,33
16	1,155	3,11	22,63	0,30	0,24	11,81
17	0,990	2,29	19,40	0,30	0,24	13,78
18	0,825	1,59	16,17	0,30	0,24	16,53
19	0,660	1,02	12,93	0,30	0,24	20,67
20	0,495	0,57	9,70	0,30	0,24	27,55
21	0,330	0,25	6,47	0,30	0,24	41,33
22	0,165	0,06	3,23	0,30	0,24	82,66

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Genericamente, a análise de estabilidade quanto ao deslizamento se dá observando o comportamento da estrutura no contato entre muro e solo de fundação, que no caso específico da pesquisa é identificado como o Nível 1. Mas nesse estudo também há

de se considerar o Nível 2, pois o material de preenchimento dos pneus é diferente entre esses dois níveis quando é feita a adição de coproduto de aciaria. A Tabela 17 apresenta os FS_{desl} das diversas amostras nos níveis citados.

Tabela 17: Resumo do fator de segurança contra o deslizamento para os primeiros níveis do muro de contenção, variando as amostras.

Nível da camada	FS_{desl} por material de preenchimento do muro			
	100S	80S20LD	60S40LD	40S60LD
1	3,97	3,46	3,77	4,18
2	4,16	3,89	4,35	3,94

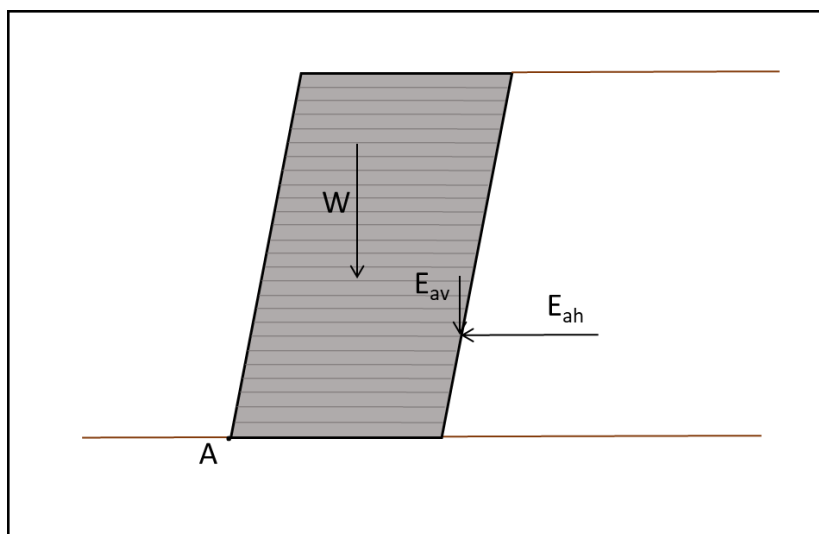
Fonte: Adaptado pelo Autor.

Todos os valores de FS_{desl} encontrados são superiores ao previsto na ABNT NBR 11682 (2009), que deve ser, no mínimo, igual a 1,5. Também são superiores ao referendado na pesquisa de O'Shaughnessy (1997), que cita o valor mínimo de 2,0. Há um ligeiro aumento do fator de segurança com a adição de coproduto de aciaria, que pode ser explicado pelo aumento da densidade do conjunto pneu-solo-coproduto, utilizada no cálculo da tensão (σ) na camada.

4.5.2 Segurança contra o Tombamento

A Figura 48 ilustra os esforços considerados na análise de estabilidade relacionada com a segurança contra o tombamento, com a finalidade de se obter o Fator de Segurança contra o Tombamento (FS_{tomb}). São eles o peso do muro (W), o empuxo ativo horizontal (E_{ah}) e o empuxo ativo vertical (E_{av}).

Figura 48: Esforços no muro de contenção para o cálculo do fator de segurança contra o tombamento.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

A Tabela 18 apresenta os valores calculados dos parâmetros considerando as diversas amostras. No cálculo do fator de segurança em questão o empuxo ativo vertical (E_{av}) cria um momento resistente, a favor da segurança. A tabela apresenta valores de fator de segurança com e sem a inclusão do empuxo ativo vertical.

Tabela 18: Resumo do fator de segurança contra o tombamento para o muro de contenção, variando as amostras.

Parâmetro	FS_{tomb} por material preenchimento do muro			
	100S	80S20LD	60S40LD	40S60LD
W (kN)	188,34	191,86	200,90	212,77
E_{ah} (kPa)	30,43	31,12	30,95	30,75
E_{av} (kPa)	15,89	14,07	14,53	15,06
FS _{tomb}	8,99	8,78	9,23	9,81
FS_{tomb} (-E_{av})	7,65	7,62	8,02	8,55

Fonte: Adaptado pelo Autor.

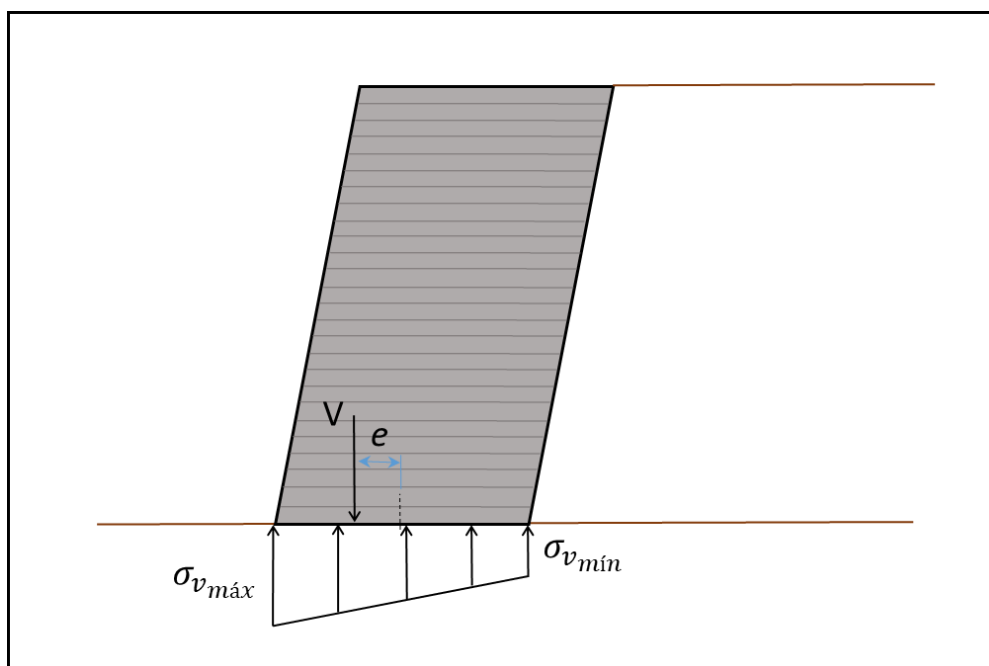
Observa-se que mesmo ao desconsiderar o empuxo ativo vertical, os fatores de segurança calculados (**FS_{tomb} (-E_{av})**) são superiores a 1,5. Percebe-se que quanto maior a adição de coproduto ao solo, maior o FS_{tomb}. Os valores do fator de segurança também são superiores ao referendado na pesquisa de O'Shaughnessy (1997), que cita o valor mínimo de 1,5.

4.5.3 Capacidade de Carga do Solo de Fundação

A Figura 49 ilustra os esforços considerados na análise de estabilidade relacionada com a capacidade de carga do solo de fundação, com a finalidade de se obter o Fator de Segurança de Capacidade de Carga (FS_{capac}).

São eles a somatória dos esforços verticais (V), as tensões no solo ($\sigma_{v\text{máx}}$ e $\sigma_{v\text{mín}}$), e a excentricidade (e).

Figura 49: Esforços no muro de contenção para o cálculo do fator de segurança contra o tombamento.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

A Tabela 19 apresenta os valores calculados dos parâmetros considerando as diversas amostras.

Tabela 19: Resumo do fator de segurança de capacidade de carga para o muro de contenção, variando as amostras.

Parâmetro	FS _{capac} por material preenchimento do muro			
	100S	80S20LD	60S40LD	40S60LD
e (m)	0,056	0,073	0,066	0,057
$\sigma_{vm\acute{a}x}$ (kN/m ²)	75,91	78,98	81,52	84,94
$\sigma_{vm\acute{i}n}$ (kN/m ²)	60,643	58,70	62,52	67,39
q _{máx}	1986,75	1967,24	1975,68	1984,84
FS _{capac}	26,17	24,91	24,23	23,37

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Todos os valores de FS_{capac} encontrados são superiores ao previsto na ABNT NBR 11682 (2009), que deve ser, no mínimo, igual a 1,5. Nesse caso quanto maior a adição do coproduto, menor o valor de FS_{capac}, pois maior é o peso da estrutura sobre o solo de fundação. Porém, numericamente os valores dos fatores de segurança são grandes, o que compensa tal efeito. Os valores do fator de segurança também são muito superiores ao referendado na pesquisa de O'Shaughnessy (1997), que cita o valor mínimo de 1,5.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esse trabalho apresenta o estudo sobre obtenção de parâmetros de projeto e dimensionamento de um muro de contenção construído com pneus usados e adições, em diferentes proporções, de coproduto siderúrgico de aciaria do tipo LD com solo. No projeto exemplificado o muro possui altura de 3,630 metros e largura da base de 2,991 metros, com inclinação de 85°. Foi convencionado que o retroaterro é horizontal, cujo solo possui as mesmas características do solo de fundação do muro.

Para os ensaios e cálculos de análise de estabilidade do muro, considerou-se o solo puro e adições de solo com coproduto de aciaria em três proporções: 20%, 40% e 60%. Foram realizados ensaios de caracterização física do solo e do coproduto de aciaria, ensaios mecânicos do solo e das adições (compactação, ISC e expansão), ensaio de cisalhamento direto simulando as interfaces entre o solo de fundação e as camadas do muro, e a determinação da massa específica do muro preenchido com o solo e com as diferentes adições.

Definidos os parâmetros obtidos na campanha de ensaios, foram realizadas três análises de estabilidade do muro de contenção: contra o deslizamento, contra o tombamento e capacidade de carga do solo de fundação.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados na pesquisa indicam que a utilização do coproduto de aciaria combinado com pneus usados se apresenta como uma alternativa tecnicamente viável às soluções tradicionais na construção de muros de contenção.

Foram consultados diversos estudos realizados com a utilização de pneus usados na construção de muros de contenção, geralmente preenchidos com solos coesivos ou granulares, e todos apontam para a viabilidade técnica do uso desse resíduo, além de benefícios ambientais.

O diferencial na presente pesquisa é a utilização de outro resíduo que pode ser incorporado a um muro de contenção: o coproduto siderúrgico proveniente de aciaria, do tipo LD.

Os resultados dos ensaios mecânicos mostram que a adição do coproduto de aciaria proporciona melhorias substanciais quando comparados à utilização do solo puro. É possível perceber que a umidade ótima cai com a adição do coproduto siderúrgico, enquanto a massa específica aparente seca máxima aumenta continuamente. Os valores de ISC na umidade ótima aumentam, enquanto a expansão diminui continuamente.

Os ângulos de atrito de interface (δ) obtidos nos ensaios de cisalhamento direto das adições variaram de 27,29° (40S60LDx40S60LD) a 32,73° (40S60LDx100S), com valor médio igual a 30,55°.

Observa-se que os valores encontrados das relações entre os ângulos de atrito de interface (δ) das adições e o ângulo de atrito (ϕ) da amostra com solo puro, que variaram de 0,75 a 0,90, são coerentes com outros autores.

A determinação da massa específica do muro de contenção apresenta acréscimos subsequentes com a adição do coproduto. Para a amostra com 60% de coproduto de aciaria houve aumento de 12,97% da massa específica do muro quando comparada com solo puro.

As análises de estabilidade do muro de contenção para as dimensões definidas previamente apresentaram, em todos os casos, valores de fator de segurança superiores ao previsto na ABNT NBR 11682 (2009), que define o valor mínimo de 1,5.

Na análise de estabilidade contra o deslizamento há outro diferencial dessa pesquisa: a consideração de parâmetros de resistência de diferentes camadas do muro, em função das diferentes adições de solo e coproduto de aciaria, cujas interfaces foram estudadas em separado. Normalmente as análises de estabilidade consideram o muro como uma estrutura monolítica e os cálculos são feitos apenas com os parâmetros de interface da base do muro. O menor fator de segurança encontrado foi de 3,46.

A análise de estabilidade contra o tombamento apresenta resultado mínimo de 7,62, na menor proporção de solo e coproduto de aciaria (20% de coproduto), bem superior ao 1,5 da ABNT NBR. Percebe-se que quanto maior a adição de coproduto ao solo, maior o fator de segurança.

A capacidade de carga do solo de fundação apresenta valores de fator de segurança muito superiores ao previsto na norma. Nesse caso quanto maior a adição do coproduto, menor o valor de fator de segurança, pois maior é o peso da estrutura sobre o solo de fundação. Porém, numericamente os valores são grandes, o que compensa tal efeito. Como exemplo, o menor valor encontrado foi de 23,37, para o material de preenchimento 40S60LD (adição de 40% de solo e 60% de coproduto de aciaria).

Em resumo, o coproduto de aciaria melhora as propriedades mecânicas das adições de solo com coproduto de aciaria, e os dois resíduos podem, de forma benéfica e sinérgica, ser utilizados em conjunto na construção de muros de contenção.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando complementar o estudo desenvolvido nessa pesquisa, sugere-se a construção de um muro de contenção experimental para avaliação e monitoramento do comportamento dos dois resíduos em condições reais de utilização.

Devido ao grande número de áreas de risco de deslizamento existentes no Brasil, há um vasto campo de pesquisas que pode ser explorado voltado para o uso de resíduos na construção de estruturas de contenção, aumentando a mitigação e prevenção de desastres. Mas para que a disseminação do conhecimento se faça de forma organizada, sugere-se a elaboração de uma cartilha com os fundamentos construtivos básicos, mantendo, principalmente, o foco na segurança.

Mostra-se promissor o estudo da utilização do coproduto de aciaria pela carência de trabalhos publicados na área. Há ainda a necessidade de desenvolvimento de normas específicas para o material em questão. Suas características podem ser exploradas em diversas áreas do conhecimento, visando os benefícios ao meio ambiente ao se criar disposições adequadas para o material.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. Philadelphia, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator de expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2001.

BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. 3. ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 1992. 816p.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

BRASIL. PPA 2012-2015. **Programa Gestão de Riscos e Resposta a Desastres**. Brasília: SPI/Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2011.

CALVELLO, M.; D'ORSI, R. N.; PICIULLO, L. **Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil, on an intra-urban scale**. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 31, p. 449-459, 2018.

DE CAMPOS, T. M. P.; CARRILLO, C. W. **Direct shear testing on unsaturated soil from Rio de Janeiro**. Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soils, Vol. 1, p. 31-38, Paris. 1995.

DIAS, M. C. A.; SAITO, S. M.; ALVALÁ, R. C. S. **The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010-2013**. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 12, p. 3-15, 2015.

ESPÍRITO SANTO. **Planos Municipais de Redução de Risco (PMRR) e Planos Diretores de Águas Pluviais (PDAP)**. Vitória: SEDURB/ES, 2013, 78p.

EDINÇLILER, A.; BAYKAL, G.; SAYGILI, A. **Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction**. Waste Management, v. 30, p. 1073-1080, 2010.

FREITAS, S. S. **Benefícios sociais e ambientais do coprocessamento de pneus inservíveis. Estudo de caso na cidade de João Pessoa/PB**. Dissertação (Mestrado em engenharia Urbana e ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

GONÇALVES, R. M. **Incorporação de coproduto de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

GONÇALVES, R. M. **Estabilização de taludes por meio de mistura de solo com escória de dessulfuração (KR)**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, 2016.

HUAT, B. B. K.; AZIZ, A. A.; CHUAN, L. W. **Application of scrap tires as earth reinforcement for repair of tropical residual soil slope**. World Wide Web of Geotechnical Engineers (The Electronic Journal of Geotechnical Engineering), v. 13B, p. 1-9, 2008.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2018**. 10. ed. Brasil: 2018, 84p.

IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2007, 176p.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: J. Wiley & Sons, 1969.

LI, L.; XIAO, H; FERREIRA, P.; Cui, X. **Study of a small scale tyre-reinforced embankment**. Geotextiles and Geomembranes, v. 44, p. 201-208, 2016.

LONG, N. T. **Utilization of used tyres in civil engineering: the pneusol "tyresoil"**. Environmental Geotechnics, Rotterdam: Balkema, p. 809-814, 1996.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: J. Wiley & Sons, 1976.

O'SHAUGHNESSY, V. **Reinforcement of earth structures using scrap tires**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculty of Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Canada, 1997.

RODRIGUES, A. P. **Influência de parâmetros geotécnicos e de propriedades geomecânicas de pneus inservíveis em obras geotécnicas e rodoviárias**. 2004.

Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2004.

SIEIRA, A. C. C. F.; SAYÃO, A. S. F. J.; MEDEIROS, L. V.; GERSCOVICH, D. M. S. **Comportamento de um muro de pneus para estabilização de encostas.** Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Portugal, v. 91, p. 39-55, mar./2001.

SIEIRA, A. C. C. F. **Geossintéticos e pneus: alternativas de estabilização de taludes.** ENGEVISTA, Niterói, v. 11, p. 50-59, jul./2009.

SILVA, B. F. P.; RAMOS, H. E. A.; SILVA, J. G. F.; HOLLANDA, M. P. H. **Chuva Extrema. O caso de dezembro de 2013 no Estado do Espírito Santo.** INCAPER em Revista, Vitória, v. 4 e 5, p. 113-121, jan./2013 - dez./2014.

SIEIRA, A. C. C. F. **Análise do comportamento de um muro de contenção de encostas utilizando pneus.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

TOMINAGA, L. K.; KEIKO, L.; SANTORO, J. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico/SP, 2009, 196p.

UNDRO. **Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options. A Manual for Policy makers and Planners.** New York: United Nations/United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO), 1991.

YOON, Y; HEO,S; KIM, K. **Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests.** Geotextiles and Geomembranes , v. 26, p. 100-107, 2008.