

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**COMPACTAÇÃO E DEFORMABILIDADE DE ESCÓRIA
MISTURADA COM BORRACHA PARA CAMADAS DE
APOIO DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE**

Caio Comini Carapinha

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

Orientador: António Joaquim Pereira Viana da Fonseca (Professor Doutor)
Coorientadora: Sara Rios da Rocha e Silva (Doutora)

Junho de 2021

Resumo

A escassez de matéria-prima para fabricação de determinados elementos que são essenciais para a humanidade obriga o homem a se reinventar a cada dia em busca de novos processos e métodos para a conquista de produtos. Ao mesmo tempo, a busca por novos processos e métodos de extração de matéria-prima deverá estar associada à sustentabilidade e economia circular do planeta.

A construção de infraestrutura de transporte, nomeadamente estradas e ferrovias, é um dos setores da atividade económica que envolve maior consumo de matérias-primas naturais, com impactos significativos ao nível socioeconómico e ambiental. Este trabalho tem por objectivo avaliar algumas propriedades geomecânica de misturas de agregado siderúrgico de forno de arco eléctrico com distinta percentagem de agregado de borracha derivado de pneus em fim de vida, com vista à aplicação em camadas de infraestruturas de transporte.

A introdução de materiais reciclados nos sistemas estruturais, como as infraestruturas de transporte, requer o desenvolvimento de novas normas, que considerem processos de avaliação do desempenho deste tipo de mistura indicando padrões de comportamento destes materiais alternativos. Para esse efeito, pretende-se desenvolver uma metodologia racional baseada em índices que traduzem a composição da mistura.

O estudo a seguir pretende reforçar e complementar as investigações de subprodutos de aciaria, nomeadamente em escórias com adição de borracha. Neste sentido, com o objectivo de compreender o comportamento desta composição, os estudos foram baseados em resultados de ensaios laboratoriais, tais como: I) análise da curva granulométrica; II) curvas de compactação do material que apontem para valor de pesos volúnicos máximos exigíveis; III) valores de índices de CBR esperados para misturas de ASIC com adição de borracha; IV) ensaios laboratoriais para medição das velocidades de ondas sísmicas, que possibilitem determinar os módulos de elasticidade dinâmica do material e sua variação com o tipo de mistura, particularmente a percentagem de borracha

Os ensaios em laboratório foram realizados no Laboratório de Geotecnia da FEUP (LabGeo), com 25 provetes compostos por ASIC e inclusão em teores de borracha (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%). Para cada composição do ASIC e borracha, foram feitos ensaios com diferentes teores em água.

Por fim, são apresentadas as conclusões mais relevantes dos estudos desenvolvidos e elencadas possíveis linhas para o desenvolvimento futuro que complementariam este estudo do comportamento desta mistura, diante das camadas ferroviárias e rodoviárias.

Palavras-chave: Agregado siderúrgico de forno de arco elétrico; ASIC; Escória de aciaria com borracha; infraestruturas de transporte.

Summary

The scarcity of raw material to manufacture certain elements that are essential or not for humankind forces man to reinvent himself every day in search of new processes and methods to achieve products. At the same time, the search for new processes and methods for extracting the raw material must be associated with sustainability and the planet's circular economy.

The construction of transport infrastructure, namely roads and railways, is one of the sectors of economic activity that involves greater consumption of natural raw materials, with significant impacts at socio-economic and environmental level. This study aims to evaluate the geomechanical performance of the mixture of steel aggregate from electric arc furnace with rubber aggregate derived from end-of-life tyres, with a view to its application in the sub-ballast layer.

The introduction of recycled materials into structural systems, such as transport infrastructures, requires the development of new standards, based on reliable scientific results on the behavior of these alternative materials. For this purpose, it is intended to develop a rational methodology based on indices that translate a mixture composition.

The following study reinforces and complements the investigations of steel by-products, namely in slags with added rubber. In this sense, in order to understand the behavior of this composition, the studies were based on laboratory tests: I) a particle size analysis comprising control range of a sub-ballast layer; II) determination of the degree of compaction of the material and maximum density; III) exposure of the CBR indices for the mixture of ASIC with added rubber; IV) Finally, laboratory tests were carried out referring to the seismic waves, which made it possible to determine both the elasticity and distortion modulus of the material.

The laboratory tests were carried out at FEUP's Geotechnical Laboratory, with 25 specimens composed of ASIC and inclusion to vary the rubber content (0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10%). For each composition of ASIC and rubber, they were made with different water contents.

Finally, the most relevant conclusions of the developed studies are presented and possible lines for future development are listed, which complement the study of the behaviour of this material, facing railway and road layers.

Keywords: electric arc furnace slag (EAF-S); ASIC; rubber crumbs; steel slag; Transport infrastructure.

Agradecimentos

Todas as pessoas que participaram desde o início desta caminhada, contribuindo com conhecimento e durante este período de crescimento pessoal, serão lembrados e recordados com muito apreço.

Agradeço ao Professor Doutor António Viana da Fonseca, orientador que me acompanhou e proporcionou ao longo do curso: conhecimento inestimável; conselhos essenciais que determinaram e guiaram nas tomadas de decisões; acolhimento no Laboratório de Geotecnia da FEUP; e foi indubitavelmente importante para a chegada deste momento.

Agradecimento mais que especial para coorientadora Doutora Sara Rios, que conduziu com excelência não medindo esforços durante o percurso. Com muita desenvoltura e de portas abertas, a Doutora Sara Rios sempre esteve disponível proporcionando o melhor proveito neste estudo com muita paciência e dedicação. Não tenho dúvidas que a conclusão da dissertação não se teria dado sem este apoio incondicional.

Agradeço toda a equipa do laboratório de geotecnia da FEUP, todos permitiram um ambiente de confraternização e respeito, formando uma família. Agradeço aos alunos que na caminhada até aqui, se tornaram meus amigos: Daniela, Diana, David, Fausto, Isabela, Nelson e em especial ao professor e aluno de doutoramento Rubens, que desde o início ajudou na realização dos procedimentos dos ensaios que aqui nesta dissertação estão apresentados.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia do Porto ISEP e ao Eng^o José Fernandes, que facilitou os equipamentos, nomeadamente, provetes de CBRs e acessórios de modo, a aumentar a produtividade e realizar os ensaios dentro de um cronograma previsto. Certamente, a colaboração do Eng^o. José Fernandes e a disponibilidade pela cedência dos equipamentos foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese.

Agradeço a todos os colegas de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica da FEUP, por partilhar todos os momentos dentro e fora da faculdade. Agradeço a solidificação de grandes amizades feitas durante o curso e que serão levadas para a vida. Agradeço aos momentos de confraternizações em que a família esteve distante, mas que foi bem representado por estes amigos.

Por fim, deixo meu maior agradecimento a minha família que semeou este caminho e que são responsáveis por eu chegar aqui. A minha mãe e professora Maria de Fátima, por dar todo suporte, incentivo, conselho e oportunidade de concluir mais uma das várias etapas que ela tem me acompanhado. E a escritora, professora e doutoranda Daniele que me inseriu neste meio acadêmico, sendo minha maior mentora e incentivadora durante os estudos e nos últimos anos. Eu tenho um orgulho imenso de poder partilhar os momentos consigo.

Índice

Resumo	iii
Summary.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	x
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvi
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Objectivos	2
Capítulo 2	4
Aplicação de Subprodutos Industriais em Infraestruturas de Transporte	4
2.1 - Introdução	4
2.2 - Estrutura de uma Infraestrutura de Transporte	5
2.3 - Ensaio para as camadas de sub-base e sub-balastro	14
2.4 - Agregado para camada de sub-balastro.....	19
2.5 - Aplicação de ASIC e borracha	26
Capítulo 3	27
Metodologia	27
3.1 - Metodologias e programa experimental	27
3.2 - Análise granulométrica.....	28
3.3 - Ensaio de compactação Proctor.....	32
3.4 - Ensaio de CBR	34
3.5 - Ensaio de ondas	39
Capítulo 4	45
Resultados	45
4.1 - Introdução	45
4.2 - Análise Granulométrica	46
4.3 - Curvas de compactação	48
4.4 - Curvas do CBR e resultados.....	50
4.5 - Velocidades das ondas e módulos de deformabilidade elástico	54
Capítulo 5	59
Conclusões e investigações futuras	59
5.1 - Conclusões	59
5.2 - Desenvolvimentos Futuros	60

Referências	61
Anexo I - Curva e valores de CBR para diferentes teores de borracha	66
Anexo II - Curva e valores de CBR para diferentes teores em água	69
Anexo III - Resultados dos ensaios de ondas P.....	74
Anexo IV - Resultados dos ensaios de ondas S.....	77

Lista de figuras

Figura 2.1 - Esquema de classificação de grupos de solos	8
Figura 2.2 - Composição do Pavimento (DNIT, 2006, p.106 - Adaptado)	10
Figura 2.3 - Camadas que constituem a plataforma (Fonte: Fortunato et al, 2012).....	14
Figura 2.4 - Limites da curva do fuso granulométrico. Refer (2007)	17
Figura 2.5 - Estatística da Euroslag 2018 referente à produção de Escória de alto forno na União Europeia.	20
Figura 2.6 - Ilustração do processo de obtenção de escória de aço em alto forno. Adaptado de https://www.geowiki.fr/index.php?title=Fours	21
Figura 2.7 - Forno Elétrico. Adaptado de https://www.electrical4u.com/electric-furnace/	22
Figura 2.8 - Análise Granulométrica da borracha com dimensões de 2,0 a 4,0mm - Genan.	25
Figura 3.1 - Secagem do ASIC para esquartelamento.	29
Figura 3.2 - Agitador mecânico.	29
Figura 3.3 - Moinho de bolas com capacidade 1kg.	29
Figura 3.4 - Dimensões das partículas granulométrica de ASIC e borracha.	31
Figura 3.5 - Peneiras com suas respectivas malhas; escova de limpeza; desfragmentador de partículas.....	31
Figura 3.6 - Agitação mecânica do material passado na peneira #4mm.	31
Figura 3.7 - Martelo com haste ajustada.	33
Figura 3.8 - Defletômetro com 0.02mm de retração.	36
Figura 3.9 - Molde e provete em embebimento.	36
Figura 3.10 - Retirado do peso do material após rasamento do provete.	36
Figura 3.11 - Molde e provete do CBR após compactação.	36
Figura 3.12 - Execução do ensaio de CBR - Provete sendo penetrado pelo pistão.	37
Figura 3.13 - Propagação horizontal de uma onda P, S e R à superfície.....	41
Figura 3.14 - Movimento das partículas das ondas P.	41
Figura 3.15 - Movimento das partículas da onda S.	41
Figura 3.16 - Acessórios utilizados para realização das leituras de Ondas P e S.	43

Figura 3.17 - Conexões para leitura dos ensaios de ondas sísmicas (Adaptado Amaral et al. 2012).....	44
Figura 3.18 - Conexões para leitura dos ensaios de ondas sísmicas com martelo (Adaptado Amaral et al. 2012.	44
Figura 4.1 - Enquadramento da curva granulométrica do ASIC dentro do fuso proposto pela REFER (2007).....	46
Figura 4.3 - Curva de Compactação com variação de percentagem de borracha.	49
Figura 4.3 - Valor do CBR para variabilidade na percentagem de borracha.	50
Figura 4.4 - Valor do CBR/peso volúmico para variabilidade da percentagem de borracha realizado no teor em água ótimo.	52
Figura 4.5 - Valor do CBR para diferentes teores de borracha e de água.	54
Figura 4.6 - Sinal de transmissão e receção das ondas P. Leituras e resultados dos ensaios de ondas sísmicas.	55
Figura 4.7 - Sinal de transmissão e receção das ondas S. Leituras e resultados dos ensaios de ondas sísmicas.	56
Figura 4.8 - Movimento oscilatório completo de onda sísmica em material composto por ASIC e 2,5% de borracha.	56
Figura 4.10 - Associação do módulo de elasticidade com o teor em borracha.	57
Figura 4.10 - Coeficiente de Poisson para diferentes teores de borracha.....	58
Figura 4.11 - Análise do módulo inicial de elasticidade e CBR para determinada percentagem de borracha.	58
Anexo I - Figura 1 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para material ASIC com teor em água ótimo.	66
Anexo I - Figura 2 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para material ASIC para 2,5% de teor em borracha.	67
Anexo I - Figura 3 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para material ASIC para 5% de teor em borracha	67
Anexo I - Figura 4 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para material ASIC para 7,5% de teor em borracha.	68
Anexo I - Figura 5 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para material ASIC para 10% de teor em borracha.	68
Anexo II - Figura 6 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para composição de ASIC e borracha com 1% do teor em água.....	69
Anexo II - Figura 7 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para composição de ASIC e borracha com 2% do teor em água.....	70
Anexo II - Figura 8 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para composição de ASIC e borracha com 3% do teor em água.....	70

Anexo II - Figura 9 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para composição de ASIC e borracha com 4% do teor em água.....	71
Anexo II - Figura 10 - Curva de forças <i>versus</i> penetração para composição de ASIC e borracha com 5% do teor em água.....	71
Anexo II - Figura 11 - Valores do CBR para cada % de borracha e água (w).	72
Anexo II - Figura 12 - Curva do CBR/Yd para cada determinada percentagem do teor em água (w).	73
Anexo II - Figura 13 - Curva do CBR/Yd para cada determinada percentagem do teor de borracha.	73
Anexo III - Figura 14 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC.	74
Anexo III - Figura 15 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 2,5% de borracha.....	75
Anexo III - Figura 16 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 5% de borracha.	75
Anexo III - Figura 17 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 7,5% de borracha.....	76
Anexo III - Figura 18 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 10% de borracha.....	76
Anexo IV - Figura 19 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC.	77
Anexo IV - Figura 20 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 2,5% de borracha.....	78
Anexo IV - Figura 21 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 5% de borracha.	78
Anexo IV - Figura 22 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 7,5% de borracha.....	79
Anexo IV - Figura 23 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 10% de borracha.....	79

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - CBR para camadas rodoviárias (adaptado de Souza 1981; Manual DNIT 2010)	7
Tabela 2.2 - Índice de CBR para sub-base. (retirado do CE - Estradas de Portugal 2014).....	9
Tabela 2.3 - Enquadramento dos requisitos para material de balastro (Fonte: IP, 2019).....	13
Tabela 2.4 - Parâmetro para material de sub-balastro. (Fonte: Fortunato e Paixão, 2012)....	15
Tabela 2.5 - Definição para camada de sub-balastro (ST 590B - SNCF, 1995) - Adaptado.	16
Tabela 2.6 - Fuso granulométrico para material de sub-balastro. REFER (2007).....	17
Tabela 2.7 - Energia de compactação do ensaio Proctor.	19
Tabela 2.8 - Propriedades físicas para granulado de borracha de 2,0 a 4,0mm - Genan.	25
Tabela 3.1 - Dimensões dos moldes de CBR.	32
Tabela 3.2 - Exemplo de leituras obtidas no defletómetro do anel em função da penetração do pistão no solo, do tempo e do peso aplicado.	38
Tabela 3.3 - Anel dinamométrico nº 13574 com capacidade máxima de 2200 kg. Força aplicada para unidade de divisão.	39
Tabela 3.4 - Anel dinamométrico nº 1155-13-19538 com capacidade máxima de 5000 kg. Força aplicada para unidade de divisão.	39
Tabela 4.1 - Quadro comparativo entre ensaios de caracterização do material ASIC. *Peso volúmico seco a partir do Proctor modificado.	46
Tabela 4.2 - Percentagem do material ASIC e borracha utilizado para realização dos provetes dos ensaios de Proctor, CBR e das curvas granulométricas.	47
Tabela 4.3 - Resultados dos parâmetros da distribuição granulométrica para o ASIC em mm.	48
Tabela 4.4 - Comparativo de resultados com requisito da IT.GEO.006	48
Tabela 4.5 - Correspondência entre CBR e qualidade do material (adaptado de <i>Manual de Implantação Básica de Rodovia</i> - DNIT 2010).....	51
Tabela 4.6 - Parâmetros alcançados a partir da correlação dos resultados das ondas P e S. ..	57

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas e símbolos

ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ASIC	Agregado Siderúrgico Inerte para Construção
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
Cc	Coeficiente de curvatura
CEN	Comité Europeu de Normalização
CTPL	<i>Centre Technique et de Promotion des Laitiers Siderurgiques</i>
Cu	Coeficiente de uniformidade
D	Diâmetro máximo das partículas
D ₁₀	Diâmetro efetivo - 10% da massa passante
D ₃₀	Diâmetro efetivo - 30% da massa passante
D ₅₀	Diâmetro médio - 50% da massa passante
D ₆₀	Diâmetro efetivo - 60% da massa passante
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Índice de vazios
E ₀	Módulo de deformabilidade Elástico
ECP	Ensaio de carga em placa
EN	Estrada Nacional
EUROSLAG	<i>European Slag Association/ The European Association representing metallurgical slag producers and processors</i>
FEA	Forno Elétrico a Arco
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FI	Índice de achatamento
G	Módulo de distorção
GB	Granulado de Borracha
G ₀	Módulo de distorção máximo / Módulo de cisalhamento máximo
IP	Índice de Plasticidade
IP	Infraestruturas de Portugal
ISC	Índice Suporte Califórnia
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
K	Permeabilidade
LA	Coeficiente de Los Angeles
LabGeo	Laboratório de Geotecnia
LL	Limite de Liquidez

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Limite de Plasticidade
MDE	Coeficiente Micro-Deval húmido
Mt	Milhões de toneladas
n	Parâmetro para compactidade máxima
NP	Norma Portuguesa
PDL	Penetrómetro dinâmico leve
PIB	Produto Interno Bruto
R	Onda Rayleigh
REFER	Rede Ferroviária Nacional
T	Período
SCPT	<i>Seismic Cone Penetration Testing</i>
SFS	<i>Steel Furnace Slag</i>
SNCF	<i>Société nationale des chemins de fer français</i>
TGV	Trem de Alta Velocidade
TQI	<i>Track Quality Index</i>
v	Coeficiente de Poisson
VAM	Valor azul de metileno
VAc	Azul de metileno corrigido
Vp	Ondas Primárias
Vs	Ondas Secundárias
w	Teor em água
Yd	Peso volúmico seco
Y ₀	Deflexão máxima

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento

Desenvolvida no âmbito do Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), a elaboração desta dissertação tem como foco parametrizar características físicas, mecânicas e o comportamento da mescla de subprodutos de aciaria com borracha reciclada, nomeadamente em infraestruturas de caminhos de ferro e rodovias, com o objectivo de obter maior sensibilidade e informação sobre produtos em fim do ciclo de vida, dando ao seu uso novas funções.

O tema em questão possui vantagens e interesse que abrangem largamente a área da engenharia, permitindo: i) reduzir a quantidade de subprodutos industriais em fim de vida; ii) diminuir os custos na execução e produção das infraestruturas dos caminhos de ferro e rodovias, evitando o consumo de matérias-primas naturais; iii) impulsionar a reciclagem de materiais; iv) reduzir o impacto no ambiente, promovendo a eficiência de recursos e a economia circular. Todos esses motivos estimularam e despertaram grande interesse para o desenvolvimento deste estudo.

O desenvolvimento de um país está atrelado às infraestruturas, visto que existe a necessidade logística para escoamento de produtos, *commodities*, mobilidade de pessoas e bens que garantem o constante crescimento e oportunidades de construções de pontes, túneis, viadutos, estações e linhas. Para os países exportadores, melhores infraestruturas permitem a redução dos custos de transportes das *commodities*, aumento do Produto Interno Bruto (PIB) e um maior desenvolvimento socioeconómico.

A ferrovia tem um papel importante quando se trata da logística de *commodities* com alta densidade e longos trajetos, enquanto as rodovias são mais apropriadas para escoamento de materiais com menor peso volumico ou para distâncias reduzidas. Entretanto, muitas vezes não é possível viabilizar projetos de infraestruturas devido à escassez de materiais necessários para a construção da via. Proporcionar soluções e buscar novos meios e materiais que enquadram as construções de vias de comunicações nem sempre é fácil, mas é necessário.

De qualquer forma, as implementações de novos caminhos de ferro demonstram a importância e a contribuição que o transporte ferroviário tem sobre a economia e o crescimento de um país.

Seja para transporte de passageiros ou de *commodities*, a ferrovia é uma via de comunicação que tem menores custos no transporte quanto maior a distância, flexibilidade para terminais próximos da fonte de produção, além de ser adequada para matérias com alta densidade, mas com baixo valor agregado e ter eficiência em energia preservando o ambiente.

A mescla de escória de aciaria - material amplamente utilizado em camadas de rodovias e ferrovias nos últimos 20 anos - e resíduos de borrachas provenientes na sua maior parte de pneus pode ser uma alternativa para utilização das camadas de pavimentos das vias. Ambos materiais são produzidos e utilizados em grande escala e tendem ao crescimento nos próximos anos.

A produção de agregados é a matéria-prima mais utilizada no mundo depois da água e do ar, cerca de 1kg de agregado é consumido por habitante a cada hora. Na União Europeia, as médias anuais de consumo batem 6 ton/pessoa. Destes, a maior parte é destinada à construção civil (Dayrell, 2013). Por exemplo, a construção de 1 metro de ferrovia para trem de alta velocidade (TGV) consome até 9 toneladas de agregados.

Desta forma, a utilização de subprodutos industriais em substituição de agregados naturais melhora a eficiência de recursos, uma vez que são aplicados os conceitos de economia circular.

A Economia Circular é um sistema de produção sustentável que envolve integralmente a cadeia de valor. O processo inicia-se na extração de matérias-primas que em seguida é encaminhado para o processo de fabrico e designer. A seguir, o produto é levado para a distribuição e, posteriormente, para consumo, onde terá a fase de uso, reuso e reparos antes de ser coletados (WEF, 2014; EMF, 2013).

Após a coleta, o produto passa por uma seleção na qual são realizadas determinadas preparações com o objectivo de reciclar o material coletado tornando-se matéria-prima para outro produto ou um produto semelhante ao anterior. Assim, é possível obter matérias-primas de forma responsável, a distribuição recorre a menos transportes e menos poluentes, os resíduos são recuperados por reciclagem e utilizados como matéria-prima de outros produtos.

Desta maneira, todos os produtos são destinados a nova utilização de forma circular. Esse círculo permite ter uma maior redução nos impactos causados no globo por ação humana, com benefícios económicos, ambientais, estendendo a vida útil dos produtos, impulsionando a reciclagem, fortalecendo e preservando o futuro do planeta.

1.2 - Objectivos

1.1.1 - Objectivo Geral

O principal objectivo deste trabalho consiste em permitir a utilização de subprodutos industriais de aciaria e resíduos de borrachas em camadas de sub-balastro ferroviário, leito de pavimento, ou bases e sub-bases de pavimentos rodoviários sem comprometer o desempenho dessas camadas. Isto implica estudar as suas características viabilizando a sua utilização em ferrovias e rodovias, atendendo aos regulamentos, normas técnicas e classificações.

Para definir se esses subprodutos se aplicam a essas normas, é necessário a realização de estudos, através de ensaios convencionais existentes e não-convencionais para comparar e parametrizar o material em estudo agregando uma maior sensibilidade para engenheiros, técnicos, projetistas e todas as entidades que necessitam de parâmetros que sejam condizentes e propícios para uso, atendendo às normas vigentes, os procedimentos e fases de execução.

Para a aplicação desses materiais, é importante ter o domínio, a sensibilidade e as características bem definidas de forma a promover a sua incorporação nas estruturas férreas e rodoviárias. Daí a importância de caracterizar e o conhecimento das propriedades mecânicas e físicas dos subprodutos industriais de aciaria.

No entanto, a incorporação de subprodutos industriais em obras de engenharia sem comprometer a sua qualidade ou seu desempenho ao longo da sua vida útil requer um esforço da Engenharia Civil para adaptar as atuais normas, incluindo parâmetros e critérios de dimensionamento a estes novos materiais. Isto será fundamental para a implementação de soluções mais sustentáveis e com maior eficiência na gestão dos materiais, especialmente relevantes em obras lineares com utilização intensiva de agregados.

1.1.2 - Objectivos Específicos

Este trabalho pretende avaliar algumas características mecânicas de uma escória de aciaria estabilizada e certificada e suas misturas com granulado de borracha proveniente de pneus em fim de vida. Para esse efeito são realizados ensaios de compactação, ensaios CBR e ensaios para determinação da velocidade de propagação das ondas sísmicas.

O objectivo é determinar para cada mistura escória com adição de borracha o peso volúmico seco máximo em função do teor em água, o índice de CBR e o módulo de deformabilidade elástico.

Para o peso volúmico seco máximo (Y_d), foram realizados ensaios de compactação Proctor que permitiram avaliar para cada percentagem de borracha e teor em água (w) a curva de compactação do material.

Os ensaios de California Bearing Ratio (CBR), foi realizado conforme a norma do Departamento Nacional de Estrada e Rodagem - DNER 049/94.

Foram realizadas leituras dos ensaios de ondas, através da medição de velocidade de propagação das ondas sísmicas. O módulo de deformabilidade elástico (E_0) foi correlacionado com os resultados obtidos nas leituras. Complementarmente foi avaliado o módulo de distorção inicial (G_0) e o coeficiente de Poisson (ν).

Capítulo 2

Aplicação de Subprodutos Industriais em Infraestruturas de Transporte

2.1 - Introdução

Este capítulo refere-se às infraestruturas dos transportes ferroviários e rodoviários. Em um primeiro momento, é feita a definição da subestrutura da via de comunicação, apresentando as camadas componentes e sua função estrutural. Em seguida, são expostos os tipos de ensaios e normas requeridas para execução e implementação das camadas do pavimento, com foco no sub-balastro e na sub-base, camadas de estudo em questão. Por fim, aborda-se a utilização e aplicação da mistura do material Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) e borracha.

As vias de comunicações estão assentes sobre o terreno natural, sendo constituídas por várias camadas até ao nível de rolamento. Essas camadas devem ser estruturadas num sistema adequado para receber determinadas cargas que são pré-estabelecidas, dependendo da destinação da via, das cargas que serão impostas e das deformações. Por isso, as constituições dessas camadas devem ter as características necessárias para dissipar a energia produzida pelos carris e rodas dos carros de modo a conservar a perenidade e estabilidade da estrutura (Fortunato, 2005).

Além de viabilizar o deslocamento entre passageiros, produtos e materiais, é necessário que a estrutura ferroviária seja capaz de suportar efeitos de intempéries, não causar desgastes excessivos, não causar alto nível de ruído e, no caso das rodovias, ter também boa aderência e possibilitar o escoamento das águas.

No caso da ferrovia o balastro, sub-balastro e leito sob o efeito do tráfego, cargas, fatores climáticos e do ar ambiente, sofrem deformações causando mudanças no índice de qualidade da pista *Track Quality Index* (TQI) (Phanyakit; Satiennam, 2018).

A instabilidade da subestrutura pode ser causada por solos poucos competentes, que apresentam características não adequadas para o fim a que se destinam. Dentre muitos outros fatores, a espessura das camadas rodoferroviárias até as superestruturas, método construtivo e qualidade do material aplicado contribui para o resultado final de toda a estrutura.

Os materiais aplicados nas camadas de infraestruturas de transporte devem seguir requisitos mínimos de geometria (dimensão da camada, granulometria, partículas finas, finos, formas da partícula, comprimentos das partículas); propriedades físicas (resistência à fragmentação - Los Angeles - e desgastes - Micro Deval); nas propriedades mecânicas do material, nomeadamente, deformações, permeabilidades, ângulos de atrito, módulo cisalhante, resiliência e durabilidade; e propriedades químicas de acordo com a Norma Europeia 13450 (CEN, 2005).

Adicionalmente, com base na REFER (2007), é fundamental que o processo de fabrico obedeça às regras e que cumpra com o controlo de qualidade do material.

Para o dimensionamento das infraestruturas de rodovias e ferrovias, é importante ter o conhecimento das características mecânicas do pavimento, nomeadamente, Módulo de Distorção

Máximo (G_0), devido às tensões impostas na via férrea; o Módulo de Elasticidade (E), que é utilizado como parâmetro de rigidez do material; e o coeficiente de Poisson (ν), onde frequentemente adotam-se valores pré-estabelecidos de acordo com cada material, por não ter grande influência no comportamento da estrutura, mas que é necessário para o dimensionamento.

Sabendo dessa necessidade, no capítulo 4 são apresentados os resultados do módulo de deformabilidade e o Poisson para a mistura do ASIC com várias de percentagem de borracha.

Apesar da semelhança, as infraestruturas ferroviárias e rodoviárias possuem distintas características mecânicas e nomenclaturas para cada camada. Nas ferrovias, a estrutura é dividida em subestruturas e superestruturas. Já as subestruturas estão relacionadas com as camadas inferiores - faixa de rolamento (rodovias) e dos carris e dormentes (ferrovias) - constituídas por materiais granulares. Esta estrutura assemelha-se às camadas de pavimentos rodoviários em relação às suas características, mas com nomenclatura distinta.

Para melhor compreensão do assunto, no subtópico a seguir são mencionadas as características e nomenclaturas das infraestruturas ferroviárias e rodoviárias. No entanto, como já mencionado anteriormente, o objectivo principal deste trabalho é o estudo da mistura de subprodutos industriais de aciaria e borracha aplicado às camadas de sub-balastro e sub-base, ferrovia e rodovia respetivamente, pelo que o foco será reservado a esses dois tipos de camadas. a esses dois tipos de camadas.

2.2 - Estrutura de uma Infraestrutura de Transporte

2.1.1 - Camadas constituintes - Infraestruturas Rodoviárias

O pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por camadas sobrepostas com diferentes materiais, espessuras variáveis e finitas, sustentado pelo terreno natural ou por um solo selecionado em casos especiais em que a qualidade do material existente é inferior às necessidades do projeto inicial.

Cada camada possui suas características e funções que devem desempenhar as necessidades mínimas para satisfazer o dimensionamento e implementação da via. Logo, é importante que o projeto atenda itens básicos para a segurança e a vida útil do pavimento, tais como (DNIT, 2010a; 2010b):

- Ter estrutura forte;
- Suportar os efeitos do mau tempo;
- Permitir deslocamento suave;
- Não causar desgaste excessivo dos pneus e alto nível de ruídos;
- Resistir ao desgaste;
- Ter boa resistência a derrapagens;
- Permitir o escoamento das águas (drenagem adequada).

O pavimento está associado à sua avaliação estrutural e funcional. Enquanto o primeiro compreende os parâmetros e qualidades para o uso dos utentes na via, tais como: manutenção do carro, segurança, despesas de combustíveis e desgastes de pneus e travões, sob outra perspetiva, uma via funcional deve levar em consideração os custos com manutenção, os limitadores de velocidade, patologias causadas ao longo da via, entre outros requisitos que limitam a vida útil do pavimento e que necessitam de constante reabilitação (Brito et al, 2009).

2.2.1.1 - Regularização ou Fundação

No caso de a pavimentação ser executada sobre um leito antigo de estrada de terra, é certo que a superfície desse leito se apresentará irregular, não satisfazendo assim às condições de forma impostas ao pavimento. Nesses casos de terrenos com topografia irregular, é necessário fazer o nivelamento deste solo, deixando o terreno propício para o recebimento das camadas sobrepostas (Senço, 1997).

A regularização é a camada mais profunda do pavimento e, a depender de cada manual, normas, guias técnicos e autores, pode ser denominada por fundação, leito do pavimento ou regularização do subleito.

É uma camada composta por solos granulares, finos e aterro que estão presentes no terreno. Terrenos que contenham vegetação orgânica, solos contaminados, resíduos impróprios devem ser removidos antes de executar qualquer atividade com o solo.

Por poder constituir diferentes tipos de materiais que vão depender da região, do solo e do terreno, muitas das vezes, a regularização pode ser dispensada e realizada junto ao subleito. Isso é bastante comum em terrenos com solos suficientemente competentes que atendam aos requisitos básicos do subleito, e a camada passa a ser denominada por regularização do subleito.

A regularização do subleito não deve exceder cortes e aterros superiores a 20cm. Em casos de espessuras superiores, deve proceder à execução das atividades antes da regularização do subleito (DNIT, 1997).

2.2.1.2 - Subleito e Reforço do Subleito

O reforço do subleito é a camada sobreposta acima da regularização quando necessário, com propriedades superiores à regularização. Quando a camada de regularização não atinge qualidade indicada por norma ou projeto, é selecionada uma camada que pode ser tratada com cal, cimentos e ligantes que contribuem para melhor suporte da fundação.

O reforço do subleito é executado normalmente em estruturas espessas resultantes de fundação de má qualidade ou tráfego de cargas muito pesadas, ou de ambos os fatores combinados. Desta maneira, algumas condições mínimas de qualidade devem ser atendidas, por exemplo, California Bearing Ratio (CBR), Índice de Plasticidade (IP), e Limite de Liquidez (LL) (Senço, 1997).

A estabilização granulométrica do reforço de subleito tem influência direta na espessura da camada superior. Por isso, nos casos em que a sub-base possui uma espessura elevada - na maioria dos casos acima de 20cm devido ao fraco desempenho e capacidade de suporte da fundação -, o reforço quando regularizado e devidamente compactado, permite reduzir a espessura da sub-base.

Conforme preconiza o caderno de encargos da Estradas de Portugal 2014, a plataforma de apoio - camada de leito do pavimento - deve atender as especificações geométrica da plataforma. Para retas, a superfície da plataforma necessita de ter inclinações transversais de 2.5% e em curvas será definida em projeto.

2.2.1.3 - Sub-base

A sub-base é a camada intermediária entre o subleito e a base. Possui funções semelhantes à base, dentre elas, absorver e dissipar a carga recebida pelos estratos superiores (base e revestimento), reduzindo as tensões e deformações que são aplicadas pela ação do tráfego. Pois suas cargas, são transmitidas para as funções de forma homogênea e menos intensa, através das camadas de sub-base e base (DNIT, 2010a).

A camada de sub-base é constituída por material britado da pedra muitas vezes não selecionado do tipo *tout venant*. Devido à granulometria extensa e ao material, quando compactada, fornece um solo rígido e estável, ideal para complemento e suporte para base nas situações em que, por circunstâncias técnicas e económicas, não for aconselhável a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito (Senço, 1997).

É muito importante que essa camada tenha sistema drenante adequado, a fim de escoar toda percolação de água que pode ascender das camadas inferiores. Por isso, é comum a utilização de geotêxteis para evitar que a ascensão da água não atinja a base. Em muitos casos, o defeito funcional de um pavimento, nomeadamente, depressão, trilhas de rodas (rodeiras) e corrugação, é causado devido ao enfraquecimento do solo por capilaridade da água que envolve a sub-base e subleito, que perdem suas características resistentes e deformam-se (Domingues, 1993).

Outro fator considerável é a compressão vertical que origina bolbos de tensões quando aplicada à carga no pavimento, refletindo diretamente nas características de deformabilidade da camada subjacente (Fortunato, 2005).

De acordo com as especificações de serviços do DNIT, as camadas de sub-base devem respeitar um *California Bearing Ratio* (CBR) superior a 20%, expansibilidade menor que 1%, determinados através dos ensaios de compactação e do CBR (Tabela 2.1).

Camada	CBR (%)
Subleito	≥ 2
Reforço de Subleito	$\geq$ Subleito
Sub-base	≥ 20
Base	≥ 60 quando $N < 10^6$
	≥ 80 quando $N > 10^6$

Tabela 2.1 - CBR para camadas rodoviárias (adaptado de Souza 1981; Manual DNIT 2010)

Outro fator arbitrário para estimar a capacidade de suporte do material e pode ser obtida a partir do Índice de Grupo (IG). O IG é um parâmetro calculado com base nas características granulométricas de um solo, e leva em consideração: percentagem de material passante na peneira #200 (F); limite de liquidez (LL); e índice de plasticidade (IP).

Esta especificações de solos são definidos pelo Manual do DNIT (2006) e pela “Highway Research Board” HRB, que para determinado IG apontam para grupo de solos. De modo geral, os solos granulares apresentam IG entre 0 e 4, siltes entre 1 e 12, e para argilas entre 1 e 20.

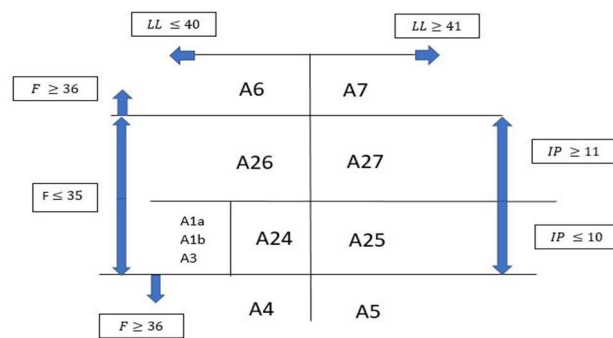


Figura 2.1 - Esquema de classificação de grupos de solos

Os materiais que apresentam escala próxima de 20 são considerados materiais argilosos com baixa qualidade para aplicação nas rodovias; em outro extremo, materiais com índice igual a 0 são materiais basicamente granulares com excelente qualidade para aplicação e que são solicitados para as composições de bases e sub-bases.

Conforme o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal 2014, as sub-bases devem atender do Proctor Modificado um índice de CBR igual a 20% ou superior, além de outros requisitos apresentados na Tabela 2.2.

Quadro 14.03.1a: Camadas não ligadas - Requisitos/Propriedades dos solos seleccionados					
Requisitos / Propriedades	Referência normativa	Unidade	Camada de sub-base	Camada de regularização, enchimento bermas	Camada de desgaste, camadas traficadas não revestidas
			Rubrica 14.03.1.1.1	Rubrica 14.03.1.4.1	Rubrica 14.03.1.5.1
Generalidades	-	-	Solos de boa qualidade, isentos de detritos, matéria orgânica ou quaisquer outras substâncias nocivas		
Dimensão máxima	LNEC E 196	mm	75	50 e 2/3 espessura camada	
Percentagem material que passa no peneiro n.º 200 ASTM, máxima	LNEC E 196	%	15	10 a 20	
Limite liquidez, máximo	NP 143	%	25	35	
Limite plasticidade, máximo	NP 143	%	6	6 a 10	
Valor de equivalente de areia, mínimo	LNEC E 199	%	30	NR	
Valor de azul de metileno (material dimensão inferior a 75 µm, máximo)	AFNOR 18-592	-	1,5		
CBR 95 % compactação relativa (Proctor Modificado), mínimo	LNEC E198	%	20		
Expansibilidade (ensaio CBR), máxima	NF P94-078	%	1,5		
NR – Não Requerido.					

Tabela 2.2 – Índice de CBR para sub-base. (retirado do CE – Estradas de Portugal 2014)

2.2.1.4 - Base

A camada de base é subjacente ao revestimento. É uma camada puramente estrutural assim como a sub-base, tendo que absorver a maior parte dos esforços verticais que são provenientes dos veículos e, por isso, tem a necessidade de ser constituída principalmente por materiais britados de alta resistência.

A camada de base tem por função aliviar a tensão nas camadas inferiores, não permitir infiltração de água e resistir às tensões e deformações atuantes, sendo que a tensão máxima de cisalhamento ocorre nesta camada (Silva, 2008).

Segundo Knapton (1976), a base precisa ser impermeável ou pouco permeável para evitar que a penetração da água não danifique prematuramente o sistema do pavimento.

Portanto, a estrutura do pavimento deve atenuar as cargas que são recebidas pela acção do tráfego local, distribuídas nas camadas subjacentes, não permitindo deformações - devido às tensões verticais - ao longo de cada estrato. Ainda é evidenciado que as cargas nas camadas inferiores devem ser minimizadas, pois as características mecânicas de cada material constituído

nas camadas são inferiores na medida em que a profundidade em relação à faixa de rolamento é aumentada.

Com a intenção de reduzir essas deformabilidades, a camada de base atualmente é composta por materiais granulares selecionados, adequados para exercer a função, e é comumente utilizado ligantes hidráulicos e betuminosos para elevar a resistência e sustentar aos carregamentos elevados.

2.2.1.5 - Revestimento

O revestimento asfáltico é a camada superior em contacto direto com tráfego de veículos, meio ambiente, sob forte exposição a intempéries, chuvas e ação humana. É uma superfície que exige atenção na sua implementação e deve-se atender aos procedimentos e regulamentos de acordo com as normas locais de implementação da via.

É destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores que apresentam especificações menos qualificadas de acordo com o avanço da profundidade. Para além, o revestimento deve ser provido de ligantes asfálticos com intuito de proteger a percolação da água para os estratos inferiores, dar vazão à água e manter o pavimento seco.

As camadas inferiores podem ser classificadas como a fundação estrutural do pavimento. Não existe regra geral de quantidade de camadas para a fundação, podem ser constituídas apenas de base e subleito, ou apenas base; ou também por base, sub-base e subleito como geralmente ocorre. Portanto, para uma via, ou caminho, ser considerada como pavimento é necessário se ter uma fundação ou regularização (Figura 2.2) - mesmo que seja o próprio subleito - e um revestimento, nem que seja primário (como cascalhamento) (Balbo, 2007; Minhoto, 2005).

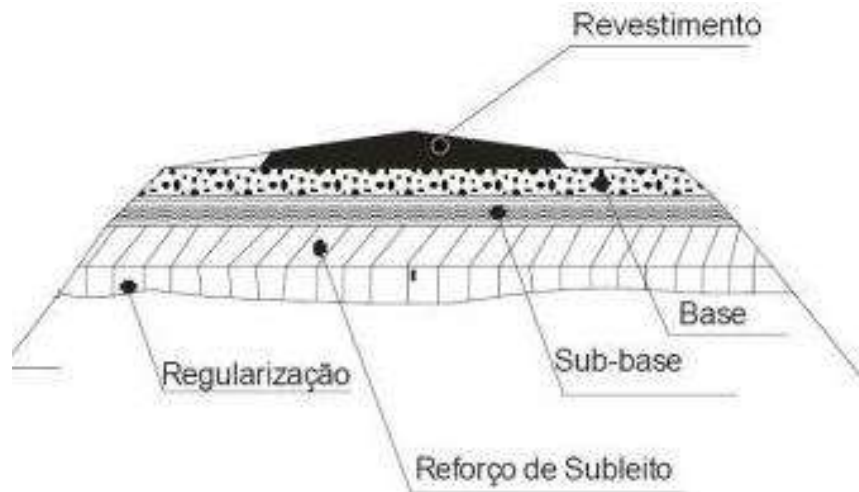


Figura 2.2 - Composição do Pavimento (DNIT, 2006, p.106 - Adaptado)

2.1.2 - Camadas constituintes - Infraestruturas Ferroviárias

2.2.2.1 - Aterro / terreno natural

O aterro ou terreno natural, é a superfície de fundação onde ficam apoiados o sub-balastro e o balastro. Esta superfície condiciona o dimensionamento das camadas ferroviárias e pertence à

plataforma (Figura 2.2Figura 2.3). Por se tratar de um terreno natural exposto a ações climáticas, nem sempre detém as características necessárias para a sua utilização e, por vezes, deverá substituir, ou promover o melhoramento do solo para determinada qualidade e desempenho da via.

A plataforma tem funções de suportar tensões pelas cargas dos solos adjacentes (carga estática) e das cargas cíclicas dos comboios (cargas dinâmicas), sem atingir a rotura e deformações excessivas; deverá resistir ao atrito e aos desgastes produzidos pelas camadas adjacentes; e ser protegida para não sofrer com os ciclos de pluviosidade e perder suas características.

2.2.2.2 - Camada de Coroamento ou Leito

Quando os solos não atingem os valores mínimos para a capacidade de suporte de projeto, o mesmo deve ser reforçado com novos materiais com qualidade superiores à do solo presente. Essa melhoria é realizada ao nível da plataforma que pode ser denominada de camada de coroamento. A melhoria dos solos tem o objectivo de atingir maior capacidade de suporte previamente estabelecida em projetos e está localizada abaixo do sub-balastro (Figura 2.3).

2.2.2.3 - Sub-balastro

O sub-balastro é uma ou várias camadas de adaptação entre o balastro e a plataforma (Figura 2.3), composta usualmente por cascalho com granulometria extensa. Tem o objectivo de contribuir para melhor distribuição das cargas que são transmitidas pelo balastro e tem relevância na redução de vibrações. Esta camada, por estar logo abaixo do balastro, tem a importante função de limitar as eventuais deformações verticais do balastro, distribuindo as tensões ao longo do eixo transversal e longitudinal. Para que isso aconteça, é interessante que a camada tenha módulo de deformabilidade elevado e pouca permeabilidade (Fortunato, 2005). Durante sua implementação, a camada inferior é inclinada transversalmente em direção aos dispositivos de drenagem longitudinais para evitar áreas de retenção de água na plataforma, prejudiciais ao seu levantamento. Protege da contaminação do solo entre o balastro e a plataforma, serve de proteção para geadas, além de assegurar o comportamento da via para manutenção e reduzir substancialmente o risco de erosões na plataforma de terraplenagem e contaminação do balastro.

Para cumprir as funções acima mencionadas, o material deve atender aos requisitos mínimos em conformidade com a finalidade pretendida e durabilidade.

Para o dimensionamento da camada de sub-balastro, é importante levar em consideração a espessura do balastro ferroviário, as condições hidrológicas, as características do solo da camada da plataforma, para evitar que o solo subjacente não seja contaminado, e o clima. Em locais adversos com solos com fracas características mecânicas, contaminados ou até mesmo para a proteção da camada, é comum a utilização de geomembranas e geotêxteis que vão impermeabilizar e prevenir o contacto entre plataforma e sub-balastro criando uma película.

A periodicidade de manutenção dos trabalhos na reabilitação da superestrutura, da subestrutura e de drenagem propiciam maior durabilidade do sistema de infraestrutura. A realização da conservação e reabilitação de forma apropriada, pode elevar a camada de sub-balastro e plataforma na ordem de 100 anos (Fortunato, 2005).

Devido à maior permeabilidade do balastro, a inclinação do sub-balastro deve ser tanto que a água atingida tenha possibilidade de percolar para os elementos drenantes. Estudos realizados por

Ore (1983), constatam que inclinações transversais com 4% podem resultar em um escoamento de 80% da água para drenos longitudinais. Por isso a importância, em alguns casos, da aplicação de geotêxtil entre camadas para impedir a infiltração de água em camadas sensíveis.

2.2.2.4 - *Balastro*

A última camada da via-férrea é denominada de balastro (Figura 2.3). Por receber diretamente as cargas dos carris, tem características superiores a qualquer outro tipo de camada, cujas funções são: suportar toda estrutura (dormentes, travessas, carris), sem alteração da geometria; ter elasticidade e travamento necessários para amortecer as cargas e evitar deslocamentos longitudinais e transversais da via-férrea; serve de camada drenante devido à granulometria do material aplicado; e, quando necessário, permite corrigir eventuais defeitos de geometria (IP, 2019).

As inclinações da via, quer em secção abaulada quer em secção de superelevação, são realizadas em camadas diferentes para as rodovias e ferrovias. Na primeira, de modo a evitar aquaplanagem e escoamento da água para o bordo onde são localizados os drenos longitudinais, a inclinação na pista inicia-se nas camadas de terraplenagem e se desenvolve até a última camada de base. Usualmente, o declive da secção transversal compreende entre 1 a 3%, a depender do revestimento da capa rolante e superelevação máxima de 10% (DNIT, 2010b).

Nas ferrovias as características da bitola, consoante a distância entre carris e do balastro, através da diferença entre cotas da fila baixa para fila alta, e o peso dos comboios, definem a superelevação máxima e mínima da via. Esta superelevação é realizada na camada do balastro ferroviário e não em todas as camadas, como nas rodovias. Nas ferrovias brasileiras, a superelevação recomendada e usualmente utilizada por Valec (2011), Nabais (2014) e Paiva (2016) são 10% da bitola em milímetros.

O comportamento do balastro impacta diretamente na durabilidade e na manutenção de toda a via, desse modo, os requisitos técnicos para a implementação e recuperação da via devem ser balizados no âmbito das diferentes tipologias de intervenções que serão previstas.

Assim como em todas as camadas de uma via, é importante que esta possua requisitos técnicos mínimos e padronizados para sua aplicação. Tal como citado anteriormente, os principais requisitos levam em consideração geometria, granulometria, forma dos grãos, ensaios de abrasão e desgaste. As propriedades físicas, mecânicas e características técnicas a considerar para o balastro são apresentadas a seguir na Tabela 2.3.

De acordo com as especificações técnicas da Infraestruturas de Portugal GR.IT.VIA.015 (IP, 2019), para implementação da via o fornecimento de balastro novo pode ser de dois tipos: Tipo I - utilizados em vias convencionais e de alta velocidade ($V > 220 \text{ km/h}$), ou balastro Tipo II - aplicado apenas em vias convencionais.

Características técnicas		Valores limite do balastro conforme	Valores limite do balastro não conforme	
			Acetatação condicionada	Rejeição
Dimensão		d = 31,5 mm e D = 50 mm	n.a.	n.a.
Granulometria	Peneiros (mm)	Acumulados que passam (Ac) (%)	Acumulados que passam (Ac) (%)	Acumulados que passam (Ac) (%)
	80	Ac = 100	Ac ≠ 100	Ac ≠ 100
	63	Ac = 100	Ac ≠ 100	Ac ≠ 100
	50	$70 \leq Ac \leq 99$	$65 \leq Ac < 70$ e $Ac > 99$	$Ac < 65$
	40	$30 \leq Ac \leq 65$	$25 \leq Ac < 30$ e $65 < Ac \leq 70$	$Ac < 25$ e $Ac > 70$
	31,5	$1 \leq Ac \leq 25$	$25 < Ac \leq 30$	$Ac > 30$
	22,4	$Ac \leq 3$	$3 < Ac \leq 8$	$Ac > 8$
Partículas finas (Pf) (%)		$Pf \leq 0,6$	$0,6 < Pf \leq 1,2$	$Pf > 1,2$
Finos (F) (%)		$F \leq 0,5$	$0,5 < F \leq 1$	$F > 1$
Forma	Índice de achatamento (FI) (%)	$FI \leq 15$	$15 < FI \leq 30$	$FI > 30$
	Índice de forma (SI) (%)	$SI \leq 10$	$10 < SI \leq 20$	$SI > 20$
	Comprimento (C) (%)	$C \leq 4$	$4 < C \leq 8$	$C > 8$
Los Angeles (LA) (%)	Tipo I	$LA \leq 16$	$16 < LA \leq 19$	$LA > 19$
	Tipo II	$LA \leq 20$	$20 < LA \leq 23$	$LA > 23$
Micro-Deval (MDE) (%)	Tipo I	$MDE \leq 7$	$7 < MDE \leq 8$	$MDE > 8$
	Tipo II	$MDE \leq 11$	$11 < MDE \leq 13$	$MDE > 13$
Sulfato de magnésio (MS) (%)		$MS \leq 5$	n.a.	$MS > 5$
Elementos prejudiciais (%)		ELPR = 0	$0 < ELPR \leq 3$	$ELPR > 3$

Tabela 2.3 - Enquadramento dos requisitos para material de balastro (Fonte: IP, 2019).

2.2.2.5 - Superestrutura da via

Os carris estão dispostos em duas linhas paralelas para fornecer uma superfície imutável, contínua e nivelada para o movimento dos comboios. Para resistir às tensões, eles são feitos de aço de alto carbono. O atrito entre a roda de aço e carril de aço é cerca de um quinto do atrito entre o pneu pneumático e uma estrada de metal (Sadio, 2013). Os carris servem de guia lateral para as rodas, suportam as tensões desenvolvidas devido às cargas verticais que lhes são transmitidas, através dos eixos e rodas do material circulante, bem como às travagens e às forças térmicas. Adicionalmente, desempenham a função de transmitir a carga para uma grande área da formação através dos dormentes e do balastro.

As tensões verticais das composições aplicadas nos carris são transmitidas para as travessas que, por sua vez, estão assentadas nas camadas de apoio. Essas solicitações nas camadas de apoio podem ser reduzidas quanto maior a rigidez de flexão dos carris, proporcionando distribuir as cargas em maior quantidade de travessas (Fortunato 2005).

Sob as camadas de apoio são assentes as travessas, elemento de ligação que dá suporte aos carregamentos provenientes dos carris e distribuem para o balastro (Figura 2.3). Para além dos esforços verticais, as travessas precisam ser suficientemente capazes de suportar as tensões recebidas das fixações e proibir o deslocamento na vertical, longitudinal e transversal. Em função disso, as travessas são basicamente de madeira ou betão armado, por serem materiais que dispõem de resistência mecânica adequada para tal fim.

As fixações são elementos de ligação que promovem apoio adequado entre carris e travessas. Suas características vão depender do tipo de travessas implementadas. Por vezes, são utilizadas estroncas para sua ligação.

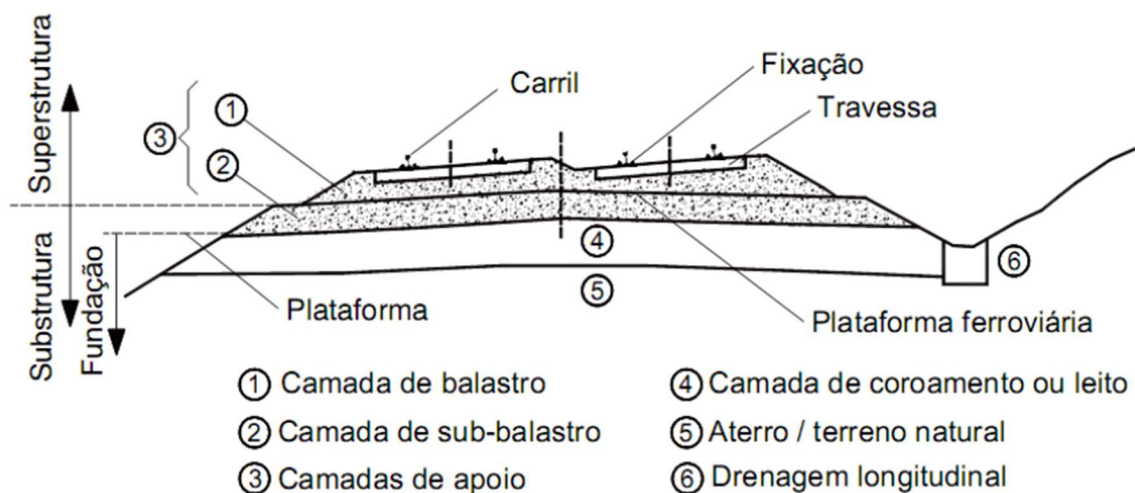


Figura 2.3 - Camadas que constituem a plataforma (Fonte: Fortunato et al, 2012).

2.3 - Ensaios para as camadas de sub-base e sub-balastro

2.3.1 - Introdução

Apesar dos parâmetros utilizados para a camada de fundação das infraestruturas de transporte serem feitos por ensaios correntes, nem sempre estes possuem os mesmos requisitos para todos os locais.

No que respeita à camada de sub-balastro, nomeadamente, os ensaios correntes adotados para caracterização do material, podemos separar em métodos *in situ* que permitem ter resultados imediatos ou ensaios laboratoriais.

Para caracterização das propriedades do solo, é comumente realizado em campo; ensaios de carga em placa (ECP) para avaliação do módulo de deformabilidade do solo; penetrômetro dinâmico leve (PDL) para determinação de resistência e nível d'água; gamadensímetro e garra de areia para avaliar o grau de compactação, método *speedy* quando necessário saber de imediato o teor em água do solo, dentre muitos outros ensaios que podem ser utilizados, adequando-se a cada tipo de solo, localização, custos e exatidão dos resultados.

Por outro lado, alguns ensaios devido à sua complexidade, morosidade, manuseio, equipamento ou tempo, devem ser feitos em laboratórios. Desta forma, é comumente realizado: ensaios de análise granulométrica que deve ser enquadrado no fuso granulométrico do Caderno de Encargos da obra; neste seguimento, o valor de azul metileno possibilita determinar a qualidade e quantidade de finos existente na amostra; a permeabilidade do material após compactação, os coeficientes de Micro-Deval e abrasão Los Angeles para parametrizar a resistência mecânica e os índices de forma das partículas.

Todos os ensaios realizados quer em campo, quer em laboratório, necessitam estar enquadrados em requisitos mínimos que atendam a empregabilidade para o fim a que se destina.

Com base na Tabela 2.4 extraída de Fortunato e Paixão, são apresentados valores mínimos para utilização de material de sub-balastro para cada tipo de parâmetro.

Parâmetros	Unidades	ITGEO006
Coeficiente de Los Angeles (LA)	%	≤25
Coeficiente Micro-Deval húmido (MDE)	%	≤18
LA+MDE	%	<40
Azul de metileno corrigido (VAc)	g/kg	<1
Permeabilidade (K)	m/s	<1,0E-6
Coeficiente de uniformidade (Cu)	-	Cu ≥ 6
Coeficiente de curvatura (Cc)	-	1 ≤ Cc ≤ 3
Índice de achatamento (FI)	%	≤20

Tabela 2.4 - Parâmetro para material de sub-balastro. (Fonte: Fortunato e Paixão, 2012)

Conforme a norma francesa (STB-590B), o critério mecânico para selecionar uma camada inferior é estabelecido por sua granulometria, resistência, dureza, valor de azul metileno e propriedade mecânica (Tabela 2.5). Apesar de todas as camadas possuírem especificidades para o tipo de material, os critérios atribuídos para o sub-balastro podem variar de acordo com a velocidade dos comboios, realçando a importância dessa camada dentro da subestrutura.

Podemos citar em particular o critério de “resistência” de Los Angeles acrescido de Micro-Deval fixado em 40 para as linhas superior 160 km/h e a 50 para linhas de baixa velocidade. Esses valores indicam a qualidade mecânica dos materiais utilizados nas estruturas ferroviárias.

	balastro	Sub-balastro		Sub-leito
		V > 160 km/h	V < 160 km/h	
Resistência (Los Angeles + Deval)	≤ 20	≤ 40	≤ 50	≤ 60
Granulometria	31,5/63	0/31,5	0/31,5	≤ 20
Forma	≤ 10	≤ 25		≤ 25
Valor Azul Metileno		≤ 1		≤ 2

Tabela 2.5 - Definição para camada de sub-balastro (ST 590B - SNCF, 1995) - Adaptado.

Salienta-se que, porventura, cada norma compreende os seus próprios procedimentos, e os requisitos mínimos necessários podem ser alterados. Podemos citar, por exemplo, ensaio de carga em placa, nomeadamente, na norma francesa (AFNOR NF P94-117-1) e a alemã (DIN 18134), que devido aos processos divergentes na condução dos ensaios registam ao final valores distintos.

Como o alvo principal do estudo é o comportamento da escória de aciaria associado à borracha, a seguir serão demonstrados os pontos principais e o método convencional, conforme as normas brasileiras (DNER 080/94; DNER 049/94; DNIT 172/2006-ME) para os ensaios da análise granulométrica e do CBR de um material para sub-balastro ferroviário realizado neste estudo. Isso não deve ser impedimento para outros ensaios quer no âmbito da caracterização, quer em propriedades mecânicas, físicas e químicas do material em estudo e que permitam resultados incisivos e determinantes para compreender o comportamento do material.

No Capítulo 3 são expostos os procedimentos adotados em laboratórios para a caracterização do material adequando as normas do DNER 041/94, o processo do ensaio de compactação, CBR, ondas sísmicas e seus respetivos equipamentos.

2.3.2 - Análise Granulométrica

O estudo dos diâmetros equivalentes dos grãos permite realizar a verificação das frações constituintes dentro de faixas predeterminadas, conforme norma a ser aplicada.

O ensaio da análise granulométrica tem como princípio caracterizar e classificar uma porção do solo mediante sua forma e tamanho. Este é realizado através do peneiramento em malhas com diferentes tamanhos e, em caso de grãos com partículas finas, é realizada a sedimentação.

A percentagem de material passante ou retido nas peneiras e seu diâmetro proporciona a distribuição granulométrica, a qual é apresentada num gráfico em escala logarítmica permitindo determinar diversos parâmetros do solo.

Com base na Instrução Técnica que refere a características técnicas do sub-balastro nº 006 REFER (2007), os requisitos para a camada de sub-balastro incluem a origem e natureza do material; a qualidade dos finos determinada pelo valor de azul metileno (VAM), forma das partículas, resistência mecânica e permeabilidade. A utilização do agregado para sub-balastro deverá ser bem graduada, cumprindo os requisitos da Tabela 2.4 e da Tabela 2.5.

De acordo com a Tabela 2.6, a percentagem de finos passados na peneira de #0,063 mm para sub-balastro não deve ser superior a 8% e todo o material tem que passar na peneira de #40. O coeficiente de uniformidade para a faixa granulométrica precisa ser igual ou superior a 6 (medianamente uniforme) e coeficiente de curvatura entre 1 e 3 representando solos bem graduados.

Fuso granulométrico do sub-balastro	
Peneiro	% que passa (em peso)
40	100
31,5	90-100
20	70-90
16	62-85
8	46-66
4	32-52
2	24-40
0,5	11-24
0,25	8-19
0,063	4-8

Tabela 2.6 - Fuso granulométrico para material de sub-balastro. REFER (2007)

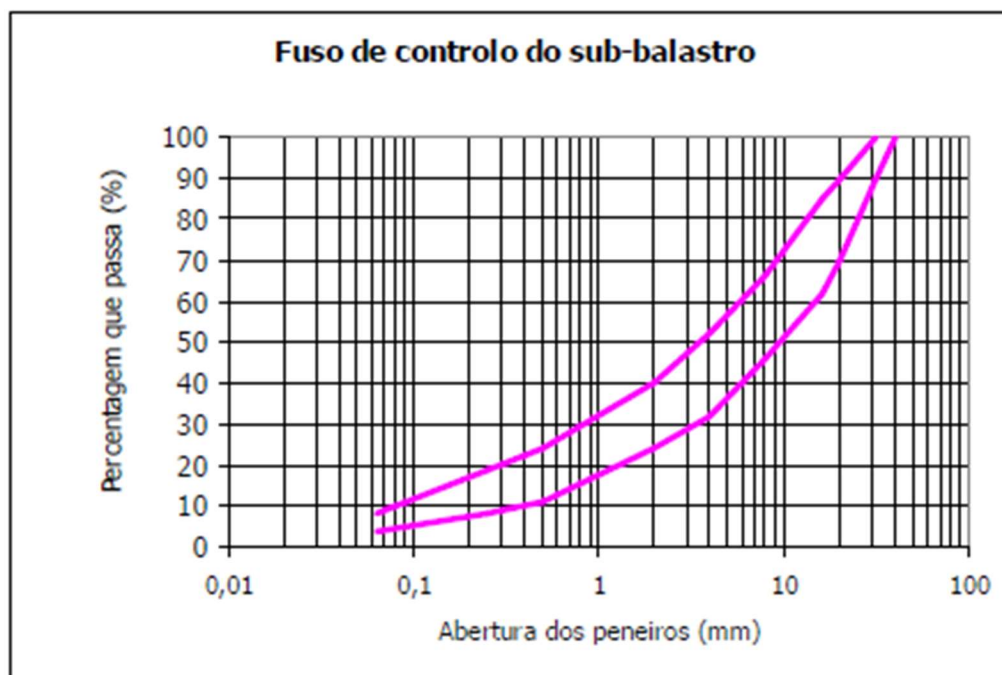


Figura 2.4 - Limites da curva do fuso granulométrico. Refer (2007)

Através da curva de distribuição granulométrica é possível identificar o diâmetro efetivo (D_{10}), que determina o diâmetro de 10% da amostra de solo que passa nas peneiras e é utilizado para avaliar a drenagem do solo e condutividade hidráulica. Sucessivamente, é possível determinar o D_{30} e D_{60} com 30% e 60% do material passado. O D_{10} é um indicativo de permeabilidade do material, quanto maior seu valor maior será a permeabilidade.

O Coeficiente de Uniformidade (C_u) é a razão entre D_{60} e D_{10} , para definir a regularidade do material. C_u com valores inferiores a 5 são considerados uniformes, entre 5 e 15 uniformidade média e superior a 15 não uniforme.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.1)$$

O Coeficiente de Curvatura dos solos mede a graduação, baseado no D_{30} , D_{60} e D_{10} . Assim solos que apresentam valores entre 1 e 3 são bem graduados e superior a 3, mal graduados.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (2.2)$$

Um solo quando bem graduado, ou seja, composto de partículas com dimensões de todos os tamanhos, apresenta uma escala alongada, composta por materiais finos (*silt*) até os agregados de dimensões superiores.

Para classificação e identificação das frações argilosas, é realizado em laboratório ensaio de azul metileno. Este tem por objectivo determinar a capacidade que o material fino da amostra tem de absorver azul metileno e medir a quantidade da fração argilosa do solo em estudo. Os resultados do ensaio de azul metileno servem de base para as camadas de sub-balastro que necessitam de permeabilidade para o escoamento da água.

A quantidade de solo fino na amostra será proporcional a absorção de azul metileno, ou seja, quanto maior absorção mais argiloso o solo tende a ser. As superfícies específicas das partículas estão ligadas ao valor de azul metileno do solo.

2.3.3 - Ensaio de Compactação Proctor

A compactação do solo tem por objectivo aumentar os parâmetros de resistência, reduzir a deformabilidade e melhorar as características de permeabilidade. Mediante a compressão do solo haverá uma expulsão de ar nos poros e consequentemente uma redução no índice de vazio da amostra. Ou seja, o ensaio de compactação permite compactar determinado solo pela diminuição de ar incorporado no mesmo e ter um efetivo controlo de qualidade em relação aos solos compactados.

A quantidade de golpes e a energia de compactação imposta no provete, promove as curvas de compactação. Como é previsível, a curva de compactação será diferente para solo com mesmas características e energias de compactações variadas. A massa específica aparente seca será tanto maior quanto for a energia de compactação, desde que tenha redução da humidade para não romper o solo e permanecer nivelado com o teor em água ótimo.

Os números de golpes realizados por camada definem a energia de compactação aplicada. De modo geral, quanto maior for aplicada a energia de compactação, maior será a densidade seca e menor a humidade.

A escolha da energia a ser compactada, corresponde a energia que vai ser utilizada em campo e de acordo com o equipamento disponível. Via de regra, em aterros e plataformas que necessitam maiores compactações utiliza-se energia de compactação elevada. O Proctor Modificado é utilizado para camadas que estão mais próximas do rolamento, ou seja, para as camadas superiores do pavimento, enquanto o Proctor Intermediário é utilizado para camadas que possuem materiais menos bons, materiais este que eventualmente compactados com Proctor Modificado podem surgir

problemas, geralmente este controlo de compactação se dá em materiais de corpo de aterro (Tabela 2.7).

A NBR 7182/086 preconiza o método de ensaio no Brasil, ao passo que, para os ensaios de Proctor em Portugal, são estabelecidos pela Norma Europeia EN 13286-1.

	Proctor Normal	Proctor Intermediário	Proctor Modificado
Golpes	12	26	55

Tabela 2.7 - Energia de compactação do ensaio Proctor.

2.3.4 - California Bearing Ratio (CBR)

O ensaio de *California Bearing Ratio* foi desenvolvido por O. J. Porter em 1929 e aprimorado pela U.S Corps of Engineers, com objectivo de avaliar o desempenho das estruturas de pavimento e a rotura do subleito das camadas de infraestruturas de transporte na Califórnia, que comumente apresentavam patologias naquela época (Malanconi, 2013). Após sua criação foi amplamente alargado para vários países e contemplam nas principais normas e diversas categorias de dimensionamentos de pavimentos rígidos e flexíveis.

O ensaio consiste em três etapas que, ao final, permite avaliar o índice de capacidade de suporte do solo após compactado e sua expansibilidade. O índice de CBR é o valor principal utilizado para o dimensionamento dos pavimentos, embora a expansibilidade, ainda que não afete diretamente no dimensionamento, deve ser levada em consideração, pois é prejudicial ao pavimento e pode ocasionar patologias irreversíveis, tais como trincas, fissuras e aberturas, agregando maior custos e retrabalho para manutenção da via.

O índice de CBR e a expansibilidade difere para cada camada de aplicação do pavimento e faz-se necessário seguir os manuais de acordo com o sítio de aplicação.

O CBR é determinado de acordo com a pressão exercida para penetrar um pistão com seus respetivos diâmetro e peso padronizados em um provete de solo e a pressão desse mesmo pistão em uma brita graduada padrão.

O principal objectivo do ensaio, é dimensionar as camadas de infraestruturas a depender do CBR do material, protegendo o pavimento contra uma rotura. A resistência perante a penetração no provete advém da resistência do material a coesão e principalmente do angulo de atrito.

Em Portugal o ensaio de CBR é definido pela Norma Portuguesa Europeia 13286-47:2004. A norma do DNIT 172/2016, fixa os procedimentos para determinação do CBR no Brasil.

2.4 - Agregado para camada de sub-balastro

2.4.1 - Escória de aciaria

A cada ano, cerca de 45 milhões de toneladas de escória são geradas na Europa. Nas estatísticas da Euroslag em 2018, a produção de escória de aciaria foi de 15,7 milhões de toneladas, da qual

aproximadamente 70% foram aplicadas para construções rodoviárias, por exemplo, em camadas de base, sub-base e aterros.

O estudo demonstra que no processo de refinamento, ou seja, da retirada das impurezas, 52,7% utilizam do método de conversor de oxigênio, ao passo que em 34,8% são utilizados os fornos elétrico a arco e 12,5% de outras formas.

Os resultados são baseados na produção e uso de escória de vários países da União Europeia. A pesquisa leva em consideração alguns países que não forneceram dados, mas apontam para produção de metal e aço considerável. Os resultados da pesquisa sobre a produção e uso de Escória de Aciaria Forno (SFS do inglês *Steel Furnace Slag*) em 2018 são dados pela Figura 2.5.

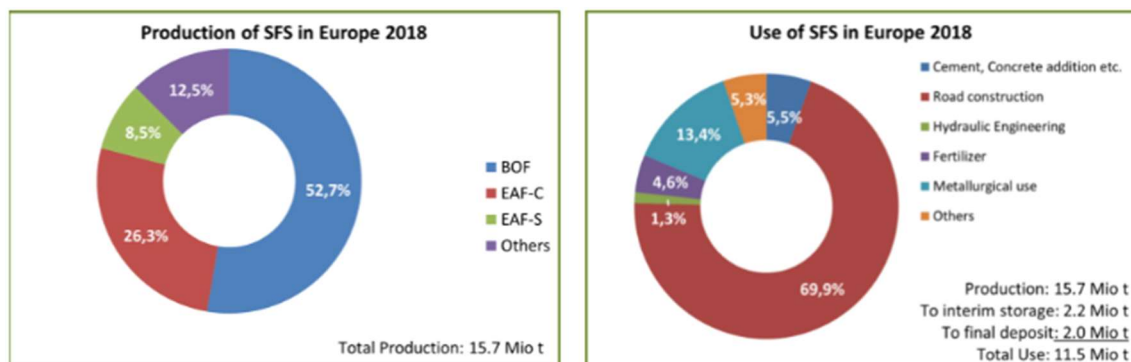


Figura 2.5 - Estatística da Euroslag 2018 referente à produção de Escória de alto forno na União Europeia.

O aço é um material metálico constituído de ferro e pequena percentagem de carbono, aproximadamente 0,2%. Comumente são submetidos em três etapas: processo de redução; refino e conformação mecânica.

Há dois processos de redução. O alto forno e arcos elétricos, que produzem o ferro gusa, ou por redução direta, que produz ferro-esponja.

A produção do aço é feita a partir do minério de ferro, sendo o Brasil um dos países com recursos abundantes desta matéria-prima. A produção do aço na América Latina totalizou 5,294 milhões de toneladas (Mt) no mês de novembro, sendo o mês de maior produção no ano de 2020, grande parte produzida no Brasil (ABM, 2021).

No processo de redução, o minério de ferro é elevado a temperaturas próximas de 1500°C, onde recebe sua forma líquida, denominada de ferro gusa. O ferro gusa é o principal produto após o derretimento e retirada do oxigênio do minério de ferro (Figura 2.6).

O ferro gusa é o material utilizado para o fabrico dos produtos finais em aço. Esses produtos - tais como, telhas, bobinas, chapas, perfis, barras de aço, entre outros - devem atender a determinadas especificações e exigências conforme cada tipo de elemento fabricado.

A obtenção do ferro gusa se dá por um processo de extração do minério de ferro que, em seguida, adiciona-se óxido de cálcio, carvão - ou coque em caso de produção em grande escala - e ar pré aquecido, como exemplificado na Figura 2.6.

A reação química dos elementos incorporados permite produzir o monóxido de carbono, sendo este o agente redutor do processo de produção de ferro gusa. A fusão dos materiais acontece após a combustão do carvão e ar quente.

Em razão da combustão proveniente dos elementos adicionados e às impurezas do minério de ferro, é factível separar o líquido (material fundido) das escórias, visto que as densidades dos

materiais são distintas. Depois da separação, o material fundido segue o processo de fabrico do aço e as escórias de aciaria são conduzidas à etapa de resfriamento.

O processo de resfriamento das escórias é fundamental para o produto final a ser utilizado. O método utilizado para ao resfriamento das escórias de aciaria, irá definir e caracterizar os diferentes tipos de produto que se deseja alcançar (ZEGHICHI, 2006).

As escórias são um excelente produto que pode ser utilizado desde o início do processo de fabrico. Logo após a separação do ferro gusa, no processo de resfriamento, é possível aproveitar a energia térmica do material; é muito utilizado na agricultura para corretivo de solo ou agente de micronutriente; ou como material de construção com a mesclas em betão, fundações, construção civil, pavimentos e misturas asfálticas (CTPL, 2016; 2020).

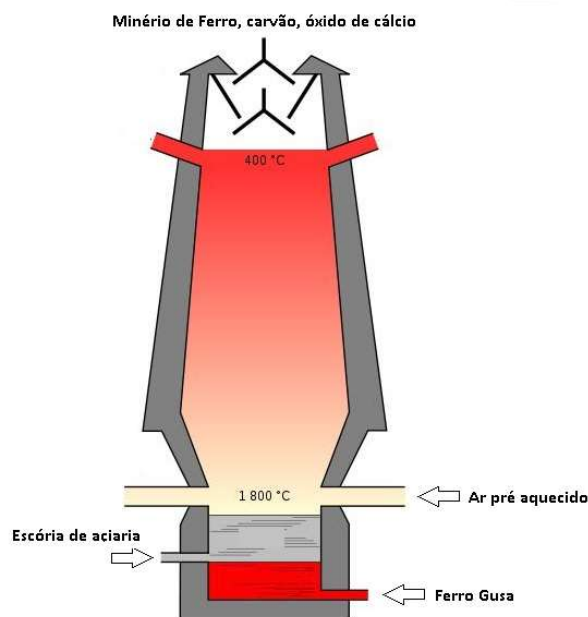


Figura 2.6 - Ilustração do processo de obtenção de escória de aço em alto forno. Adaptado de <https://www.geowiki.fr/index.php?title=Fours>.

Em Portugal, onde a matéria-prima para o fabrico de aço é escassa, os materiais ferrosos são reciclados e direcionadas para a Siderúrgica Nacional, que está instalada no Seixal - próximo de Lisboa - e na Maia - próximo da cidade do Porto. Estas são as duas fábricas que produzem o aço através de Fornos Elétrico a Arco (FEA). Estrategicamente localizada na região sul e norte de Portugal continental, a Siderúrgica Nacional recebe constantemente sucatas que refundem todo material reciclado, com uma capacidade instalada de mais de 3 milhões de toneladas.

Uma técnica muito eficiente e que a cada dia vem a ganhar espaço para a fundição de metais é a utilização de enormes arcos elétricos que recebem a deposição de materiais ferrosos e derretem em temperaturas que chegam a 5000°C.

Funcionando como um reator, o FEA tem capacidade de transformar a partir da reciclagem de resíduos que contenha aço, por exemplo, perfis, vigas e sucatas metálicas, em um novo aço de alta qualidade.

Com mais de 100 anos após sua criação o FEA permite reciclar infinitas vezes o aço sem este perder suas propriedades intrínsecas e, por isso, a reciclagem de sucata de aço reduz

significativamente os problemas ambientais. O Forno Elétrico representa uma produção de aproximadamente 28% do aço mundial.

Quando comparado à produção de aço de forma reciclada com o método tradicional do minério de ferro, as vantagens em termos de impactos ambientais são muitos reduzidas. Para cada tonelada de aço produzido a partir da reciclagem, o mesmo gera uma economia de 740kg de carvão mineral e 1.400kg de minério de ferro. Além disso, é possível chegar a reduzir a emissão em 1,5 toneladas de dióxido de carbono, diminuindo o impacto gerado por gases de efeito estufa (GERDAU, 2019).

Desde o início do Século XX, estima-se que foram recicladas mais de 25 mil milhões de toneladas de sucatas de aço. Isso pode gerar cerca de 38 mil milhões de toneladas na redução de emissão em dióxido de carbono, reduzir a 35 mil milhões de toneladas em minério de ferro e 18 mil milhões de carvão.

Estima-se que cerca de 25 bilhões de toneladas de sucata foram recicladas desde 1900. Isso representa uma redução do uso de cerca de 35 bilhões de toneladas de minério de ferro, 18 bilhões de carvão e redução de emissão de 38 bilhões de toneladas de CO₂ (Worldsteel Association, s.d.).

No decorrer do processo é realizado sob altas temperaturas a fundição do aço, quando em fornos mais modernos, muitas vezes são auxiliados por lanças de oxigênio, queimadores a gás e injetores de carbono que fornecem energia adicional por meio de reações químicas.

Após o processo de fusão é adicionado elementos que ajustam a composição química e as especificações exigidas do produto final.

A injeção de oxigênio após o processo de fusão, permitir separar a escória do material líquido. A inserção de carbono nesta etapa, faz-se a desoxidação do banho e a espumação da escória de aciaria, que é retirada pela porta de escória (Figura 2.7).

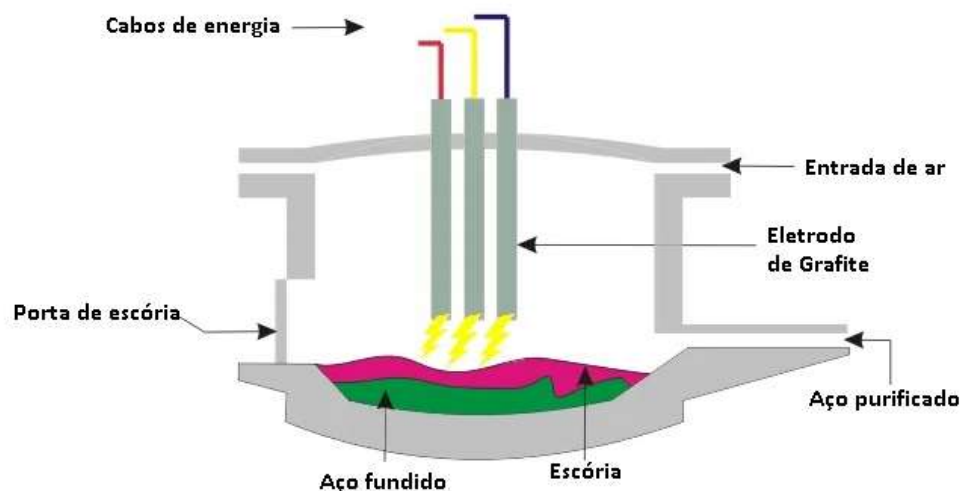


Figura 2.7 - Forno Elétrico. Adaptado de <https://www.electrical4u.com/electric-furnace/>.

Através de longos anos de estudos realizado por vários autores, ensaios laboratoriais e aplicações em rodovias e ferrovias em Portugal, a escoria de aciaria apresentou resultados tão satisfatórios que levou a ganhar certificado com a Marca CE por norma EN 13242, denominado de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC). O material depois de passar por etapas de

acondicionamento, triagem, lavagem, britagem, é processado artificialmente e utilizado na construção.

Nos ensaios realizados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em 2007 o ASIC foi utilizado aterro em troço de via-férrea na zona do Seixal, onde apresentou módulo de deformabilidade superior ao projeto para a camada de aterro e do leito. Na Estrada Nacional (EN) 311, após avaliação com defletómetros de impactos pesados o comportamento mecânico do material apresentou resultado positivo com deflexões inferiores em relação ao troço de comparação com saibro, com assentamentos do aterro praticamente nulos. Em análise realizada no mesmo estudo, a percentagem de lixiviado apresentada é baixa, demonstrando que o material é inerte e não deteriora o solo. Ainda o ASIC demonstrou ser um produto com resistência a fragmentação em 21% e resultados de 11% para o ensaio de Micro-Deval, satisfazendo as necessidades mínimas de aplicações nas infraestruturas (Fortunato et al, 2018).

Estudos são realizados e publicados constantemente em vários países demonstrando que a escoria de aciaria para a construção tem-se revelado ser uma excelente solução técnica, principalmente nas vias infraestruturas devido a sua capacidade de suporte para a estrutura, permitindo o reaproveitamento do material que ficaria em desuso.

Os estudos realizados validaram o uso de escórias em ferrovias com ensaios de campo, concluindo que elas aumentam a rigidez, estabilidade, capacidade e durabilidade das ferrovias, assim diminuindo a frequência de manutenções e as operações de renovação da via. Recentemente, Delgado (2019; 2019a; 2019b) ampliou estes estudos com vista a aplicação do ASIC em balastro ferroviário, verificando que esse possui maior tendência para estabilização das deformações permanentes sob elevado número de ciclos e maior módulo resiliente, quando comparado com um agregado granítico.

A escoria possui características técnicas adequadas aos altos níveis de exigência de projeto, com custos na maioria das vezes compatíveis com o previsto para obra. Para além, sua utilização em grande escala contribui de maneira significativa para conservação do meio ambiente, uma vez que a escória, é o processo de resíduos siderúrgicos de indústrias locais e que atualmente soma um volume aproximado de 6 milhões de toneladas (Delgado, 2019a).

Devido as exigências técnicas de melhoramento, do manuseamento, aprimoramento das fábricas e do processo de fabrico do aço, os subprodutos de aciaria ao longo dos anos tem ganhado espaço no mercado. Esta evolução garantiu um melhor produto no final do processo elevando as propriedades físicas e mecânicas de diferentes ensaios, consequentemente, permitindo ampliar sua aplicabilidade e utilização final de acordo com as especificações necessária para cada tipo de camada da infraestrutura ferroviária e rodoviária. Atualmente, o ASIC pode ser usado não apenas como material de aterro, mas também como base e balastro (camadas mais rígidas devidas ação do tráfego).

Com mais de 8 milhões de km², o Brasil é um grande explorador do minério de ferro sendo um dos maiores produtores do mundo, que associado a dimensão territorial pode ser um grande meio para aplicação dos agregados produzidos.

A demasiada extração de minério de ferro no Brasil supostamente permitiria ter muito agregado siderúrgico que poderiam ser lançados para as novas rodovias e ferrovias, ao ponto de viabilizar novas construções de forma económica e sustentável. A utilização dos agregados siderúrgicos mesclado com borracha reciclada - provido das reciclagens de pneus em fim de vida após serem triturados - reforçaria ainda mais na redução dos custos financeiros.

2.4.2 - Granulado de borracha

A borracha pode ser de dois tipos: sintéticas quando são fabricadas a partir do petróleo, e natural, quando é obtido o polímero da seringueira. Na fabricação de artefactos as borrachas sintéticas necessitam de levar uma pequena percentagem de borracha naturais, devido a rachadura que podem vir aparecer com a mudança brusca de temperatura nas sintéticas. No Brasil 70% da borracha é destinado ao fabrico de pneus (Silva, 2011).

De acordo com a resolução de nº 416/2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, para cada pneu novo comercializado os fabricantes devem destinar um pneu irreversível. Isto gerou em 2016 a destinação de aproximadamente 500 mil toneladas de resíduos de borracha no Brasil (Rios et al, 2016).

No relatório “The European tires industry facts and figures 2020” foram comercializados 324 milhões de pneus na União europeia dos quais representam 20% do comercio mundial, enquanto a produção de pneus foi de aproximadamente 6 milhões de toneladas (Delgado et al, 2019b).

Este resíduo para serem comercializados, passam por processos de limpeza e retirada de materiais como arame, ferro, nylon que posteriormente são triturados em frações de acordo com o destino de utilização. O processo de reutilização de borrachas e outros materiais, visam a sustentabilidade e ajudam na economia circular.

A borracha reciclada de pneus em fim de vida é amplamente utilizada em aplicações onde entra em contacto direto com o ambiente natural. Os exemplos mais comuns são o material de enchimento em relvados artificiais e asfalto para construção de rodovias. Inúmeros estudos científicos foram feitos em uma ampla gama de países, analisando o impacto ambiental da borracha reciclada. Uma grande preocupação ambiental tem sido a potencial lixiviação de metais e substâncias químicas orgânicas da borracha reciclada. Entretanto, depois de vários estudos e ensaios, nomeadamente, para utilização em rodovias e ferrovias, nenhuma evidência foi encontrada para apoiar as alegações de que a lixiviação de substâncias causará problemas ambientais ou afetará as propriedades físicas e químicas das infraestruturas ferroviárias (Indraratna et al, 2018).

A holding dinamarquesa Genan, detentora de várias certificações de qualidade e ambiental, tem capacidade de reciclar 25 mil toneladas de pneus ao ano, equivalente a 3,2 milhões de pneus. A borracha que após passar por processo de limpeza e separação, é triturada e utilizado numa ampla gama de subprodutos que são envolvidos na construção civil e engenharia moderna.

Na tabela 3, são fornecidas as características e propriedades físicas, após a transformação de pneus em fim de vida em pó e granulado de borracha. Grande parte da amostra apresentada na distribuição granulométrica da Figura 2.8 está dentro da gama de dimensão de partícula indicada nas propriedades físicas (Tabela 2.8). Os resultados foram realizados com lote de pneus que após triturados foram enquadrados nas malhas de 2,0mm à 4,0mm. Esta mesma granulometria foi utilizada para a confecção dos provetes nos ensaios de CBR deste estudo, que serão apresentados mais à frente.

Propriedades típicas				
Propriedades	Métodos de ensaio	Unidade	Especificação	Valores típicos
Densidade específica	ASTM D1817-05(2016)	kg/m ³	1.100-1.200	1.160
Densidade aparente	EN 1097-3:1998	kg/m ³	455 ±8%	455
Gama de dimensão da partícula	ISO 13322-2:2006	mm	2,0-4,0	2,0-4,0
Teor total do polímero (RCH)	ISO 9924-3:2009	%	≥ 40	45
Teor de cinzas	ISO 9924-3:2009	%	< 15	8
Teor de humidade (Perda: 2h @ 105°C)	ASTM D1509 - 15	%	≤ 1	≤ 1
Teor de metal livre	OA-698; (Note 1)	%	≤ 0,004	≤ 0,002
Teor de fibra têxtil livre	OA-698; (Note 1)	%	≤ 0,002	≤ 0,001
Teor de partículas de borracha coloridas	OA-698; (Note 1)	%	≤ 0,1	< 0,04
Outros contaminantes	OA-698; (Note 1)	%	≤ 0,004	≤ 0,002
Classificação de poeira inalável	EN 15051-2:2013+A1:2016		Very low to low	Very low
PAH 8 REACH	A/PS CS 2019:01 PAK	mg/kg	≤ 20	< 15

Tabela 2.8 - Propriedades físicas para granulado de borracha de 2,0 a 4,0mm - Genan.

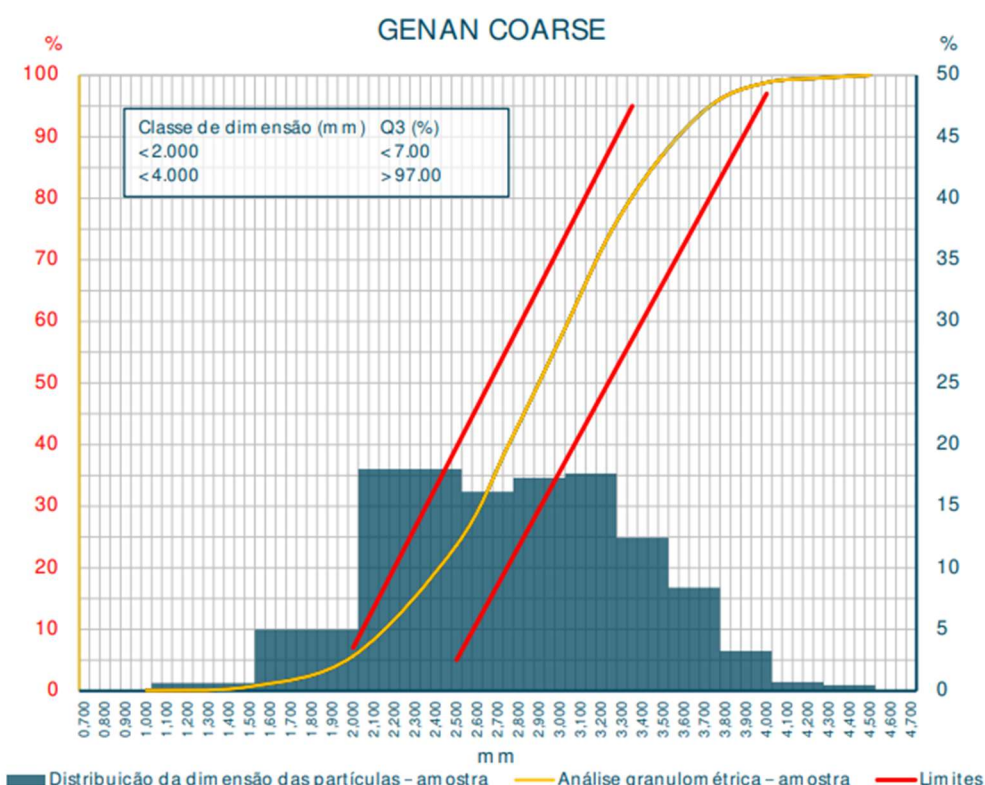


Figura 2.8 - Análise Granulométrica da borracha com dimensões de 2,0 a 4,0mm - Genan.

Ao mesmo tempo que a indústria da borracha cresce com a comercialização na sua maior parte de pneus de automóveis gerando maior resíduo e liberação de CO₂ na camada atmosférica, a conscientização para a reciclagem deste produto ganha espaço no mercado. Há várias formas de poder destinar a utilização dos pneus usados dentre elas para fundações e camadas das ferrovias e rodovias que podem mitigar os ruídos e vibrações destas (Rios et al, 2016).

Em comparação com a incineração de pneus usados em fornos de cimento, a reciclagem de pneus - por meio do processamento em granulado de borracha e aço para substituição de matérias-primas virgens - oferece benefícios ambientais substanciais. Os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida documentam que significativamente menos CO₂ é emitido para a atmosfera e o impacto negativo na acidificação da atmosfera é reduzido. Quando a borracha do pneu é reciclada, o enxofre é contido, não liberando na atmosfera. No entanto, é de suma importância que a borracha

reciclada seja produzida com alta qualidade - e feita de materiais de origem conhecida e consistente (Merlin, 2020).

As relvas sintéticas aplicadas nos campos de futebol europeu, derivam da reciclagem de aproximadamente 40 milhões de pneus em fim de vida. Este processo sustentável reduz a emissão de gás CO₂ em 280,000 toneladas e absorção de aproximadamente 25 mil pneus triturados por campo.

Em estudo encomendado pela Genan e realizado pela Force Technology, foi apurado que a cada tonelada de pneu reciclado ao invés de incinerados, são reduzidos 700 kg de CO₂ (Merlin, 2020).

Os resultados apresentados por Rios et al (2016), que utilizou a mistura de borracha com solo para mitigar ruídos e vibrações das fundações, permitiram concluir que a adição de borracha diminui o módulo de distorção que implica na redução de vibrações e impediu a liquefação do solo.

Além disso, Indraratna et al (2018) verificou que em ensaios realizados com borrachas e escórias em camadas de sub-balastro, à medida que a quantidade de borracha é aumentada na mistura, o coeficiente de permeabilidade aumentou, a quebra de partícula diminuiu, a extensão da energia absorvida aumentou, e a pressão de dilatação diminuída. No entanto, menciona para uma percentagem maior de borracha resulta em redução resistência ao cisalhamento e maior deslocamento axial.

2.5 - Aplicação de ASIC e borracha

A incorporação de Granulado de Borracha (GB) derivado de pneus, em camadas de balastro e sub-balastro com agregados naturais tem-se apresentado como um material promissor para redução de vibrações e ruídos provocados pela passagem dos comboios. Cho et al. (2007), Signes et al. (2017) e Martínez Fernández et al. (2018) realizaram medições laboratoriais e de campo demonstrando uma redução significativa com cerca de 50% do pico médio de aceleração devido à incorporação de borracha.

Existem poucos estudos na literatura sobre o uso de escórias de aciaria e granulado de borracha para camadas de infraestruturas de transporte. Indraratna et al. (2018) realizaram um estudo para sub-balastro com escórias de aciaria, resíduos de carvão e granulado de borracha com partículas até 10 mm, concluindo que a incorporação de borracha permitiu aumentar a permeabilidade, reduzir a quebra das partículas, aumentar a energia absorvida e diminuir a pressão de expansão. No entanto, não foram encontrados estudos com misturas de escórias de aciaria com partículas até 31,5 mm, e granulado de borracha, que requerem sistemas cíclicos com câmaras triaxiais de maior dimensão, reforçando o caráter inovador deste estudo.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 - Metodologias e programa experimental

O uso de agregados de alta qualidade, o cumprimento dos parâmetros de controle de compactação em obra, associado a uma boa definição da espessura das camadas compactadas, permite garantir um bom desempenho das infraestruturas.

Os requisitos para o material granular não ligado da camada de sub-balastro e balastro ferroviário e em camadas de base e sub-base nas rodovias, são geralmente os seguintes: i) propriedades físicas e mecânicas das partículas (ou seja, tamanho e forma dos grãos; ii) resistência mecânica em Los Angeles e ensaios Micro-Deval; iii) propriedades físicas das misturas (distribuição granulométrica, índice de plasticidade); iv) propriedades de compactação (curvas de Proctor e California Bearing Ratio - CBR); vi) propriedades mecânicas e hidráulicas (ângulo de resistência ao cisalhamento, módulo de resiliência, deformação permanente, permeabilidade) (Fortunato, et al., 2012).

Neste estudo foram realizados ensaios para determinação da análise granulométrica do ASIC e para assegurar a manutenção dessa distribuição granulométrica nas várias misturas “ASIC+borracha”. De seguida, foram moldados provetes para ensaios de compactação e CBR seguindo os procedimentos das normas brasileira (DNER 049/94; DNIT 172/2006-ME). Por fim, provetes com várias percentagens de borracha e com teores em água (w) com 4%, foram

submetidos a ensaios de ondas sísmicas que permitiram obter os módulos de distorção (G_0) de cada mistura.

3.2 - Análise granulométrica

A análise granulométrica é realizada através da distribuição de partículas do solo, conforme suas dimensões. O ensaio consiste em determinar em percentagem, o diâmetro das partículas numa quantidade de amostra pré-estabelecida.

Este ensaio possui dois métodos que dependem da dimensão das partículas. Quando o solo possui uma fração de materiais finos, ou seja, inferior a 0,075 mm, estes deverão ser submetidos ao ensaio de sedimentação - ensaio este baseado na lei de Stokes estabelecido pela relação entre o diâmetro da partícula e velocidade de sedimentação - caso contrário, será necessário a realização do ensaio de peneiração.

Os métodos e procedimentos, bem como, as quantidades de amostra podem variar conforme a norma em utilização.

Para avaliar a curva granulométrica do ASIC, foi feita uma secagem prévia, seguindo-se o esquartelamento a partir de dois sacos de 700 kg cada, obtendo-se 80 kg de escória. Essa amostra foi submetida ao processo de peneiramento pelo método de ensaio da norma do DNER-ME 080/94. Na Figura 3.1 é apresentada a secagem prévia da escória.

Entre as malhas de 40mm a 16mm o peneiramento foi realizado por agitação manual, com aproximadamente dois minutos em cada peneira. Para as malhas inferiores a 16mm (peneiras de 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,250; 0,125; 0,063 mm e fundo), utilizou-se um agitador mecânico (Figura 3.2). Devido à quantidade de peneiras o processo de agitação mecânico é estabelecido em 15 minutos por seção, teve a necessidade de ser dividida em duas fases: na 1ª fase com as peneiras de 8 mm à 0,5 mm mais o fundo, e na 2ª fase o material passante na 0,5mm era agitado nas peneiras abaixo de 0,250 mm; 0,125 mm; 0,063 mm e fundo.

Haynes e Yoder (1963) concluíram que para os solos bem graduados que apresentam partículas de dimensões finas acima de 8%, os resultados do peso volúnicos são reduzidos. A análise granulométrica foi definida para verificar se o material se enquadrava no fuso granulométrico preconizado pela REFER (2007) para sub-balastro ferroviário. Pela análise granulométrica constatou-se que o ASIC tinha uma ausência das partículas de menores dimensões, ou seja, a quantidade de material passante na peneira #0,5 mm era tão pequena que necessitava de peneirar um grande volume de material, de modo, a conseguir uma quantidade de finos suficiente para a produção do provetes e realização dos ensaios de Proctor e CBR.

De forma obter a quantidade necessária de partículas finas, utilizou-se o moinho de bolas (Figura 3.3). Este equipamento permitiu reduzir as frações dos grãos de ASIC convencional recebidos de fábrica, e transformar grãos com dimensões de “seixos” em materiais com maior quantidade de finos. Esse processo tinha uma duração aproximada de 12 horas para cada um quilo de ASIC. Ao longo dos experimentos em laboratório foi necessário realizar este procedimento várias vezes.



Figura 3.1 - Secagem do ASIC para esquartelamento.



Figura 3.2 - Agitador mecânico.

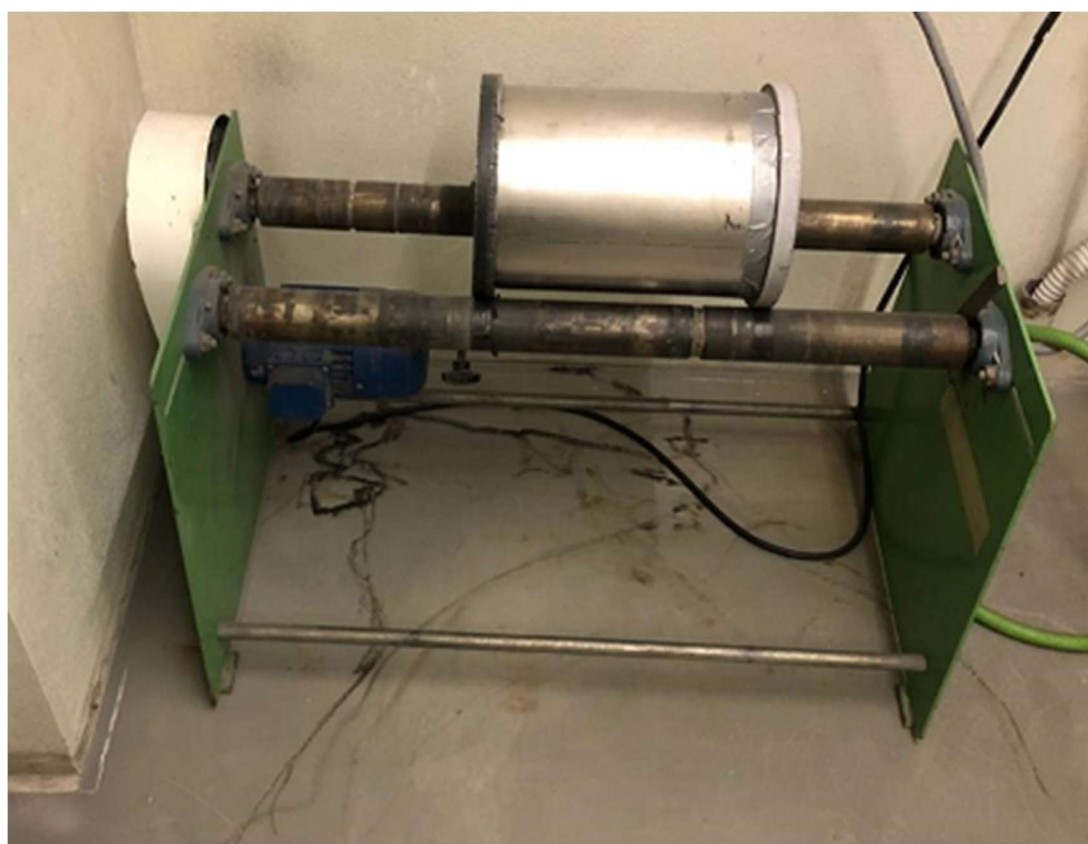


Figura 3.3 - Moinho de bolas com capacidade 1kg.

Thom 1988, realizou ensaios com amostras de calcário dolomítico seco triturado e submeteu a ensaios triaxiais. Desses ensaios resultou uma correlação entre o índice de compacidade e o diâmetro das partículas. Para o calcário dolomítico valores de $n = 0,35$ conduz para o aumento da compacidade. No entanto, deverá levar em consideração a percentagem de materiais finos, pois a quantidade excessiva deste afeta a permeabilidade do material.

Para enquadrar nas normas e obter índice de compacidade elevado, os ensaios para as amostras de ASIC foram realizados com base na equação estabelecida por Thom 1988, relacionando

Conforme demonstrado no capítulo 02, a curva granulométrica proposta para ser utilizada nos ensaios, é próxima a curva prevista nos requisitos da IT.GEO 006 da REFER.

Esta granulometria está suficientemente otimizada para seguir uma curva de máxima compacidade para um material granular de granulometria extensa, conforme a curva granulométrica que fosse semelhante ao proposto por Thom em 1988 com valores de $n=0,35$.

Nos ensaios realizados em laboratório com frações granulométricas do material ASIC, atingiu valores de “ n ” igual a 0,38, estabelecendo proximidade com a relação proposta.

$$p = 100 * \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (3.1)$$

p - Percentagem de material passado na peneira d

D - Diâmetro máximo das partículas

n - Parâmetro para compacidade máxima

A compacidade é um índice que está associado ao peso volúmico seco (Y_d) do material e ao volume de vazios (e), de tal forma que, um elevado índice de compacidade corresponde a um peso volúmico seco próximo do máximo e um índice de vazio próximo do mínimo.

Na Figura 3.4, é apresentada a quantidade de material ASIC e borracha separado por fração granulométrica e, na Figura 3.5, as peneiras utilizadas no agitador mecânico (Figura 3.6) utilizado para separar as dimensões de cada partícula.



Figura 3.4 - Dimensões das partículas granulométrica de ASIC e borracha.



Figura 3.5 - Peneiras com suas respectivas malhas; escova de limpeza; desfragmentador de partículas



Figura 3.6 - Agitação mecânica do material passado na peneira #4mm.

3.3 - Ensaio de compactação Proctor

Após a determinação da curva granulométrica do ASIC, foi definida a curva de compactação Proctor (teor em água “w”, peso volúmico seco, “ γ_d ”).

Para a obtenção da curva de compactação segundo as normas do DNER 049/94; DNIT 172/2006-ME, foi utilizado o material passado na peneira #19mm.

De modo a trabalhar com base na norma do DNIT, neste estudo foi pesado o material retido nas peneiras de #31,5mm e #19mm, e distribuído para as peneiras seguintes, nomeadamente, #4mm, #8mm e #16mm igualmente.

As misturas estudadas incluem o ASIC com 5 percentagens de borracha (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%) para as quais se avaliou a compactação com teores em água de 1%, 2%, 3%, 4% e 5%. Desta forma, foram realizados 30 provetes.

Dos cinco moldes utilizados para o ensaio de compactação, dois foram solicitados ao laboratório do ISEP. Desta maneira, era possível utilizar um molde para cada teor em água.

N.º Molde	1	2	3	4	5
Peso Molde (g)	4454	4452	4485	4399	4320
Peso molde + base (g)	8052	8047	8060	7906	7905
Diâmetro (mm)	152,4	152,31	152,38	152,28	152,3
Área (cm ²)	182,41	182,2	182,37	182,13	182,18
Altura (mm)	114,95	114,95	114,98	115,025	115,38
Volume (cm ³)	2096,77	2094,38	2096,85	2094,92	2101,85

Tabela 3.1 - Dimensões dos moldes de CBR.

Os materiais separados no peneiramento são depositados em baldes contendo suas respectivas frações. Em sequência é feita a pesagem do material para cada fração que é despejado em um tabuleiro pré humedecido e suficientemente adequado para realizar a mistura dos agregados com a borracha. Adiciona-se a percentagem de água predeterminada e homogeneiza-se (Figura 3.4).

Após homogeneização o material é despejado nos moldes (Figura 3.9 e Figura 3.11), em duas camadas. Em seu interior o molde é constituído de uma base removível de 64 mm e por uma alonga de 50 mm. A base serve para dar altura do provete de 115mm e a alonga permite colocar quantidade superior de material antes da compactação sem deixar transbordar. Para evitar o contacto do material com a base removível e minimizar o processo de drenagem durante a compactação, foi colocado uma rodela de papel no fundo do molde antes de colocar o material.

Atendendo a técnica de vibração profunda e simular a vibro compactação realizada por equipamentos em obras (rolos tandem), a compactação dos provetes deu-se por martelo pneumático ligado por uma haste e uma base diametral que foi ajustada especialmente do tamanho do molde para simular a compactação no terreno com equipamento. Na Figura 3.7, é

mostrado o martelo utilizado para compactação da camada do provete. A compactação é realizada durante 1 minuto por camada.



Figura 3.7 - Martelo com haste ajustada.

A compactação foi realizada nos moldes com duas camadas, sendo cada uma compactada com martelo (Figura 3.7) durante 1 minuto.

Para realização da compactação com o martelo foi necessário calibrar o mesmo, de modo que, a energia de compactação fosse similar ao apresentado no Proctor Pesado com 55 pancadas. Consoante a norma do LNEC E-197 - 1966, o ensaio de compactação do Proctor Pesado se dá pelo molde cilíndrico grande com 152 mm de diâmetro interior e 178 mm de altura, podendo ser utilizado como alternativa, moldes com 114 mm de altura. O pilão de compactação pesado, tem 4,54 kg e 457 mm de altura de queda.

Sendo assim, num primeiro momento foi utilizado o molde do Proctor Pesado com mistura de ASIC para realização das 55 pancadas. Para efeito comparativo, a mesma faixa granulométrica, material e teor em água foi compactado no molde com as dimensões 300 mm de altura, em doze camadas com o martelo pneumático. A compactação em doze camadas, provocou resultados de Y_d muito alto e índices de vazios em torno de 0,21, obtendo resultados de Y_d muito superior entre Proctor Pesado e a compactação com martelo. Com objectivo de reduzir a energia de compactação e ter resultados que chegassem próximo dos realizados no Proctor Pesado, foi repetido o ensaio, no entanto, agora as camadas são reduzidas a metade (seis camadas). O peso volúmico seco dos ensaios realizados em divisões de seis camadas e a energia de compactação proveniente do martelo pneumático, atingiram resultados próximos quando comparado com os Proctor Pesado, $28,3 \text{ KN/m}^3$

contra 28 KN/m³. Desta forma, adotou-se para os ensaios de compactação e CBR a utilização do martelo pneumático, que foi menos dispendioso e trouxe mais eficiência e agilidade aos ensaios.

A utilização do martelo pneumático para o material em uso, evita o esmagamento e quebra das partículas que o Proctor pode produzir, pelo fato de ser reproduzido uma série de impacto. Adicionalmente, quando se trata de materiais granulares, estes tem a facilidade de se densificar por métodos de vibração, do que propriamente por imposições de cargas de impacto.

As dimensões dos moldes de ensaios de CBR 114 mm de altura, são aproximadamente três vezes inferiores ao molde na qual, foi realizado o Proctor Pesado. Portanto, nos ensaios de CBR, onde o molde tem altura de 114 mm, as seis camadas realizadas para moldes com 300 mm foram reduzidas a 2, adequando proporcionalmente ao molde em uso.

Com material compactado (Figura 3.11), é retirado a alonga do molde e dá-se início ao processo de rasamento do provete, em outras palavras, retirar o excesso de material que ficou a cota superior ao molde. Esse processo é importante para planar e deixar a superfície do provete o mais lisa possível.

As amostras coletadas para determinação do teor em água eram extraídas da parte superior dos provetes após rasamento. Não foi possível recolher amostras do fundo dos provetes, com intuito de preservá-las e utilizá-las para os ensaios de CBR. As misturas foram recolhidas em duas cápsulas com pesos previamente conhecidos, e pesadas (Figura 3.10). Estes valores foram anotados e utilizados para definir o teor em água. Após a pesagem das cápsulas com material, estas vão para secagem em estufa por 24 horas a 105°C. Conhecido o peso do solo seco e do solo húmido chega-se ao teor em água do material compactado.

3.4 - Ensaio de CBR

Após a definição da curva de compactação, com os mesmos provetes do ensaio do Proctor, foram realizados os ensaios de CBR na prensa. Com exceção do ASIC em que foi realizado o ensaio de CBR com teor em água ótimo, nos provetes com adição de borracha foram feitos ensaios CBR para vários teores em água.

O California Bearing Ratio (CBR) é um dos mais comuns métodos para projetar e avaliar a força de diferentes camadas do pavimento, comparando-as com a resistência de rocha esmagada da Califórnia

O valor CBR é usado para determinar a espessura das camadas do pavimento, também para avaliar a resistência ao cisalhamento e o módulo de rigidez do material. O valor do CBR e as características de compactação são dependentes das dimensões das partículas do material e outras propriedades no caso de solos granulares.

Os resultados das curvas de CBR para todos os ensaios realizados são apresentados nos anexos I e II.

Depois de compactar o material no molde, o disco espaçador de cada provete deverá ser retirado e os moldes devem ser invertidos e fixados nos pratos-base perfurados.

Conforme a norma do DNIT 172/2016, cada provete deverá levar acima da amostra compactada, uma sobrecarga superior 4.536 kg. Nos ensaios, foram utilizados dois anéis por amostra com 2,5 kg cada.

Antes da imersão do molde, é colocado dois anéis sendo um deles em formato de ferradura, com aproximadamente 5000g que representará o peso das camadas superiores do pavimento.

Adapta-se, ainda, na haste de expansão, um defletómetro fixo ao tripé (Figura 3.8), colocado na borda superior do cilindro, destinado a medir as expansões ocorridas, que devem ser anotadas de 24 em 24 horas, em percentagens da altura inicial do corpo de prova. Esses defletómetros são ajustados a escala 0.

Os corpos de prova devem permanecer imersos em água durante 96 horas (quatro dias), conforme Figura 3.9. Esse período de imersão em água, permite averiguar a diferença das leituras efetuadas de 24 em 24 horas e medir a percentagem de expansão relativa à altura inicial do corpo de prova.

Durante o processo de imersão, a água tende a preencher os vazios das amostras pelo que as bolhas de ar começam a sair. Após a expulsão da maior parte das bolhas de ar realiza-se a primeira das cinco leituras no defletómetro.

Durante as 96 horas em que o molde fica embebido na água, são tomadas cinco leituras do defletómetro. A primeira leitura é realizada quando se coloca o molde na água, e depois é realizada uma leitura a cada 24 horas.

Quando o provete retrai a agulha do defletómetro desce, neste caso, o ponteiro do defletómetro que é medido em mm se desloca em sentido anti-horário. Por outro lado, quando o solo expande, ou seja, seus vazios são preenchidos com água, o molde tende a aumentar e o ponteiro do defletómetro agora desloca em sentido horário.



Figura 3.8 - Defletômetro com 0.02mm de retração.



Figura 3.10 - Retirado do peso do material após rasamento do provete.



Figura 3.9 - Molde e provete em embeбimento.



Figura 3.11 - Molde e provete do CBR após compactação.

Após quatro dias de embebedimento, o molde é extraído da caixa de embebedimento e retira-se o excesso da água. Conforme a norma do DNIT 172/2016 - ME, o mesmo é pesado desconsiderando todos os elementos e acessórios do molde, até que se obtenha o peso próprio do provete que agora estará húmido. Após a retirada do peso, o molde e o provete é levado a prensa para iniciar o processo do ensaio de CBR.

A prensa é composta por um anel dinamométrico com defletómetro de precisão de 0.002mm. Esse primeiro defletómetro serve para medir a deformação do anel dinamométrico e para calcular a carga que foi aplicada no provete. Acoplado ao anel dinamométrico está o pistão de penetração em aço, com 4,96 cm de diâmetro e aproximadamente 19 cm de altura.

Na lateral fixada ao pistão, é colocado outro defletómetro com precisão de 0,01 mm com o pino apoiado sobre o molde. Este permitir definir a velocidade de descida da prensa e do cilindro onde está acoplado. Durante o ensaio o pistão é penetrado no provete (Figura 3.12).



Figura 3.12 - Execução do ensaio de CBR - Prova sendo penetrado pelo pistão.

Seguindo a norma do DNIT 172/2016 - ME, após a retirada do provete do embebedimento, este deve ficar 15 minutos para retirar o excesso de água antes de estar preparado para o ensaio na prensa.

O conjunto (prova e molde) é colocado sobre a superfície da prensa que contém uma base circular com 540mm de altura e é ajustado para fazer o assentamento do cilindro metálico de 4,96mm de diâmetro no centro do provete. A sobrecarga colocada no conjunto para o ensaio de expansão (embebedimento), mantém-se durante o ensaio de CBR. O cilindro metálico deve atingir a superfície central do provete aplicando uma carga de aproximadamente, 45N, que

deve ser medida conforme o deslocamento do ponteiro do defletómetro do anel dinamométrico. Antes de iniciar o processo na prensa mecânica, os ponteiros do defletómetro do anel dinamométrico e defletómetro que medem a penetração do pistão no solo voltam a ser posicionados em zero.

A prensa é acionada por um dispositivo e a base circular desloca-se verticalmente em sentido ascendente movendo o conjunto provete + molde sob o pistão. A velocidade da prensa é constante de 1,27mm/min. Por padronização as leituras são consideradas em função da penetração do cilindro no solo por um tempo especificado em norma, conforme Tabela 3.2.

Nos ensaios efetuados, o anel dinamométrico utilizado para os primeiros ensaios atingiu a capacidade máxima (2200 kg) da força aplicado sobre o provete, pois os resultados foram além do expectável. Nos ensaios seguintes, o anel dinamométrico foi alterado por um outro, com capacidade superior ao primeiro (5000 kg). Os parâmetros e carga de cada anel são apresentados na Tabela 3.3 e Tabela 3.4. A Figura 3.12 mostra o anel dinamométrico de maior capacidade (nº anel 1155-13-19538)

Para cada deslocamento do defletómetro em função da penetração do cilindro no solo, é exercido um peso em kg/divisão. Tendo como exemplo na Tabela 3.3, para o deslocamento de 184 divisões do defletómetro são exercidos 200 kg do pistão sobre o solo, o que nos leva a 1.08kg/por cada divisão do defletómetro. Devido à compactação do solo, o peso aplicado por cada divisão do defletómetro é inferior quanto maior for a compressão exercida.

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leituras do defletómetro do anel dinamométrico (mm)	Peso aplicado pelo Pistão (kg)
0,0	0,00	0	0
0,5	0,63	39	42
1,5	1,90	113	123
2,0	2,54	152	165
2,5	3,18	189	205
3,0	3,81	239	258
4,0	5,08	340	366
5,0	6,35	449	481
6,0	7,62	542	580
7,5	9,53	728	777
10,0	12,70	1035	1098
12,5	15,88	1395	1473

Tabela 3.2 - Exemplo de leituras obtidas no defletómetro do anel em função da penetração do pistão no solo, do tempo e do peso aplicado.

Nº Anel	13574	Peso em kg para cada deslocamento de 0,01mm do defletómetro em função da penetração do cilindro no solo.
Compressão	Força	
divisões	Kg	
0	0	0
184	200	1,087
372	400	1,075
561	600	1,070
750	800	1,067
941	1000	1,063
1132	1200	1,060
1324	1400	1,057
1518	1600	1,054
1711	1800	1,052
1907	2000	1,049
2103	2200	1,046

Tabela 3.3 - Anel dinamométrico nº 13574 com capacidade máxima de 2200 kg. Força aplicada para unidade de divisão.

Nº Anel	1155-13-19538	Peso em kg para cada deslocamento de 0,01mm do extensômetro em função da penetração do cilindro no solo.
Compressão	Força	
divisões	Kg	
0	0	4,854
103	500	4,854
206	1000	4,854
309	1500	4,854
412	2000	4,854
515	2500	4,762
620	3000	4,808
724	3500	4,808
828	4000	4,854
931	4500	4,854
1034	5000	4,854

Tabela 3.4 - Anel dinamométrico nº 1155-13-19538 com capacidade máxima de 5000 kg. Força aplicada para unidade de divisão.

3.5 - Ensaio de ondas

As medições sísmicas têm desempenhado um papel particular na engenharia geotécnica por mais de 50 anos. Quando o estado de repouso de um meio elástico é submetido a uma perturbação local, a energia potencial elástica e a energia cinética acumuladas em torno da região perturbada dão origem a ondas que se propagam pelo meio, transportando energia para as restantes regiões (Kausel 2008).

As ondas são qualquer energia que é transmitida pela terra. Essas ondas são importantes para diferenciar as camadas terrestre. No geral as ondas sísmicas são associadas a terremotos

ou explosão. Uma onda é definida como uma perturbação que viaja no meio e transporta energia (Doyle 1995).

As ondas podem ser classificadas por dois tipos: ondas de superfície e ondas volúmicas.

As ondas de superfície como o nome já diz, são ondas que se propagam na superfície de algo. Há dois tipos de ondas de superfície, as ondas Love e ondas Rayleigh.

Enquanto as ondas Rayleigh se propaga na superfície de cima para baixo, as ondas Love fazem um movimento transversal ao eixo de propagação, da esquerda para direita (a depender do lado em que é feita a ação). Em ambos os casos, o movimento da onda de superfície tem direção perpendicular ao movimento, sendo assim, muitas vezes denominadas de ondas transversais.

As ondas volúmicas, são utilizadas para compreender a estrutura da terra, fundo de oceano, caracterização do solo rochoso e interações solo-estrutura-solo. Muito difundido nos últimos anos, as medições sísmicas têm desempenhado um papel particular na engenharia geotécnica. Elas podem ser de dois tipos: as ondas Primárias (P) ou ondas Secundárias (S). Essas são ondas onde, a energia é transferida de um corpo para o outro, ou seja, não se move apenas pela superfície.

O sentido da ação dinâmica no elemento, vai reproduzir a característica da onda. Uma batida numa rocha em direção longitudinal, vai transmitir energia para as moléculas adjacentes, que irão transmitir para as próximas sequencialmente, e assim vai comprimindo as rochas. Assim, tem-se uma compressão no material e essencialmente haverá uma mudança de densidade, sem perder a direção da onda. Essas são as ondas P que, pelas suas características, podem ser denominadas de ondas de compressão (Figura 3.14).

As ondas de compressão, podem viajar pelo ar, líquido e sólidos. Como já citado, a velocidade de propagação estará relacionada com a compressibilidade do material. No geral a velocidade de propagação das ondas no ar é de 330m/s, nos líquidos em média 1500m/s e nos sólidos cerca de 5000m/s, é o caso do granito, maior fração do material da crosta terrestre. (Doyle 1995).

As ondas S, são ondas que se reproduzem após o impacto lateral no elemento. São criadas deformações no sentido oposto ao movimento das ondas. O movimento das partículas é perpendicular ao movimento da onda, ou seja, podemos dizer que se tem uma onda transversal. Essas ondas só podem ser propagadas em materiais sólidos (Figura 3.15).

As ondas S têm uma velocidade de propagação inferior às ondas P. Em terremotos a propagação das ondas dá-se pelas ondas de compressão.

Muitas técnicas de caracterização do solo em níveis de deformação muito pequenos são baseadas em medições de movimentos de partículas associados à propagação de ondas. Isso é possível pela forte ligação existente entre as características de propagação das ondas e os parâmetros mecânicos do meio atravessado pelas ondas.

No âmbito anteriormente indicado, quando uma ação dinâmica é aplicada à superfície de um maciço semi-indefinido, propagam-se pelo menos três tipos de ondas: i) ondas P ou de compressão; ii) ondas S ou distorcionais; iii) ondas de Rayleigh. Para além destes três tipos de ondas terem configurações de vibração distintas, as suas velocidades de propagação são também diferentes.

A Figura 3.13 evidencia a chegada das ondas P, ondas de compressão que se propaga mais rapidamente que as outras e muito comumente denominada de ondas primárias, sendo suas deformações induzidas puramente volumétricas.

A segunda onda a chegar são as ondas S, ondas de distorção. O processo de propagação das ondas S implica deformação a volume constante.

Por último são apresentadas as ondas Rayleigh (R), que ao contrário das ondas de compressão e distorção, se propagam junto a superfície do meio. O campo de deformação induzido pelas ondas de Rayleigh caracteriza-se por deformação volumétrica e distorcional.

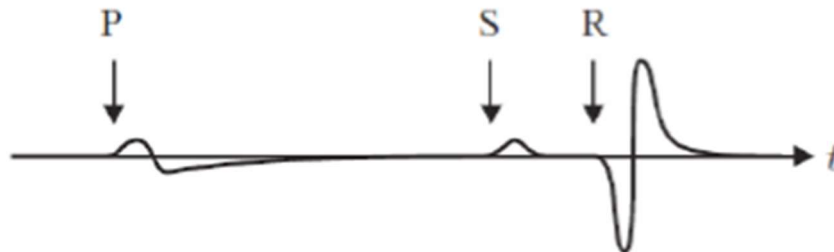


Figura 3.13 - Propagação horizontal de uma onda P, S e R à superfície.



Figura 3.14 - Movimento das partículas das ondas P.

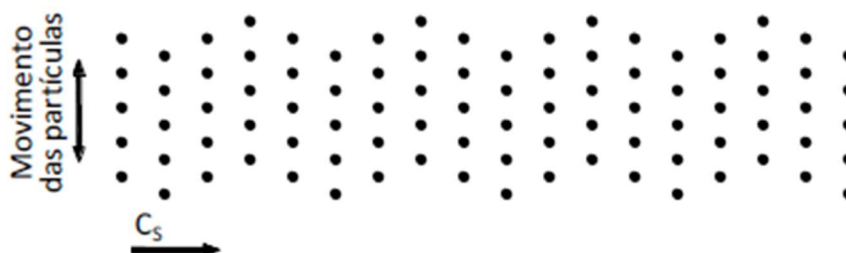


Figura 3.15 - Movimento das partículas da onda S.

Durante as últimas décadas, as medições da velocidade da onda de cisalhamento em terra foram obtidas principalmente nos ensaios de Cross-hole com vista a derivar as propriedades dinâmicas do solo exigidas na engenharia sísmica. Mais recentemente o cone sísmico (SCPT)

permitiu realizar medições sem a necessidade de perfurar dois ou três furos de sondagem paralelos.

A velocidade da onda de cisalhamento é cada vez mais reconhecida como um parâmetro significativo para engenharia geotécnica. A onda S está diretamente relacionado com a estrutura do solo e é independente do teor de água e do grau de saturação. A onda S está diretamente relacionada com o módulo de distorção máximo (G_0) que é um parâmetro chave nos problemas de interação entre solo-estrutura-solo.

A leituras realizadas pelas ondas P e S, permitem determinar o módulo de Young através do módulo distorção (G_0) e do coeficiente de Poisson, em materiais com propriedades isotrópicas, conforme equação 1.

$$E = 2 * G * (1 + \nu) \quad (3.2)$$

E - Módulo de Young

G_0 - Módulo de distorção

ν - coeficiente de Poisson

As ondas sísmicas podem ser medidas por vários tipos de aparelhos em laboratório. Dentre eles, a coluna ressonante, os transdutores de placa e os bender elements. Inicialmente, o equipamento eletrônico utilizado incluía um gerador de funções, um osciloscópio, dois pares de transdutores ultrassônicos de compressão e de corte, e um computador no qual os dados foram registados (**Figura 3.16**).

Após o processo de compactação dos provetes para várias percentagens de borracha com teor em água ótimo, as amostras eram submetidas aos ensaios de ondas.

Para efetuar as leituras das ondas sísmicas o processo se inicia com um sinal proveniente do gerador de funções que envia para um amplificador. O sinal em sequência vai até o canal 1 do osciloscópio e para o transdutor de transmissão. As ondas passam pelo meio compactado do provete até chegar ao transdutor de receção que está conectado ao canal 2 do osciloscópio. O osciloscópio é ligado ao computador para registrar as ondas. Este esquema é apresentado na **Figura 3.17**.

Logo no início enfrentou-se algumas dificuldades com os transdutores. A ação dinâmica gerada não era suficiente para transmitir pelo meio. Os transdutores colocados do lado oposto da amostra não permitiam fazer leituras.

Sendo assim, não foi possível continuar com os ensaios com esse método, pois, as ondas geradas não eram suficientes para fazer as leituras no canal 2 (recetor).

A solução adotada para o caso, foi simplificar o processo. Para os ensaios seguintes, os transdutores foram ligados no osciloscópio e amplificador. O gerador de funções foi substituído por um martelo (**Figura 3.18**). Ao aplicar leves pancadas com martelo sob o transdutor de transmissão, é gerado uma ação dinâmica amplificada, apropriada para realização de leituras das ondas.

As receções das ondas eram captadas por um transdutor recetor localizado ao lado oposto do transdutor de partida.

Todos os resultados dos ensaios de ondas sísmicas que são apresentados neste estudo no capítulo 4, referem-se ao procedimento adotado sem gerador de função.



Figura 3.16 - Acessórios utilizados para realização das leituras de Ondas P e S.

Os ensaios foram realizados dentro dos moldes de CBR, de forma a não desagregar o que lá estava, principalmente para os provetes com percentagens de borracha de 10%.

O provete quando era inclinado para realização dos ensaios, deslocava os materiais finos provocando a desagregação entre as partículas finas de borracha e do ASIC. Isso gerou dificuldades ou a necessidade de novos provetes para coleta dos resultados.

As tomadas de leituras das ondas eram realizadas em três etapas distintas: I) primeira leitura era realizada após o processo de compactação, na qual, o provete levava a quantidade de teor em água igual ao ótimo; II) A segunda leitura era obtida 96 horas após a imersão dos provetes em água; III) A última leitura era efetuada após deixar o provete no processo de secagem por 48 horas em local ambiente.

Outra adversidade encontrada durante os ensaios foi em relação aos impulsos que são gerados pela batida do martelo que por vezes, não podia se espalhar para o interior da amostra. A explicação para isso, leva em consideração: I) a ação dinâmica provocada pelo martelo gerava um impulso muito baixo, que não permitia a propagação das ondas até o lado oposto, onde encontrava-se o transdutor recetor; II) a alta densidade do material associada à baixa ação provocada; III) devido ao molde ser metálico, as vezes a incongruência e disparates nos valores de velocidade de propagação das ondas estavam ligadas a fuga das ondas percorridas pela estrutura de metal do molde.

As ações eram aplicadas diretamente em um dos lados transdutores e lida no lado oposto. Sempre que necessário e antes do início de cada ensaio, eram calibrados os transdutores e osciloscópio com provetes modelos em acrílico ou uma base diametral metálica.

Os resultados apresentados no Capítulo 4 referem-se a este segundo procedimento.

Todas as leituras são tomadas a partir do software disponibilizado pelo LabGeo da FEUP, chamado *WaveStar for Oscilloscopes*.

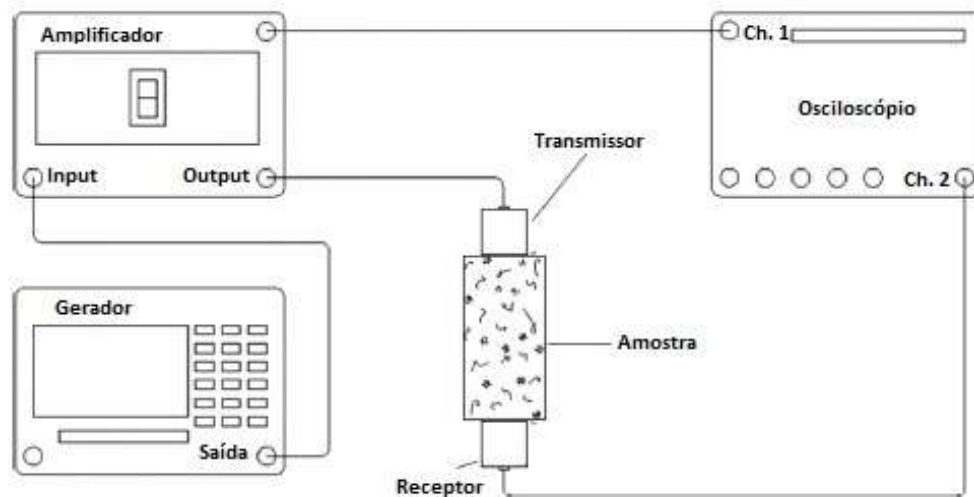


Figura 3.17 - Conexões para leitura dos ensaios de ondas sísmicas (Adaptado Amaral et al. 2012)

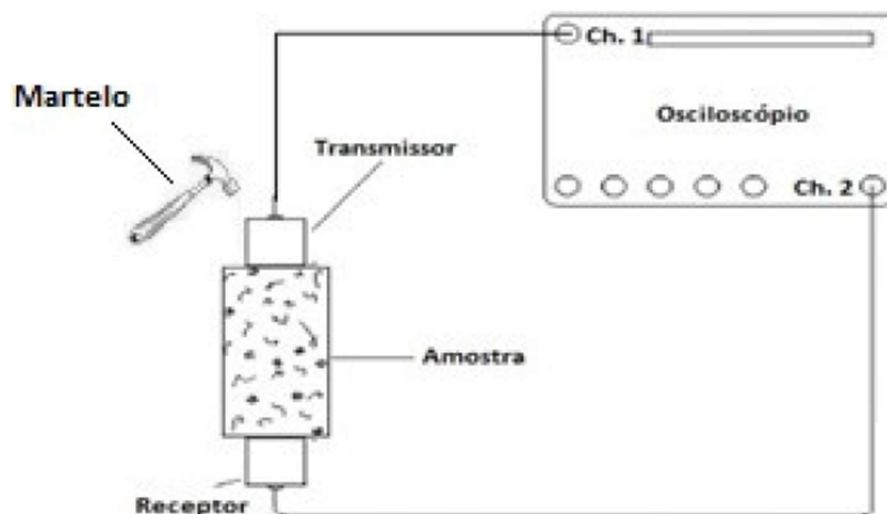


Figura 3.18 - Conexões para leitura dos ensaios de ondas sísmicas com martelo (Adaptado Amaral et al. 2012).

Capítulo 4

Resultados

4.1 - Introdução

Bem difundida no Brasil, a escória de aciaria está normalizada pelo DNER-EM 262/94 “Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários” que prevê os requisitos necessários de amostragem e aceitação para aplicar em rodovias, nomeadamente, valores limites de expansibilidade do material. A norma DNER-EM 263/94 “Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários”, fixa as condições aplicáveis nas camadas de base e sub-base.

Conforme as normas brasileiras, a expansão máxima não deve ser superior a 3%, granulometria de 40% nas peneiras de $\frac{1}{2}$ polegada (12,7mm), 60% dos agregados entre as peneiras de $\frac{1}{2}$ polegada e 2 polegadas (50,8 mm). Para a camada de sub-base e revestimento devem atender ao desgaste de abrasão Los Angeles $\leq 25\%$.

Em Portugal, este material está classificado como agregado de granulometria extensa (0/40mm), certificado desde 2011, de acordo com a norma EN 12620 (CEN, 2007). No país, o ASIC já está aplicado nas camadas de base, sub-base e aterros rodoviários, bem como, nas plataformas e corpo de aterro ferroviário.

O critério de utilização fica a cargo do estabelecido no Caderno de Encargos Tipo obras (CETO) - estradas de Portugal (2014), que tem como referência as normas europeias de agregados EN 12620 e EN 12620-1.

Após estudos realizados pela Siderurgia Nacional e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), é caracterizado pela norma europeia EN 12620 o ASIC para aplicação: I) índice de forma entre 1% a 4%; II) Abrasão Los Angeles $\leq 25\%$; granulometria tipo ABGE e dimensão entre 0/40mm e estabilidade volumétrica entre 0,35% e 2,30%.

Entre os anos de 2006 e 2010, com objectivo de estudar a viabilidade do agregado siderúrgico inerte para construção e aplicação deste em camadas granulares, foram desenvolvidos estudos entre a Faculdade do Minho e o LNEC, apresentando as características físicas, mecânicas e geométricas do agregado. Na Tabela 4.1 é apresentado um comparativo com os resultados obtidos nos ensaios realizados com ASIC no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LabGeo-FEUP).

Parâmetros	ASIC (Minho/LNEC)	ASIC (LabGeo)
D ₁₀ (mm)	1,96	0,089
D ₃₀ (mm)	8,50	1,297
D ₆₀ (mm)	18,89	8,314
Coeficiente de uniformidade (Cu)	9,64	93,69
Coeficiente de curvatura (Cc)	1,95	2,28
Peso volúmico seco (Yd) KN/m ³	*24,3	28,9
CBR (%)	48	223
Expansibilidade no CBR (%)	0	0

Tabela 4.1 - Quadro comparativo entre ensaios de caracterização do material ASIC. *Peso volúmico seco a partir do Proctor modificado.

4.2 - Análise Granulométrica

Conforme já mencionado no capítulo anterior, a análise granulométrica foi realizada pela norma brasileira do DNER - ME 080/94.

Após os ensaios de distribuição granulométrica e nos estudos realizados por Thom (1988), a mostra a curva granulométrica com as percentagens de materiais utilizados e as dimensões de todas as frações. Observar-se que a curva do ASIC (laranja) enquadra-se dentro dos limites solicitados pelo fuso granulométrico de sub-balastro da norma REFER (2007), que já foi demonstrado na Tabela 2.6 do Capítulo 2.

As normas regionais EN 933-1 e 933-2, são divididas em duas partes respetivamente, e tem objectivo de abordar os ensaios para as propriedades geométricas dos agregados. A EN 933-1 determina o tamanho das dimensões das partículas, o método de peneiramento, e enquadra os limites das faixas granulométricas, conforme abertura nominal das peneiras apresentada na Figura 4.1.

As duas primeiras partes da norma EN 933 têm como objectivo abordar os ensaios para as propriedades geométricas dos agregados.

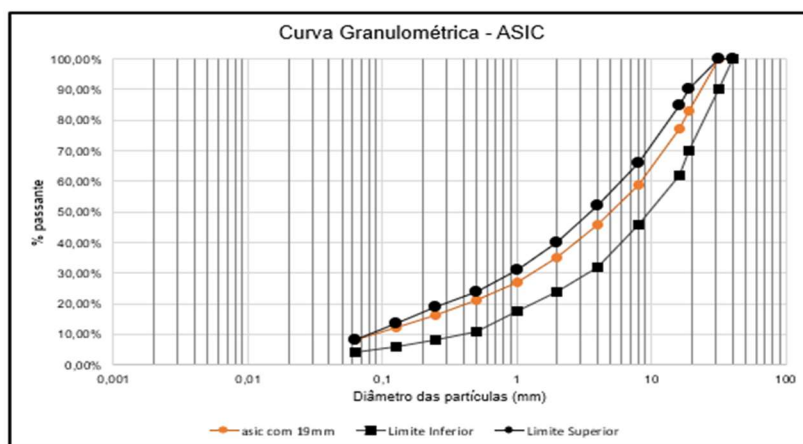


Figura 4.1 - Enquadramento da curva granulométrica do ASIC dentro do fuso proposto pela REFER (2007)

Uma vez que a distribuição granulométrica da borracha pertencia às malhas com 2 a 7mm, quando adicionado material a estas, ocorreu a redução da quantidade dos grãos de ASIC nas peneiras #2mm e #4mm.

Para a fabricação dos provetes e realização dos ensaios do Proctor e de CBR, foram utilizadas as percentagens de cada fração de solo mencionada na Tabela 4.2. Para os ensaios, não foram utilizadas frações superiores a 16mm. A quantidade de ASIC e borracha utilizada para cada modelagem foi baseada na percentagem apresentada na Tabela 4.2.

Conforme a curva granulométrica para ASIC da Figura 4.1, as curvas das misturas de ASIC com borracha são sempre as mesmas, porque se retira a fração ASIC correspondente à fração de borracha que é introduzida.

Peneiras	0% Borracha		2,5% Borracha		5% Borracha		7,5% Borracha		10% Borracha	
	%asic	%borracha	%asic	%borracha	%asic	%borracha	%asic	%borracha	%asic	%borracha
16	11,67%		11,67%		11,67%		11,67%		11,67%	
8	23,67%		23,67%		23,67%		23,67%		23,67%	
4	18,67%	0,00%	17,42%	1,25%	16,17%	2,50%	14,92%	3,75%	13,67%	5,00%
2	11,00%	0,00%	9,75%	1,25%	8,50%	2,50%	7,25%	3,75%	6,00%	5,00%
1	8,00%		8,00%		8,00%		8,00%		8,00%	
0,5	6,00%		6,00%		6,00%		6,00%		6,00%	
0,25	5,00%		5,00%		5,00%		5,00%		5,00%	
0,125	4,00%		4,00%		4,00%		4,00%		4,00%	
0,063	4,00%		4,00%		4,00%		4,00%		4,00%	
Fundo	8,00%		8,00%		8,00%		8,00%		8,00%	
Total	100%	0,00%	97,5%	2,50%	95%	5,00%	92,5%	7,50%	90%	10,00%

Tabela 4.2 - Percentagem do material ASIC e borracha utilizado para realização dos provetes dos ensaios de Proctor, CBR e das curvas granulométricas.

A elevada compacidade em fase inicial da amostra granular, ou seja, um elevado valor para Y_d inicial do solo, tende a minimizar as deformações permanentes (Allen, 1973). Por outro lado, nas conclusões apresentadas por Thom (1988), o efeito da classificação e densidade das partículas sobre as propriedades mecânicas do calcário dolomítico demonstra que não existe impacto considerável para o módulo deformabilidade elástico.

Segundo demonstrado por Forturnato (2005), o valor para o parâmetro de compacidade máxima “ n ” conduz para 0,35. A partir da curva granulométrica do ASIC apresentada na Figura 4.1 (enquadrada na norma europeia), foi possível obter um valor 0,38 para n .

O arranjo das partículas, a forma como estas preenchem os vazios entre si, e a energia de compactação aplicada, são determinantes para maior ou menor compacidade. Portanto, de acordo com a relação apresentada na Eq. 3.1, a granulometria em estudo dirige-se para um ponto comum, apresentando elevada compacidade. A curva granulométrica utilizada para a modelação dos provetes com material ASIC com borracha, foi baseada para obter elevada compacidade, menor índice de vazios e um peso volúmico seco máximo.

Diante do conhecimento e após estudos realizados por Haynes e Yoder (1963) e citados por Fortunato (2005), a rigidez elástica tende a diminuir com o aumento do teor em água nos materiais granulares.

Tal como apresentado na Figura 4.1, a curva de distribuição granulométrica representa a dimensão das partículas, mas também a forma como estas estão distribuídas no material. A partir da curva granulométrica, é possível fazer a caracterização de três parâmetros importantes. O diâmetro efetivo (D_{10}), D_{30} e D_{60} , coeficiente de uniformidade (Cu), e o coeficiente de curvatura (Cc).

D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	Cu	Cc
0,089	1,297	4,951	8,314	93,69	2,28

Tabela 4.3 - Resultados dos parâmetros da distribuição granulométrica para o ASIC em mm.

Conforme preconiza a instrução técnica IT.GEO.006, na Tabela 4.3 e Tabela 4.4 os resultados apresentados para o coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura do material ensaiado, assim como, os limites da faixa granulométricas atendem os requisitos solicitados pela norma.

Parâmetros	IT.GEO.006	Ensaio ASIC
Cu	≥ 6	93,69
Cc	$1 \leq Cc \leq 3$	2,28

Tabela 4.4 - Comparativo de resultados com requisito da IT.GEO.006

4.3 - Curvas de compactação

O ensaio de compactação do Proctor deverá seguir as normas portuguesa NP EN 13286-2 2014 que permitir determinar a densidade, teor de água e compactação Proctor. Este ensaio é adequado para misturas que apresentam dimensões de partículas superiores a 0,063mm.

O ensaio de compactação é regido no Brasil pela norma do DNIT 164/2013 - ME, tal como para o ensaio de CBR (DNIT 172/2006 - ME), a amostra representativa de são realizados com materiais passantes na peneira #19mm. Para o caso de materiais com dimensões superiores a #19mm, o mesmo deve ser pesado e distribuído nas peneiras subsequentes de #16mm, #8mm e #4mm.

Tendo em consideração a influência do teor em água e peso volúmico do material utilizado, os resultados para variação do teor em água de 1 a 5% nas amostras demonstraram uma variabilidade entre 2,07 a 2,89 g/cm³ do peso volúmico do material.

Entretanto, conforme apresentado na Figura 4.2, o peso volúmico do material de uma amostra para diferente percentagem do teor em água não representa grande diferença entre os valores coletados. Para os resultados apresentados com o material de “ASIC” e “ASIC com

borracha”, são exibidas curvas de compactação quase lineares, ou seja, com pequenas variações do Y_d .

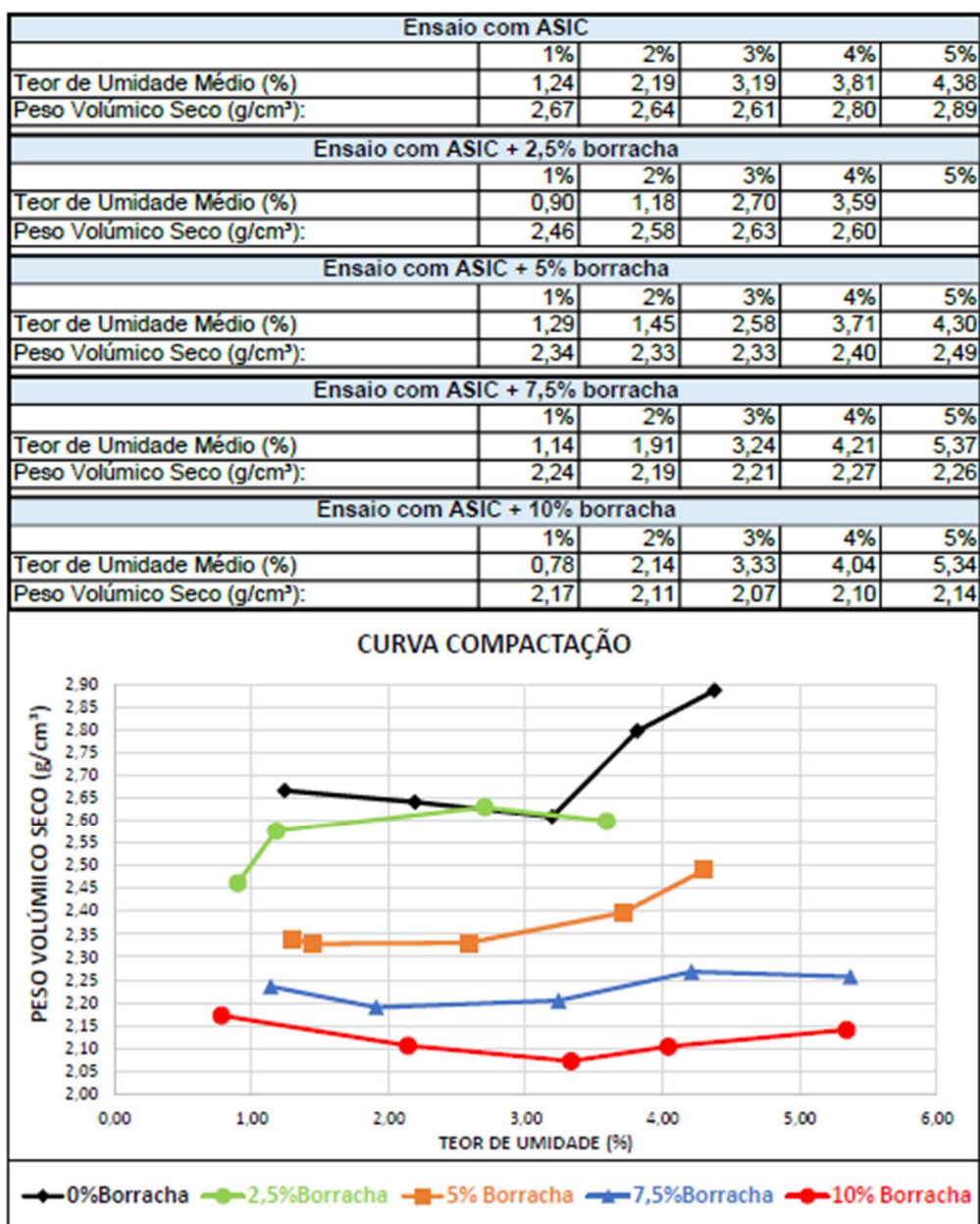


Figura 4.2 - Curva de Compactação com variação de percentagem de borracha.

Para além do módulo de deformabilidade da borracha, um dos pontos significativos para obtenção dos resultados do Y_d são a percentagem de finos utilizados na amostra. Haynes e Yoder (1963) concluíram que para os solos bem graduados que apresentam partículas de dimensões finas acima de 8%, os resultados do peso volúmico seco máximo são relativamente reduzidos.

Outro ponto já citado, é em relação ao parâmetro para compacidade adquirida na análise granulométrica $n=0,38$. O aumento da compacidade do material a utilizar é inversamente proporcional ao índice de vazios para dada distribuição granulométrica, e conduz a menores deformações elásticas (Allen, 1973).

Na Figura 4.2, o Y_d decresce à medida que o teor em borracha é elevado. Isto está associado à quantidade de borracha que é substituída pelo ASIC, pois a fração retirada de ASIC corresponde à fração de borracha que é introduzida. Portanto, as partículas de ASIC que possuem densidade superiores são alteradas por partículas com menor peso volumétrico, nomeadamente, frações de borracha. Complementarmente, a introdução de borracha tem a capacidade de prejudicar a compactação do material, por não haver deformação permanente associada à compactação e a energia aplicada são replicadas em energia elástica pelo fato de se ter maior quantidade de fração da borracha.

4.4 - Curvas do CBR e resultados

Os valores adquiridos para CBR nos ensaios realizados em laboratório foram satisfatórios quando comparados, de maneira geral, com os requisitos mínimos das normas para as camadas de sub-balastro e sub-base, ferroviária e rodoviária respetivamente.

Os resultados apresentados nesta secção são direccionados em regime ideal, ou seja, para o teor em água ótimo. Todos os outros ensaios e curvas de forças *versus* penetração são demonstrados no Anexo I, os quais apresentam valores de CBR para diferentes teores de borracha; e no Anexo II, com os resultados de CBR para diferentes teores em água.

Com relação às camadas de sub-base para rodovias, a classificação dos materiais empregados no pavimento do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (2014), o CBR deve ser superior a 20% (Tabela 2.2). Para os resultados encontrados quer com ASIC, quer com ASIC mais adição de borracha, todos os ensaios com teor em água ótimo atingiram o mínimo exigido (Figura 4.3).

Na Tabela 4.5, é apresentada correspondência do CBR em relação à qualidade do material conforme especificações do Manual do DNIT 2010.

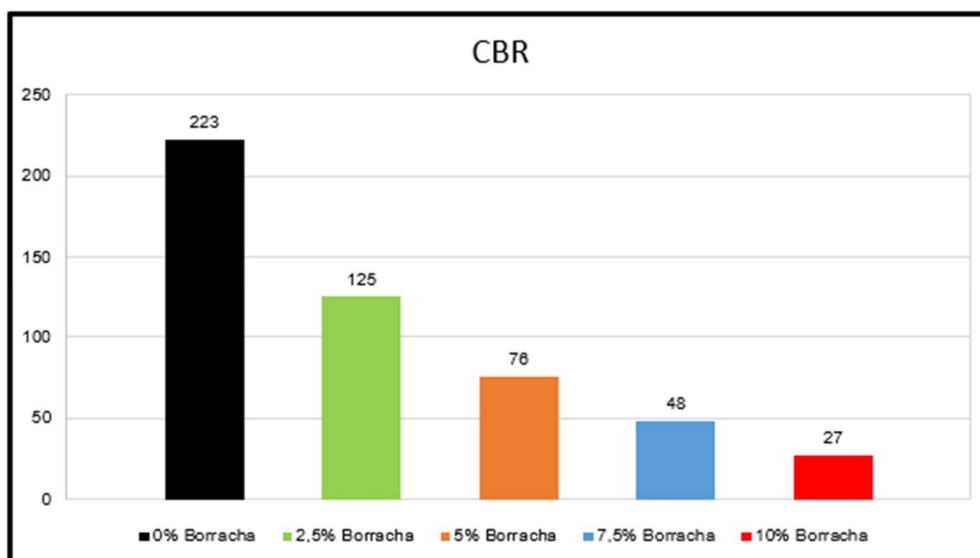


Figura 4.3 - Valor do CBR para variabilidade na percentagem de borracha.

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) prevê que materiais não ligados aplicados em camadas de sub-base devem ter um valor mínimo de CBR (correspondente à compactação em Proctor Modificado) de pelo menos 20%, em consonância com a Normas

europeias e o Manual do DNIT 2010. Tendo em conta este critério, todas as misturas com 4% de teor em água cumprem este requisito, como se observa na Figura 4.3.

A relação entre CBR e o peso volúmico seco máximo (Y_d) do material, é elevada quanto maior a redução ou ausência do teor de borracha. Na Figura 4.4, o CBR atingiu valores aproximadamente, 80 vezes maior que o Y_d (kN/m^3) do material para os ensaios com ausência de borracha. Quanto maior a adição de borracha ao ASIC, menores são o peso volúmico seco e, CBR.

Conforme o Manual do DNIT 2010, recomenda-se para as camadas finais e no corpo de aterro, o uso dos melhores materiais disponíveis. Na Tabela 4.5, é apresentado a correspondência entre CBR e qualidade de matérias para as camadas de terraplenagem.

CBR (%)	Qualidade do Material
≥ 60	Excelente
20 a 60	Muito Bom
10 a 20	Bom
5 a 10	Regular
2 a 5	Ruim
< 2	Péssimo

Tabela 4.5 - Correspondência entre CBR e qualidade do material (adaptado de *Manual de Implantação Básica de Rodovia* - DNIT 2010).

Com base no caderno de encargos da Estradas de Portugal (2014), e através da determinação do índice de suporte califórnia (LNEC E 198), os resultados de uma amostra após os ensaios determinam a capacidade de suporte do solo e podem definir as camadas de utilização. Tal como na Tabela 2.2, a percentagem do CBR estipula as classes e a viabilidade do uso para as camadas de sub-base.

A relação entre CBR e o peso volúmico seco máximo (Y_d) do material, é elevada quanto maior a redução ou ausência do teor de borracha. Na Figura 4.4, o CBR atingiu valores aproximadamente, 80 vezes maior que o Y_d (kN/m^3) do material para os ensaios com ausência de borracha. Quanto maior a adição de borracha ao ASIC, menores são o peso volúmico seco e, CBR.

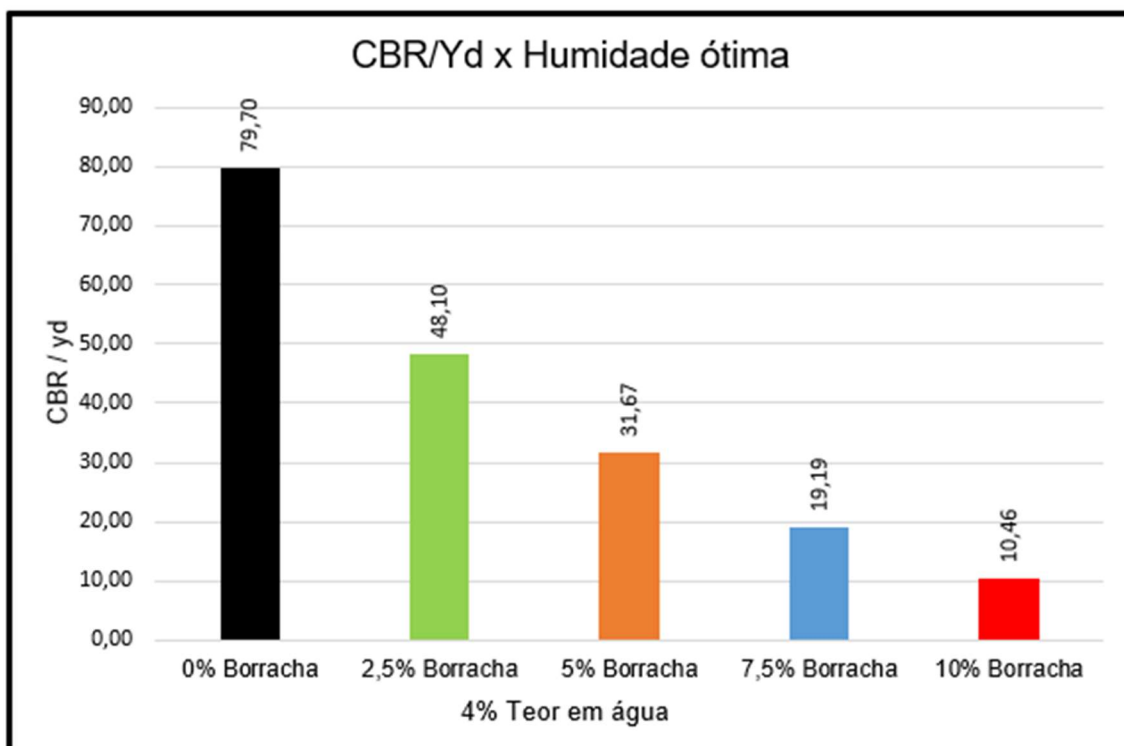


Figura 4.4 - Valor do CBR/peso volúmico para variabilidade da percentagem de borracha realizado no teor em água ótimo.

Os ensaios de CBR para o ASIC foram realizados com o teor em água ótimo, uma vez que estes resultados foram satisfatórios perante as referências das bibliografias sobre o tema publicado. Entretanto, seria relevante a realização desses ensaios para uma comparação nos diferentes teores em água e comportamento perante valores dos respectivos CBR.

Na Figura 4.5, podemos visualizar que se considerarmos o CBR para as camadas de sub-base rodoviárias conforme o Manual DNIT 2010, apenas os ensaios com 1 a 3% de teor em água para 10% de borracha não atendem os requisitos mínimos.

Verifica-se que para o teor em água superior a 4%, os resultados do CBR na maioria dos casos são elevados. A princípio os valores de CBR são máximos para teor em água 4%, no entanto, os CBR atingidos com teor em água de 5% estão próximos dos resultados máximos alcançado, o que é consequência da insensibilidade do Yd a esta pequena variação de 4 por 1% do teor em água.

O valor de 125% do CBR para 3% do teor em água com 2,5% de teor em borracha Anexo II - Figura 11, merecia uma repetição para contestar o resultado obtido. É possível que o método de ensaio, leitura ou procedimento tenha sido inadequado, pois era expectável valores entre 40% e 50%.

Para uma única amostra os ensaios são necessários pelo menos 4 dias para gerar um valor de CBR embebido e na maioria das situações é indispensável a análise ao longo do comprimento da via em estudo. Posto isto, na viabilidade de reduzir o tempo e efetuar um prognóstico dos possíveis valores de CBR para um determinado local, vários autores propuseram correlações baseado nos índices e propriedades dos solos granulares para aproximar de um valor de CBR.

Em um estudo efetuado por Ferede (2010), propõe uma aproximação do CBR com índices do D_{60} , que apresenta um índice de CBR de 18%.

$$CBR = 68,789 - 11,925 * D_{60} + 0,897 * D_{60}^2 - 0,025 * D_{60}^3 = 17,28\% \quad (4.1)$$

Com base nas investigações realizadas pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP, 2001) para D_{60} menor ou igual a 0,01mm pode ser considerado um CBR de aproximadamente 5%. Valor de D_{60} igual ou superior a 30mm apresentam CBR de 95%. Faixas de D_{60} compreendidas entre os valores apresentados podem ser correlacionados a partir da equação abaixo:

$$CBR = 28,09 * (D_{60})^{0,358} = 59,95\% \quad (4.2)$$

Tal como apresentado na Tabela 4.3, temos um D_{60} igual a 8,314. Isso permite ter um valor CBR aproximado de 60% para a equação 7. Levando em consideração que o valor do D_{60} é referente a um solo granular composto por ASIC, o valor encontrado na relação é muito inferior, uma vez, que para os ensaios realizado em laboratório para a mesma amostra foram atingidos CBR igual a 223%.

Por fim, uma outra proposta efetuada por Farooq et al 2017, em que o autor estuda vários tipos de solos granulares, é apresentado a relação do CBR. Este associado ao diâmetro médio (D_{50}) e o coeficiente de uniformidade do solo.

$$CBR = 6,508 * D_{50} + 1,48 * C_u + 3,97 = 174,85\% \quad (4.3)$$

Na equação 8, chegamos a um valor de CBR próximo de 175%.

Os resultados alcançados nas equações dos autores acima, demonstram que as escórias de aciaria possuem propriedades distintas dos solos granulares estudados e por isso, obteve-se valores muito superiores quando comparado com os resultados obtidos no presente estudo.

Resultados de correlações e ensaios realizados	Ferede (2010) Eq. 08	NCHRP (2001) Eq. 06	Farooq et al (2017) Eq. 07	LabGeo (2021)
Valores de CBR (%)	17,28%	59,95%	174,85%	223,00%

Conforme já experimentados por alguns autores (Silva, 1994; Lima et al., 2000; Chesner et al., 2001) as escórias de aciaria podem alcançar CBRs até 300%, consolidando os resultados obtidos nos ensaios do LabGeo.

Uma questão importante para justificar os altos valores de CBR, tem haver com a propriedade hidráulica da escória. A hidraulicidade, processo de endurecimento através da reação do material em contato com a água, favorece na cimentação da escória. Este processo acontece quando os provetes são levados a imersão por 96 horas nos ensaios de CBR. Esta propriedade é muito importante pois conduz uma melhora das características mecânicas da camada compactada e beneficia um comportamento estrutural semelhantes a estruturas rígidas (Rohde, 2002).

Outra preocupação das escórias de aciaria estão relacionadas ao potencial expansivo deste material devido sua alta taxa de concentração em cálcio (CaO) e magnésio (MgO). A expansibilidade do material é prejudicial as camadas do pavimento e plataforma de via-férrea que podem causar fissuras e rachaduras. No entanto, nos ensaios realizados mostraram que não houve expansibilidade do material quer seja para o “ASIC” ou para a composição de “ASIC com

borracha”. Pode-se justificar, tal como citado no capítulo 2, que o material proveniente de fábrica foi levado ao mecanismo de hidratação e estabilizado no processo de cura e resfriamento.

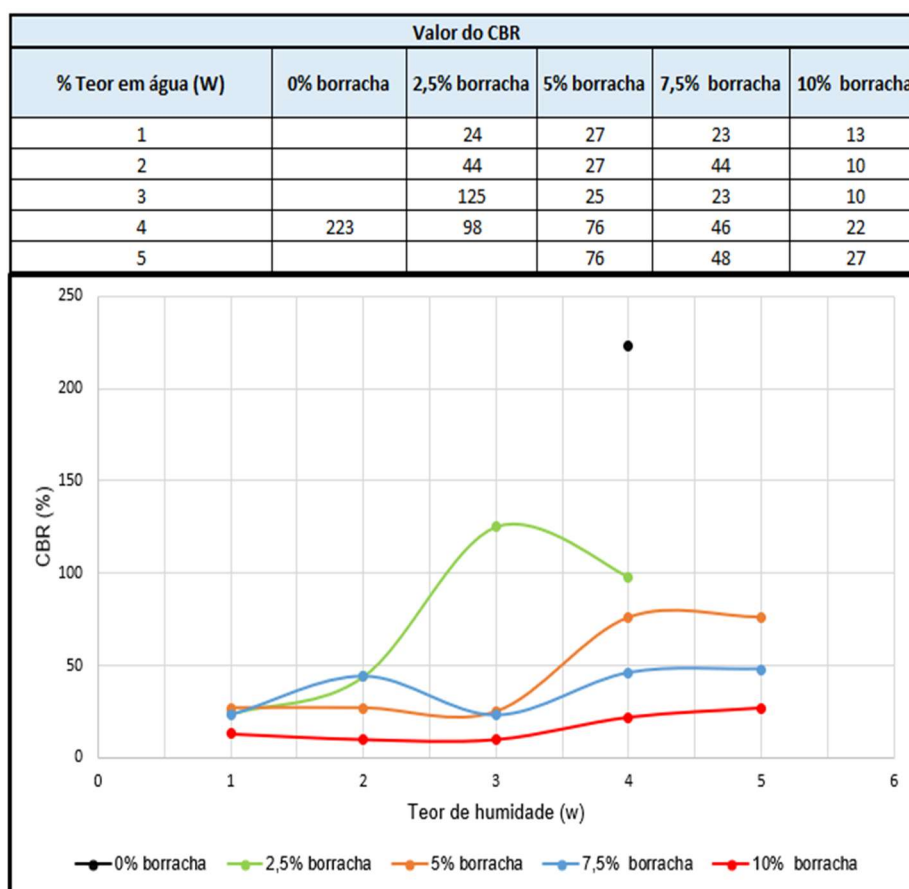


Figura 4.5 - Valor do CBR para diferentes teores de borracha e de água.

4.5 - Velocidades das ondas e módulos de deformabilidade elástico

Conforme já explicado no Capítulo 3, os sinais das ondas se propagam em velocidades diferentes a depender do meio em que se propaga bem como o tipo de onda. Na Figura 4.6, tem-se a representação de uma leitura realizada por um sinal de ondas P. Como é sabido, a transmissão da onda se inicia após a ação dinâmica - que no caso deste ensaio foi uma pancada leve sobre os transdutores - independentemente do tipo de onda. Já a receção das ondas P, necessariamente acontecem antes que as ondas S, dada a sua reconhecida maior velocidade.

A leitura do sinal de receção (linha azul da Figura 4.6), deve ser adquirida no momento que esta saia do plano horizontal, gerando movimentos cíclicos em sentido ascendentes (crista) e descendentes (vale). Da linha horizontal até a concavidade máxima/mínima são determinadas as amplitudes das ondas.

Na Figura 4.8, podemos visualizar a frequência (vários comprimentos de ondas) das ondas P como referência. A redução da amplitude das ondas é definida por: amortecimento do material; das condições atmosféricas; do provete; do molde; e propriedades físicas.

No canto inferior do lado direito é apresentado a diferença entre o sinal transmitido pelo sinal recebido.

Por fim na parte central inferior da Figura 4.6, as escalas de tempo e voltagem que são ajustadas para capturar as movimentações, a depender da necessidade dos resultados que se pretendem obter. As escalas da Figura 4.6 e da Figura 4.7 são distintas, pois uma levou em consideração o início e o fim dos sinais transmitidos, enquanto a outra mostra o prolongamento e amortecimento ao longo do tempo da onda P.

As ondas S apresentam um atraso na recepção por atravessar mais vagarosamente o meio. Os seus resultados bem como sua leitura de recepção é realizada no vale ponto mais inferior da onda, conforme Figura 4.7.

As linhas verdes, servem para auxiliar na leitura dos sinais de transmissão e recepção. Após serem colocadas sobre o local desejado, as distâncias entre os sinais são calculadas e apresentas na parte inferior do lado direito.

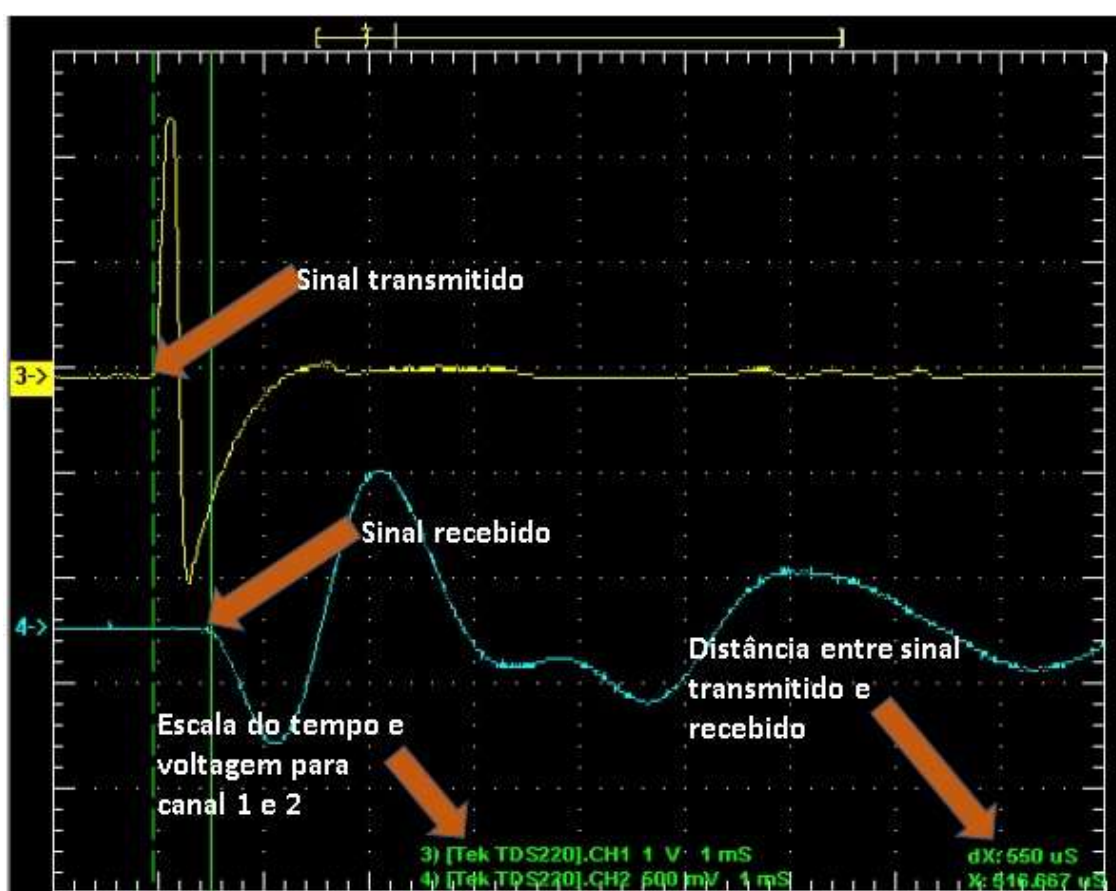


Figura 4.6 - Sinal de transmissão e recepção das ondas P. Leituras e resultados dos ensaios de ondas sísmicas.

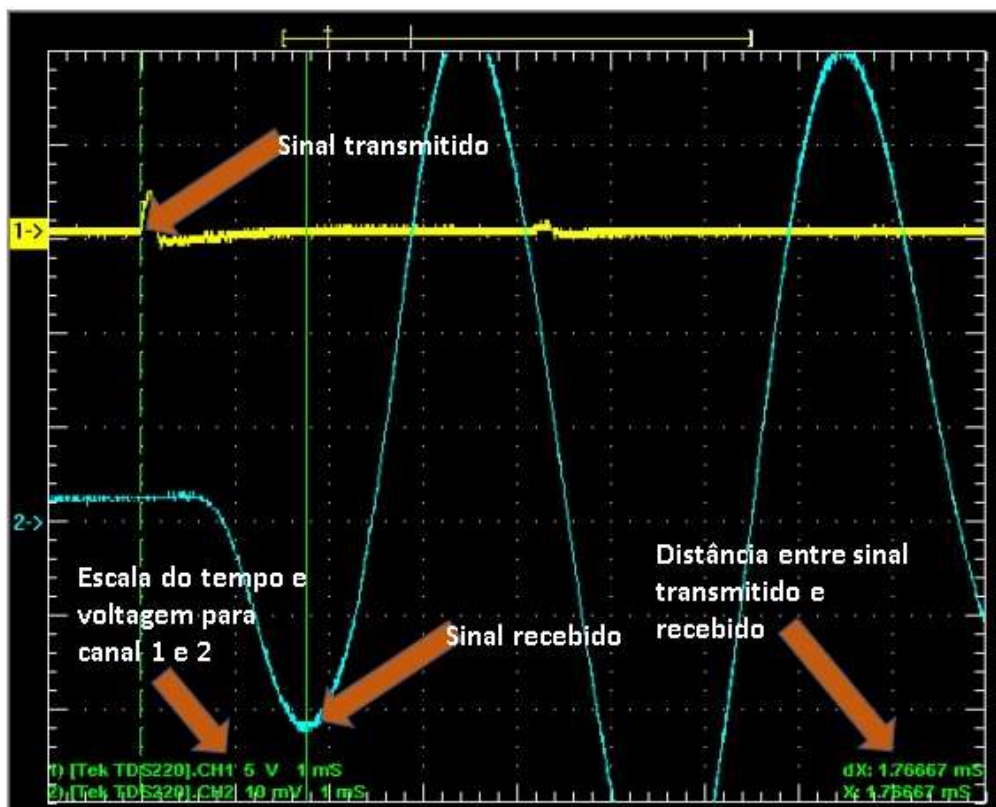


Figura 4.7 - Sinal de transmissão e recepção das ondas S. Leituras e resultados dos ensaios de ondas sísmicas.

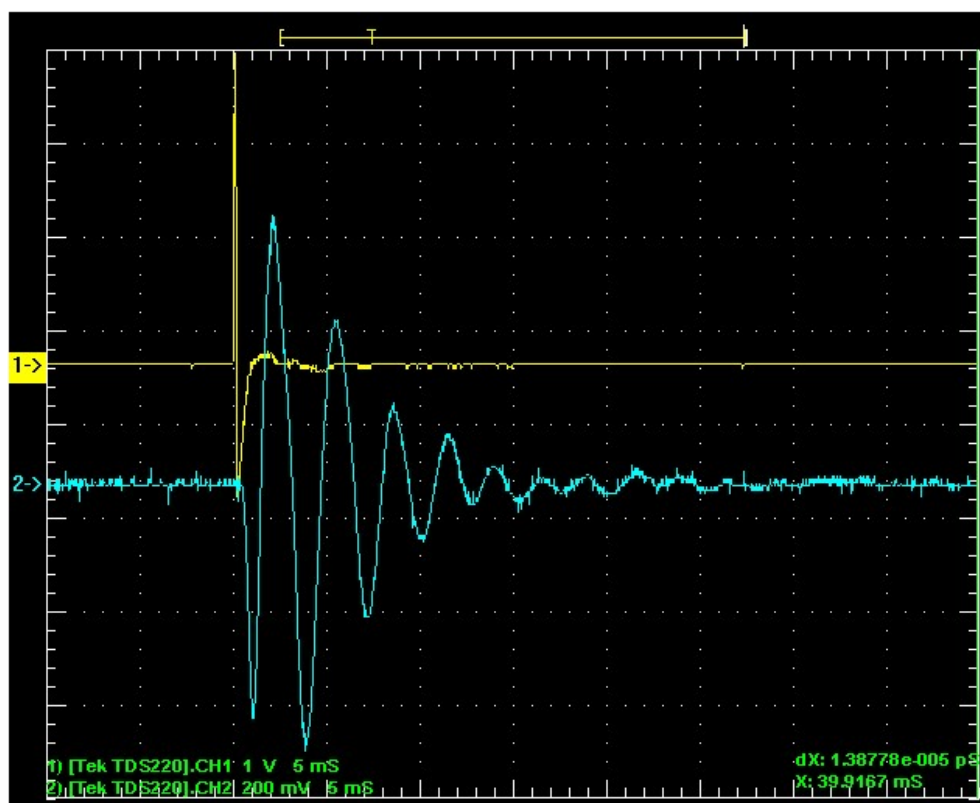


Figura 4.8 - Movimento oscilatório completo de onda sísmica em material composto por ASIC e 2,5% de borracha.

O coeficiente de Poisson (ν), o módulo inicial de elasticidade - Young (E_0) e módulo inicial de distorção (G_0) podem ser estabelecidos com os resultados obtidos das ondas P e S através das equações 9, 10 e 11.

Coeficiente de Poisson (ν):

$$\nu = \frac{0,5 - \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad (4.4)$$

Módulo inicial de Distorção (G_0):

$$G_0 = \rho * V_s^2 \quad (4.5)$$

Módulo de deformação elástica - young (E_0):

$$E_0 = 2 * G_0 * 1 + \nu \quad (4.6)$$

Os valores índices citados, são demonstrados na tabela seguinte:

Parâmetros	2,5% Borracha	5% Borracha	7,5% Borracha	10% Borracha
ν	0,34	0,36	0,37	0,38
G_0 (MPa)	35,93	10,77	19,79	8,75
E_0 (MPa)	96,62	29,14	54,42	24,00

Tabela 4.6 - Parâmetros alcançados a partir da correlação dos resultados das ondas P e S.

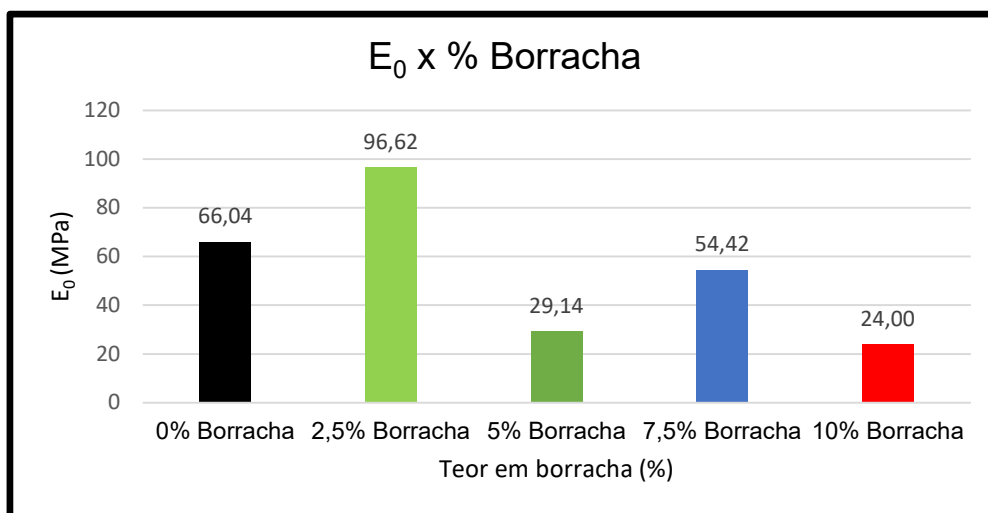


Figura 4.9 - Associação do módulo de elasticidade com o teor em borracha.

Na Figura 4.11, são apresentados os resultados para amostra com teor em água ótimo, da razão do módulo de elasticidade pelo CBR encontrado nos ensaios efetuados. Conforme a curva, para teor em borracha de 5%, existe um pico em relação ao E_0 /CBR.

O resultado obtido da leitura das ondas para o módulo de elasticidade com mistura 2,5% de teor em borracha se distingue dos demais resultados dentro da mesma categoria. De tal forma que este ensaio carece de uma repetição para confrontar com valores alcançados. As leituras das ondas sísmicas tomadas no *software WaveStar* são apresentadas no Anexo III, onde estão explícitas as ondas P para os diferentes teores de borracha e, no Anexo IV, para as ondas S.

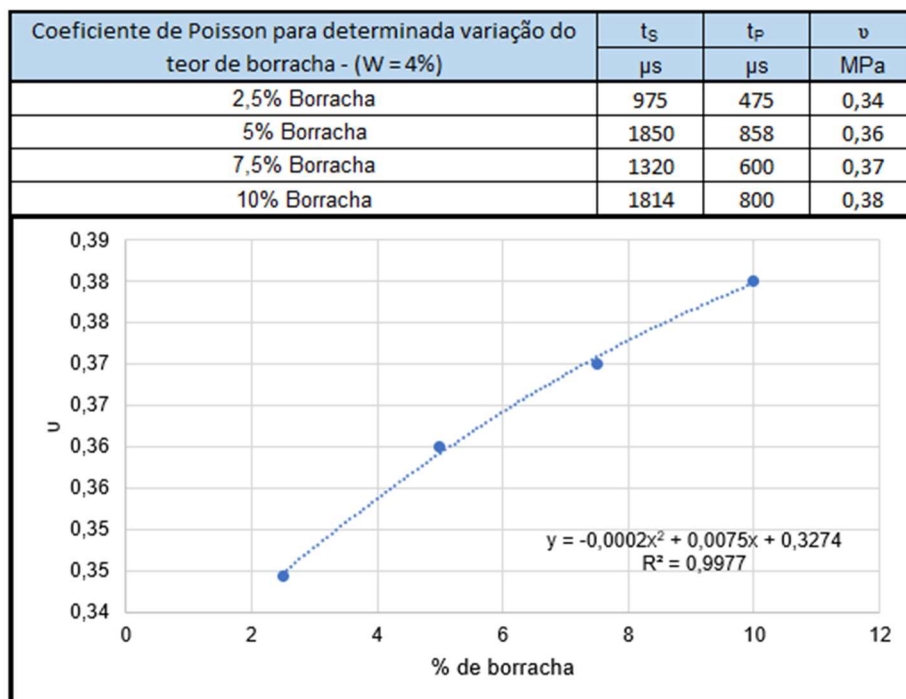


Figura 4.10 - Coeficiente de Poisson para diferentes teores de borracha.

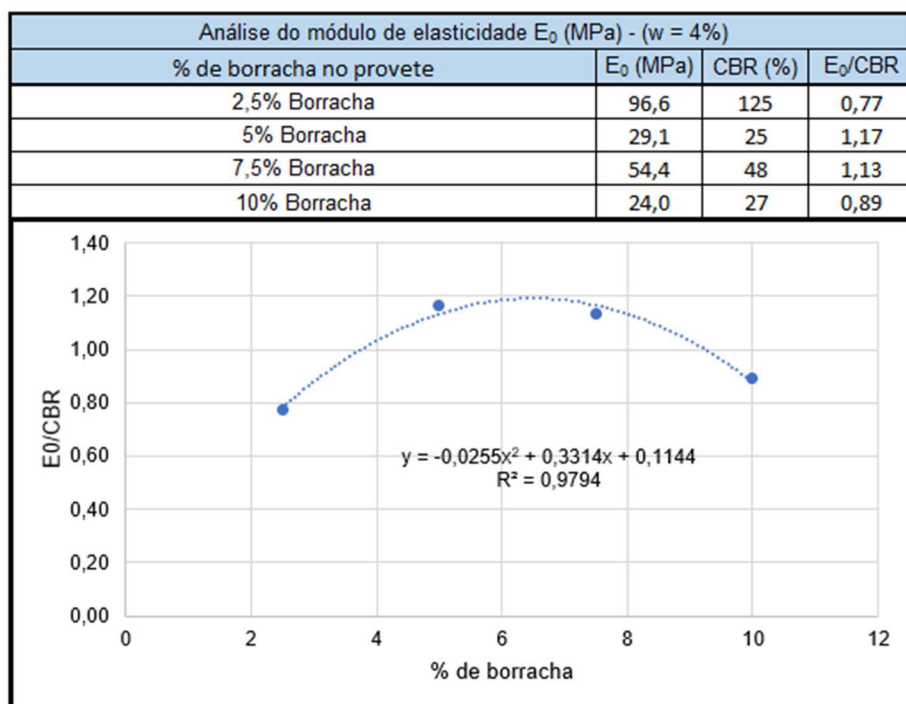


Figura 4.11 - Análise do módulo inicial de elasticidade e CBR para determinada percentagem de borracha.

Capítulo 5

Conclusões e investigações futuras

5.1 - Conclusões

Embora ainda haja muito a ser investigado e entendido na composição do agregado siderúrgico de forno de arco elétrico com agregado de borracha derivado de pneus em fim de vida aplicados às camadas de infraestruturas de transporte, os resultados ora apresentados neste estudo permitiram ter maior sensibilidade ao desempenho destes materiais.

A análise granulométrica realizada para o ASIC demonstrou resultado com baixo teor de finos quando comparado com os fusos preconizados pela REFER (2007) para sub-balastro ferroviário, similares aos preconizados para estradas. No entanto, após a britagem que permitiu subir o valor do teor de finos para 8%, o material pode ser classificado como bem graduado tendo em conta o coeficiente de curvatura. O coeficiente de uniformidade denota uma granulometria extensa, agrupando uma ampla gama das dimensões de partículas.

Nos ensaios de compactação, percebeu-se que a adição do teor em água entre 1% a 5% altera numa ordem de grandeza aproximada de 2 KN/m³ do peso volúmico seco para um mesmo teor de borracha (Figura 4.2).

Os resultados obtidos para ensaios só com composição de ASIC, demonstraram elevado peso volúmico o que era de esperar dada elevada densidade das partículas, eventualmente, essa elevada densidade pode ajudar na estabilidade para camadas de sub-balastro.

O CBR alcançado no ensaio com material “ASIC” tem ordem de grandeza superior a 200%, ou seja, tem capacidade duas vezes maior que o brita graduada padrão da califórnia. Quando comparado com material padrão britado é perceptível sua superioridade quer nas características quer em qualidade do material para o seu uso. Isso, apresentou resultados muito satisfatórios e justifica a consolidação do produto no mercado português e o certificado com a Marca CE por norma EN 13242. Para garantir resultados satisfatórios e bom desempenho do material, tal como apresentado nos CBRs, são provenientes da resistência mecânica do material e da morfologia das partículas.

Tendo em consideração que as amostras de CBRs com teor em água ótimo atingiram índices superiores a 20%, a aplicação deste material poderia ser viabilizada na aplicação das camadas de sub-base. No entanto, é prudente realizar estudos que permitam verificar o comportamento do material diante outros parâmetros físicos e mecânico.

Os resultados de CBR devem ser analisados conforme sua aplicabilidade e normas a ser utilizadas. Em razão do tipo de camada e da norma a ser utilizada, haverá momentos que os resultados do CBR apresentados podem não ser satisfatórios para o fim a que se destinam. Observou-se que o resultado para o material ASIC sem adição de borracha (223% do CBR) atingiu valor mais do que suficiente para as camadas de infraestruturas.

Nas curvas de forças *versus* penetração apresentadas no Anexo I, os CBRs com teor em água de 4% e 5%, obtiveram os maiores picos para todas as percentagens de borracha.

Ainda é preciso realizar muitos ensaios para assegurar a minimização de incertezas em relação às ondas. As velocidades das ondas são impactadas por diversos fatores que são capazes de alterar os resultados finais. O índice de compactidade, as dimensões das partículas, e o provete a ser utilizado são fatores que devem ser isolados para minimizar os erros.

No entanto, os registos de velocidade de ondas de compressão (V_p) e de corte (V_s) permitiram pré-avaliar as características de deformabilidade em regime elástico, o módulo de distorção e o coeficiente de Poisson para o material ASIC, que ao final apresentaram resultados satisfatórios.

De uma maneira geral, apesar dos ensaios realizados estarem enquadrados nas normas e especificações técnicas e em alguns casos, nomeadamente, ensaio de compactação e CBR, apresentarem valores satisfatórios, o material em uso merece uma análise pormenorizada com a realização de ensaios mais robustos e menos convencionais que permitam verificar o comportamento do material e parametrização deste. Os ensaios de carga cíclica, carga em placa, defletómetros de impacto pesado, dentre outros, valorizam e são importantes para enquadramento do material.

5.2 - Desenvolvimentos Futuros

A incorporação dos resíduos de borracha provenientes de pneus triturados nas camadas rodoviárias e ferroviárias é mais uma aplicação dentre as várias existentes, junto se propõe:

- Determinar indicadores ambientais para quantificar a redução de CO₂ emitido, qualificando o impacto ambiental gerado pela reutilização da borracha e caracterizar a redução de matéria-prima, tende a ser um dos pontos fundamentais para agregação nesta especialidade;
- Analisar com carga cíclica, triaxiais e *falling weight deflectometer* que concederá as deformabilidades e outros parâmetros de comportamento do material a longo prazo, com vista a cimentar a credibilidade desta, mistura ao longo do ciclo de vida das infraestruturas em apreço.
- Realizar estudos em ensaios, e trechos experimentais, que permitam perceber a resposta do material aplicado na realidade.

Referências

- ABM. (2021). *Produção de aço é fundamental para recuperação da América Latina*. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/eng/noticia/producao-de-aco-e-fundamental-para-recuperacao-da-america-latina>>.
- AFNOR NF P94-117-1 (2000). *Sols: reconnaissance et essais. Portance des plates-formes. Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2)*. Association Française de Normalisation.
- ALLEN, J. J. (1973). *The effects of non-constant lateral pressures on the resilient properties of granular materials*. Ph.D. Thesis. University of Illinois, Urbana.
- AMARAL, M. F., Viana da Fonseca, A., Arroyo, M., Cascante, G., and Carvalho, J., 2011a, "Compression and Shear Wave Propagation in Cemented-Sand Specimens," *Géotech. Lett.*, Vol. 1, pp. 79-84
- AMARAL, M. F. S. S. F. (2012). *Caracterização e modelação de comportamento dinâmico e cíclico de misturas de solo-cimento para Infraestruturas de Transportes*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- BALBO, J. T (2007). *Pavimentação Asfáltica - Materiais, Projetos e Restauração*. São Paulo: Oficina de Textos.
- BERNUCCI, L. B. et al (2008). *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA.
- BRITO, L. A. T., GRAEFF, A. G. (2009). *Métodos de Dimensionamento de Pavimentos - Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações*. Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre - CONCEP.
- CALON, N. (2016). *Rôle de la couche intermédiaire dans le potentiel de la voie ferrée*. Thèse Doctorale en Géotechnique. Université Paris-Est, France.
- CEN (2005). *Agregados para balastro de via férrea*.
- CHESNER, W.H.; STEIN, C.W.; COLLINS, R.J. e L.VAN HELDEN (2001). *Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry*. NCHRP4-21. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- CONSOLI, N. C. et al. (2011). Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cement-Treated Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 11, p. 1126-1131.

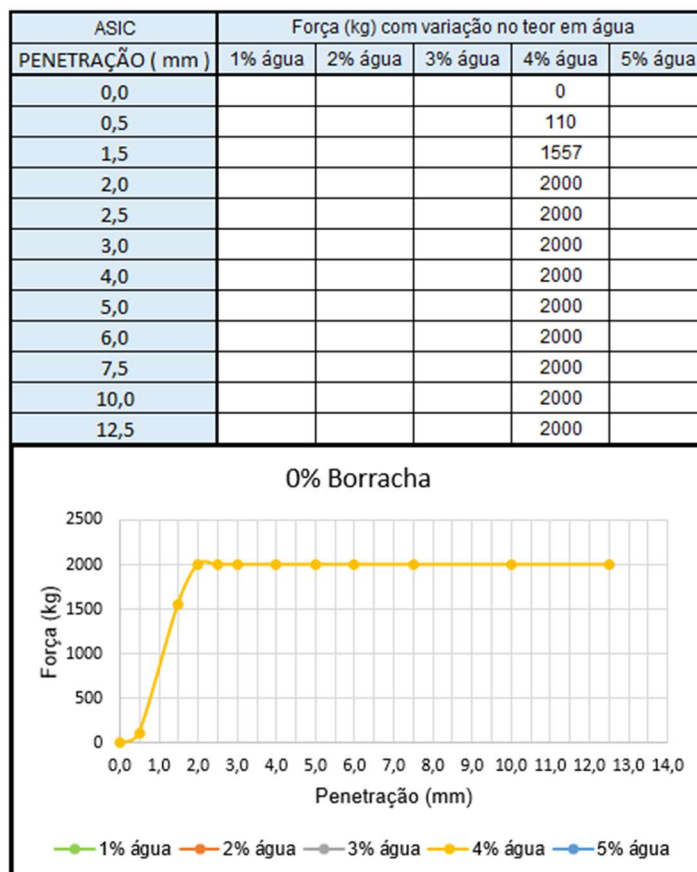
- CONSOLI, N. C. et. al. (2012). Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. *Géotechnique*, Vol. 62, No. 2, p. 177-183.
- CTPL. (2016). *Laitiers sidérurgiques*. No. 106. Centre Technique et de Promotion des Laitiers Siderurgiques, Colomiers.
- CTPL. (2020). *Laitiers sidérurgiques*. No. 112. Centre Technique et de Promotion des Laitiers Siderurgiques, Fos-sur-Mer.
- DAYRELL, F. O. (2013). *Metodologia Geotécnica Sustentável para credenciamento da Escória de Aciaria como lastro ferroviário*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.
- DELGADO, B. G. (2019). *Geomecânica de um agregado siderúrgico inerte como material alternativo para lastro de vias férreas do tipo Heavy Haul*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- DELGADO, B. G. et al. (2019a). Aproveitamento de Escórias de Aciaria em Infraestruturas de Transportes - estudos e aplicações em Portugal e no Brasil. *Atas do 9º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa, Portugal.
- DELGADO, B. G. et al. (2019b). Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of a steel slag aggregate. *Environmental Geotechnics*, <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00203>.
- DIN 18134 (2001). *Determining the deformation and strenght characteristics of soil by plate loading test*. Deutsches Institut für Normung.
- DINIS, M. V. B. (2014). *Efeitos das condições atmosféricas em aterros ferroviários. Análise hidrotérmica e análise mecânica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- DNER. (1994). *Solos -Preparação de amostras para Ensaio de Caracterização - Método de Ensaio 041*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.
- DNER. (1994). *Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia - Método de Ensaio 049*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.
- DNER. (1994). *Solos - Análise Granulométrica por Peneiramento - Método de Ensaio 080*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.
- DNIT. (1997). *Pavimentos flexíveis - Regularização do subleito - Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ES299-97.pdf>.
- DNIT. (2010a). *DNIT 139/2010 - ES - Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <http://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit139_2010_es.pdf>.
- DNIT. (2010b). *DNIT 141/2010-ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <https://newroads.com.br/wp-content/uploads/2018/01/dnit141_2010_es.pdf>.
- DNIT. (2016). *IPR - 719 Manual de Pavimentação*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%E7%E3o_05.12.06.pdf>.
- DOMINGUES, F. A. A. (1993). *Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos*. São Paulo.
- EP (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra. 15.03 - Pavimentação. Métodos construtivos*.

- Estradas de Portugal, S.A.
- EMF (2013). *Towards the Circular Economy: economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>>.
- FEREDE, Z.W. 2012. *Prediction of California Bearing Ratio (CBR) value from Index Properties of Soil*. Department Of Civil Engineering. Addis Ababa Institute of Technology (AAIT).
- FORTUNATO, E. M. C. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- FORTUNATO, E.; Paixão, A. (2012). Estudo laboratorial sobre agregados aplicados em vias-férreas utilizando ensaios de carga triaxial cíclica. *Atas do XIII Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa, Portugal.
- FORTUNATO, E.; ROQUE, A. J.; GOMES CORREIA, A. (2018). Comportamento estrutural de um trecho rodoviário construído com agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC). *Atas do 16º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia*. Ponta Delgada, Açores.
- FREIRE, A. C.; Maia, A. *Estado da arte Ibero-Brasileira sobre a aplicação de agregados de escórias de aciaria em misturas betuminosas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Portugal
- GOMES CORREIA, A. et al. (2012). Case Study to Promote the Use of Industrial Byproducts: The Relevance of Performance Tests. *Journal of ASTM International*, Vol. 9, No. 2.
- GERDAU. (2019). *Conhecendo o Forno Elétrico a Arco*. Disponível em: <<http://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/conhecendo-o-forno-eletrico-a-arco>>.
- HAYNES, J. H.; YODER, E. J. (1963). *Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used in the AASHO road test*. Highway Research Record No. 39, Highway Research Board, Washington, D.C., USA.
- INDRATNNA, B. et al. (2019). Compaction, degradation and deformation characteristics of an energy absorbing matrix. *Transportation Geotechnics*, Vol. 19, p. 74-83.
- INDRATNNA, B.; QI, Y.; HEITOR, A. (2018). Evaluating the Properties of Mixtures of Steel Furnace Slag, Coal Wash, and Rubber Crumbs Used as Subballast. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 30, No. 1.
- IP. (2019). GR.IT.VIA.015 - Especificações técnicas para fornecimento de balastro novo; *Instrução Técnica*. Infraestruturas de Portugal, Lisboa.
- JORGE, L. C. D. L. (2014). *Constituição, dimensionamento e conservação de pavimentos para baixos volumes de tráfego*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal.
- JUNIOR, E. P. (2014). *Manual de Obras Rodoviárias e Pavimentação Urbana: Execução e Fiscalização*. São Paulo: PINI.
- KAUSEL, E. (2008). *Fundamental of Waves Propagation, in Advanced Soil Dynamics*.
- KNAPTON, J. (1976). *The design of concrete block roads*. UK - Londres, CCA.
- LIMA, N. P.; NASCIMENTO, J. F.; FILHO, V. P. V. e C. A. V. ALBERNAZ (2000). Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria. *Anais da X Reunião de Pavimentação Urbana*, ABPv, Uberlândia.
- MALANCONI, M. (2013). *Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano*. Dissertação de Mestrado em

- Engenharia Urbana. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- MARCOS, F. A. B. (2016). *Estudo do comportamento dinâmico de misturas de solos com resíduos de borracha*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- MERLIN, C. B. (2020). Life cycle assessment of waste tyre treatments: Material recycling vs. co-incineration in cement kilns. Force Technology, Brøndby. Disponível em: <http://www.genan.dk/wp-content/uploads/2020/10/LCA-report_Genan_Executive-Summary_2020.pdf>.
- MINHOTO, M. (2005). *Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga.
- NABAIS, R. J. S. (org.) (2014). *Manual básico de engenharia ferroviária*. São Paulo: Oficina de Textos.
- National Cooperative Highway Research Program. (2001). *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*. Illinois.
- Ore (1983). *Adaptation optimale de la voie classique au trafic de l'avenir*. Rapport No. 29, Utrecht.
- PAIVA, C. E. L. (2016). *Super e infraestruturas de ferrovias: critérios para projetos*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- PEREIRA, M. M. L. (2010). *Índice volumétrico vazios-cimento para avaliação de propriedades de deformabilidade e resistência em age para infra-estruturas de transporte*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- PHANYAKIT, T.; SATIENNAM, T. (2018). Track-quality index and degradation of railway track structure: The construction track doubling project of northeast line from thanon chira junction to khon kaen station, Thailand. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 192, No. 02022.
- REFER (2007). IT.GEO.006 - Características técnicas do sub-balastro; Instrução Técnica. Rede Ferroviária Nacional, EPE, Lisboa.
- REHMAN, A.; FAROOQ, K; MUJTABA, H. (2017). Prediction of California Bearing Ratio (CBR) and compaction characteristics of granular soils. *Acta Geotechnica Slovenica*, Vol. 14, No. 1, p. 63-72.
- RIOS, S. et al. (2016). Misturas de solo-borracha para isolamento de vibrações. Atas do 15º Congresso Nacional de Geotecnia e 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Porto, Portugal.
- ROHDE, Luciana et al. (2003) *Escória de Aciaria Elétrica: Uma Alternativa aos Materiais Granulares Tradicionais*. Revista transportes, Vol. XI, p. 13-18.
- SADIO, D. (2013), "Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro", Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- SNCF (1995). *Fournitures De Granulats Utilises Pour La Realisation Et L'entratien Des Voies Ferrees A Usage Electrique*. Spécification Technique (STB-590B).
- SENÇO, W. (1997a). *Manual de Técnicas de Pavimentação*. Vol. I. São Paulo: PINI.
- SENÇO, W. (1997b). *Manual de Técnicas de Pavimentação*. Vol. II. São Paulo: PINI.
- SENÇO, W. (2001). *Manual de Técnicas de Pavimentação*. Vol. II. São Paulo: PINI.

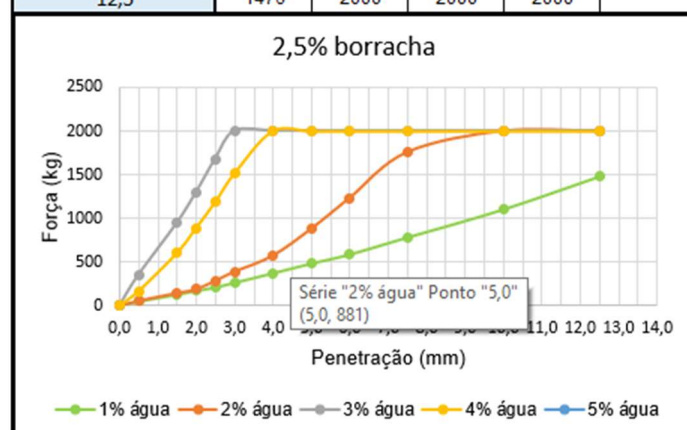
- SIGNES, C. H. et al. (2015). Characterisation of an unbound granular mixture with waste tyre rubber for subballast layers. *Materials and Structures*, Vol. 48, p. 3847-3861.
- SHERWOOD, P. T. (1995). *Alternative materials in road construction*. London.
- SIGNES, C. H. et al. (2017). Analysis of the vibration alleviation of a new railway sub-ballast layer with waste tyre rubber. *Materials and Structures*, Vol. 50.
- SILVA, P. F. A. (2008). *Manual de Patologia e Manutenção de Pavimentos*. 2. ed. São Paulo: PINI.
- SILVA, S. R. R. (2011). *A General Framework for the Geomechanical Characterisation of Artificially Cemented Soil*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- SOUZA, Murilo L de. (1981) *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR.
- SOUSA, G. M. (2007). *Estudo experimental de Escórias de Aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.
- WEF (2014). *Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains*. World Economic Forum, Geneva. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf>.
- Worldsteel Association (s.d). *What is steel?* Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/about-steel/steel-facts.html>>.
- ZEGHICHI, L. (2006). The effect of replacement of natural aggregates by slag products on the strength of concrete. *Asian Journal of Civil Engineering* (Building and Housing), Vol. 7, No. 1, p. 27-35.

Anexo I - Curva e valores de CBR para diferentes teores de borracha



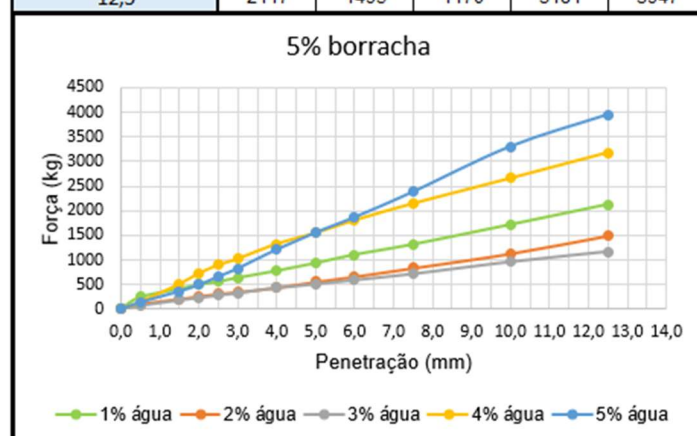
Anexo I - Figura 1 - Curva de forças versus penetração para material ASIC com teor em água ótimo.

ASIC + 2,5% Borracha	Força (kg) com variação no teor em água				
PENETRAÇÃO (mm)	1% água	2% água	3% água	4% água	5% água
0,0	0	0	0	0	
0,5	49	57	353	166	
1,5	127	146	947	601	
2,0	170	189	1295	887	
2,5	210	286	1678	1185	
3,0	263	390	2000	1512	
4,0	371	574	2000	2000	
5,0	483	881	2000	2000	
6,0	586	1233	2000	2000	
7,5	780	1758	2000	2000	
10,0	1101	2000	2000	2000	
12,5	1476	2000	2000	2000	



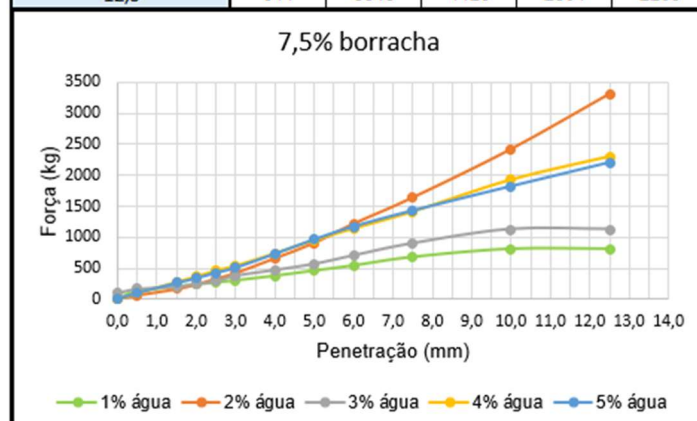
Anexo I - Figura 2 - Curva de forças versus penetração para material ASIC para 2,5% de teor em borracha.

ASIC + 5% Borracha	Força (kg) com variação no teor em água				
PENETRAÇÃO (mm)	1% água	2% água	3% água	4% água	5% água
0,0	0	0	0	0	0
0,5	243	102	73	146	141
1,5	413	204	184	510	364
2,0	495	257	233	723	490
2,5	558	311	282	898	660
3,0	636	345	330	1024	825
4,0	777	437	432	1325	1209
5,0	932	553	510	1549	1553
6,0	1102	660	592	1806	1864
7,5	1311	835	718	2146	2379
10,0	1709	1131	961	2660	3299
12,5	2117	1495	1170	3181	3947



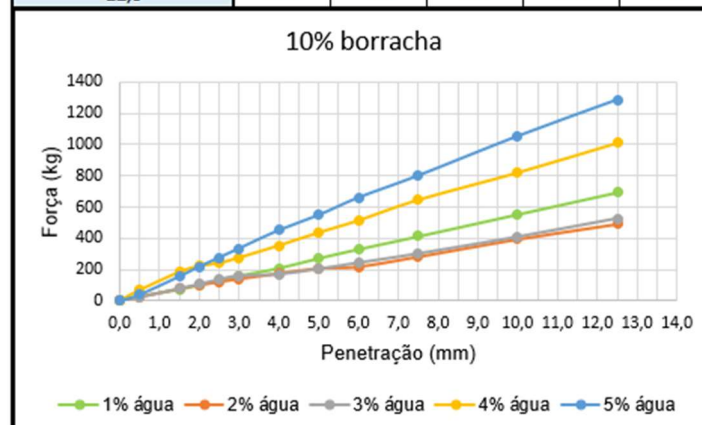
Anexo I - Figura 3 - Curva de forças versus penetração para material ASIC para 5% de teor em borracha

ASIC + 7,5% Borracha	Força (kg) com variação no teor em água				
PENETRAÇÃO (mm)	1% água	2% água	3% água	4% água	5% água
0,0	0	0	97	0	0
0,5	136	63	165	97	102
1,5	204	165	204	277	262
2,0	243	238	248	364	340
2,5	272	330	286	461	427
3,0	306	422	379	539	510
4,0	379	660	471	738	733
5,0	461	908	568	951	966
6,0	544	1218	704	1141	1175
7,5	680	1641	898	1413	1432
10,0	811	2422	1126	1927	1825
12,5	811	3313	1126	2301	2209



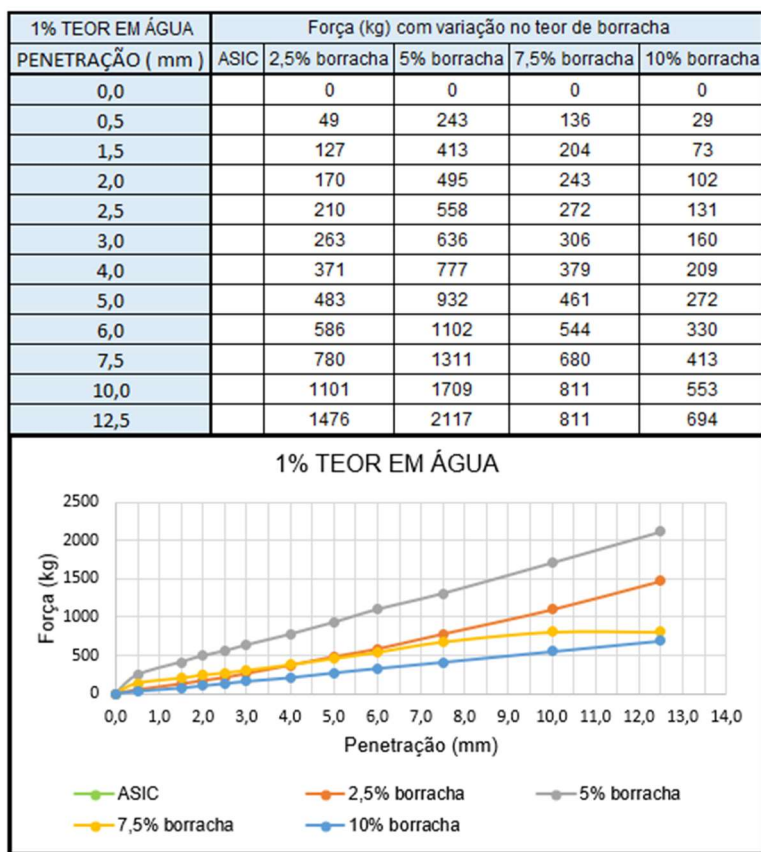
Anexo I - Figura 4 - Curva de forças *versus* penetração para material ASIC para 7,5% de teor em borracha.

ASIC + 10% Borracha	Força (kg) com variação no teor em água				
PENETRAÇÃO (mm)	1% água	2% água	3% água	4% água	5% água
0,0	0	0	0	0	0
0,5	29	24	24	68	39
1,5	73	78	78	184	155
2,0	102	102	107	223	218
2,5	131	121	136	243	277
3,0	160	141	160	277	335
4,0	209	175	170	354	451
5,0	272	209	204	437	549
6,0	330	218	243	515	660
7,5	413	282	301	646	801
10,0	553	393	408	820	1053
12,5	694	490	524	1010	1286

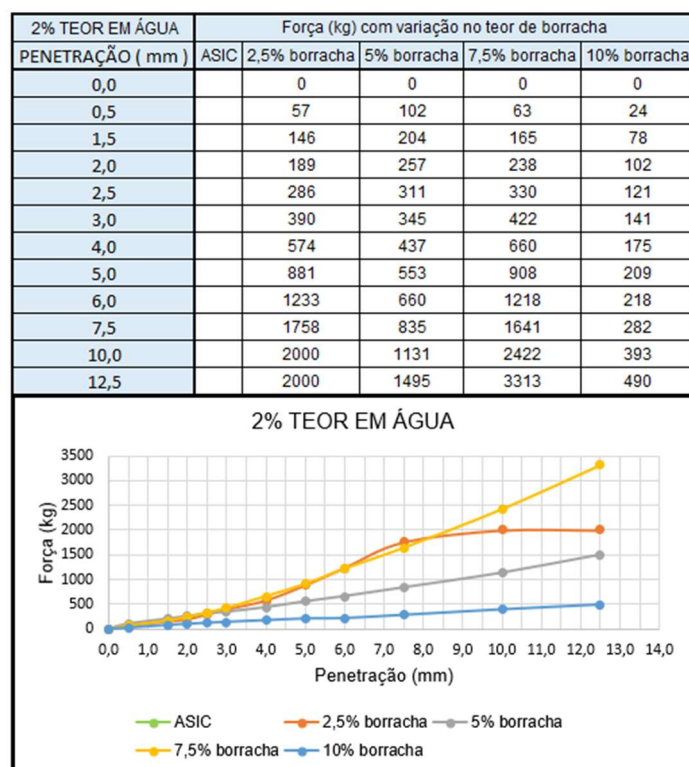


Anexo I - Figura 5 - Curva de forças *versus* penetração para material ASIC para 10% de teor em borracha.

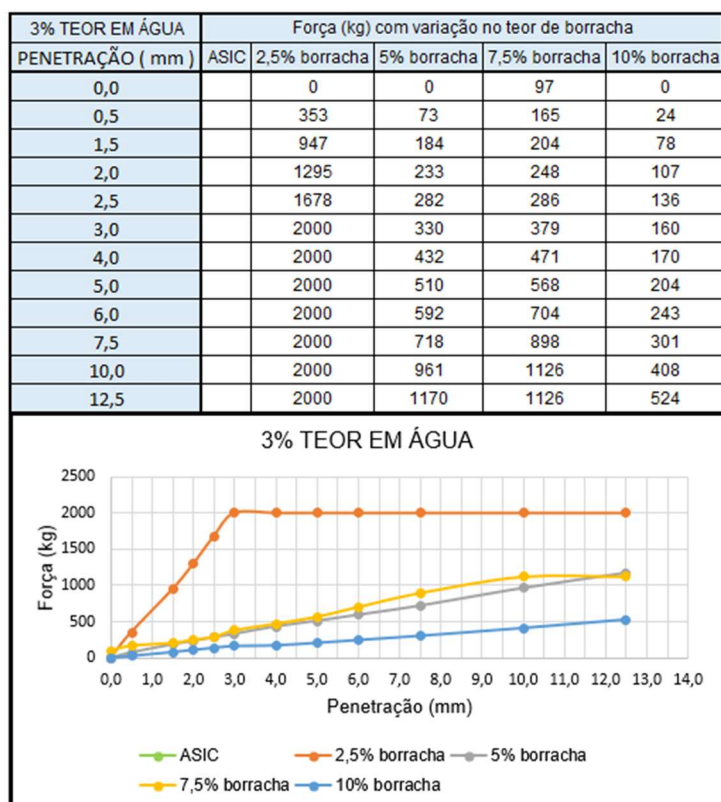
Anexo II - Curva e valores de CBR para diferentes teores em água



Anexo II - Figura 6 - Curva de forças *versus* penetração para composição de ASIC e borracha com 1% do teor em água.

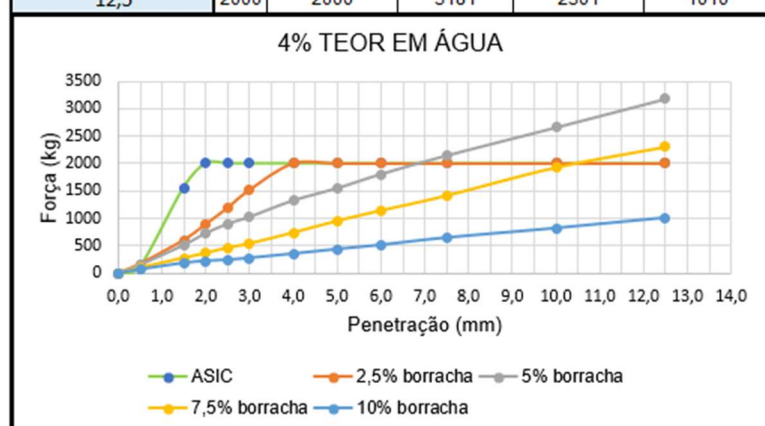


Anexo II - Figura 7 - Curva de forças *versus* penetração para composição de ASIC e borracha com 2% do teor em água.



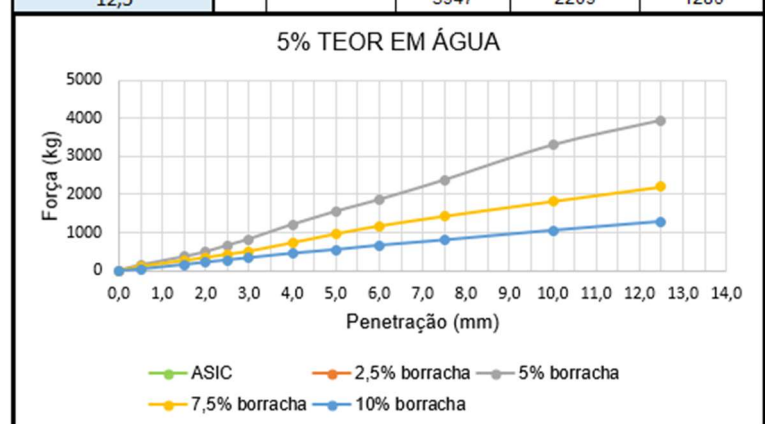
Anexo II - Figura 8 - Curva de forças *versus* penetração para composição de ASIC e borracha com 3% do teor em água.

4% TEOR EM ÁGUA	Força (kg) com variação no teor de borracha				
PENETRAÇÃO (mm)	ASIC	2,5% borracha	5% borracha	7,5% borracha	10% borracha
0,0	0	0	0	0	0
0,5	110	166	146	97	68
1,5	1557	601	510	277	184
2,0	2000	887	723	364	223
2,5	2000	1185	898	461	243
3,0	2000	1512	1024	539	277
4,0	2000	2000	1325	738	354
5,0	2000	2000	1549	951	437
6,0	2000	2000	1806	1141	515
7,5	2000	2000	2146	1413	646
10,0	2000	2000	2660	1927	820
12,5	2000	2000	3181	2301	1010

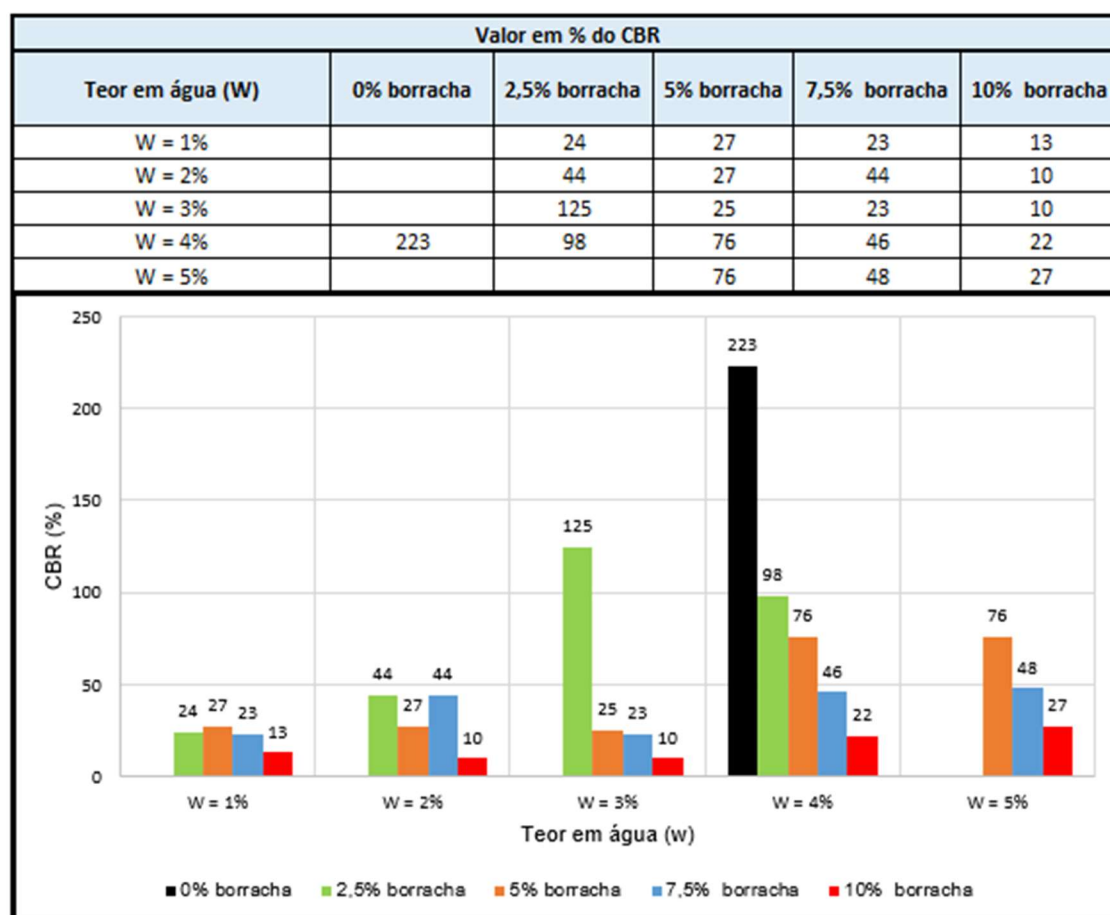


Anexo II - Figura 9 - Curva de forças versus penetração para composição de ASIC e borracha com 4% do teor em água.

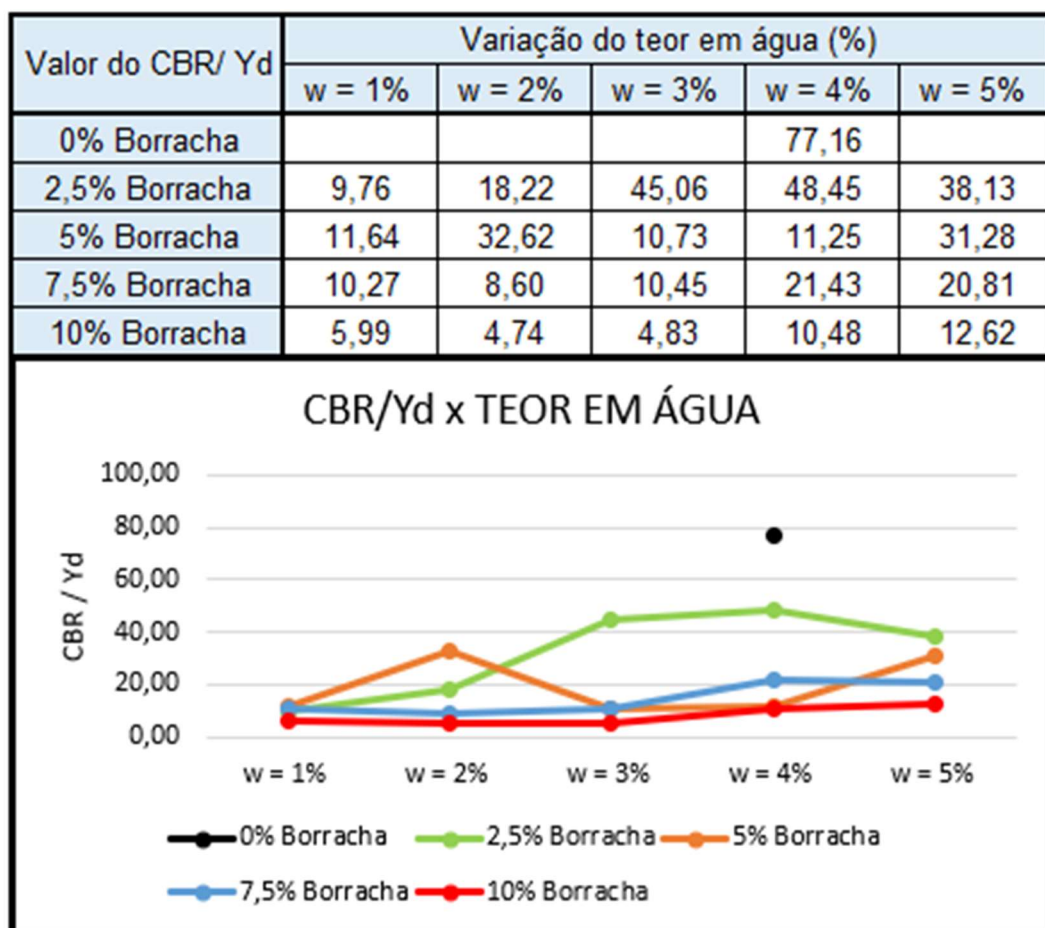
5% TEOR EM ÁGUA	Força (kg) com variação no teor de borracha				
PENETRAÇÃO (mm)	ASIC	2,5% borracha	5% borracha	7,5% borracha	10% borracha
0,0			0	0	0
0,5			141	102	39
1,5			364	262	155
2,0			490	340	218
2,5			660	427	277
3,0			825	510	335
4,0			1209	733	451
5,0			1553	966	549
6,0			1864	1175	660
7,5			2379	1432	801
10,0			3299	1825	1053
12,5			3947	2209	1286



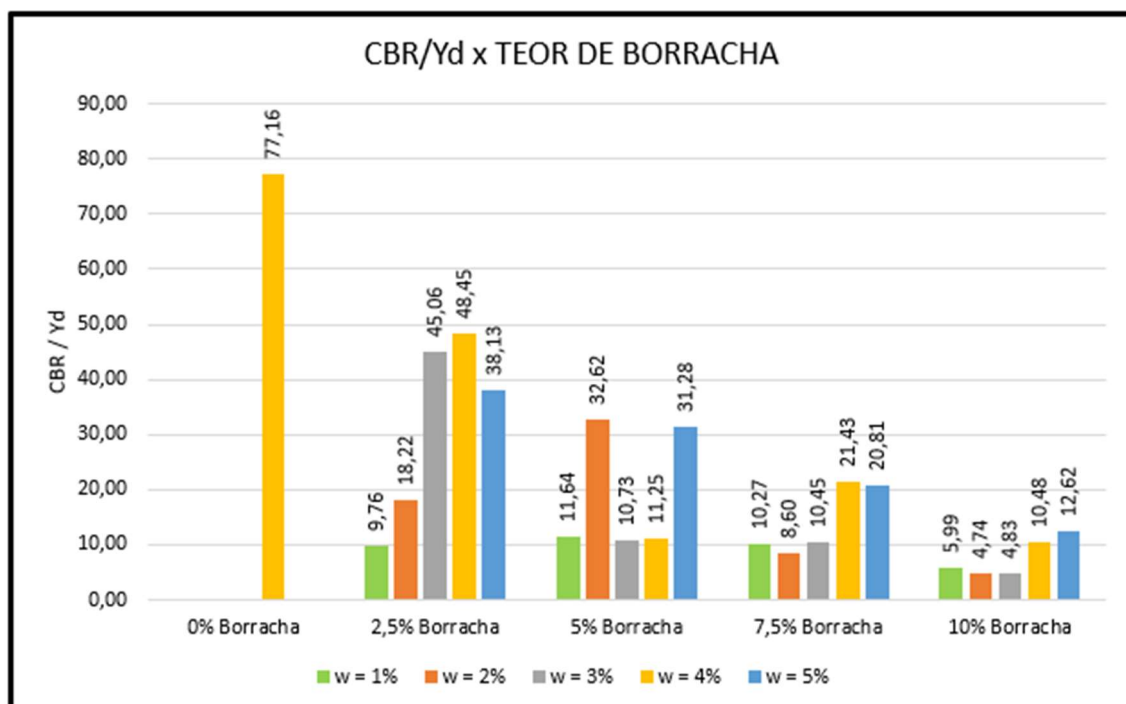
Anexo II - Figura 10 - Curva de forças versus penetração para composição de ASIC e borracha com 5% do teor em água.



Anexo II - Figura 11 - Valores do CBR para cada % de borracha e água (w).

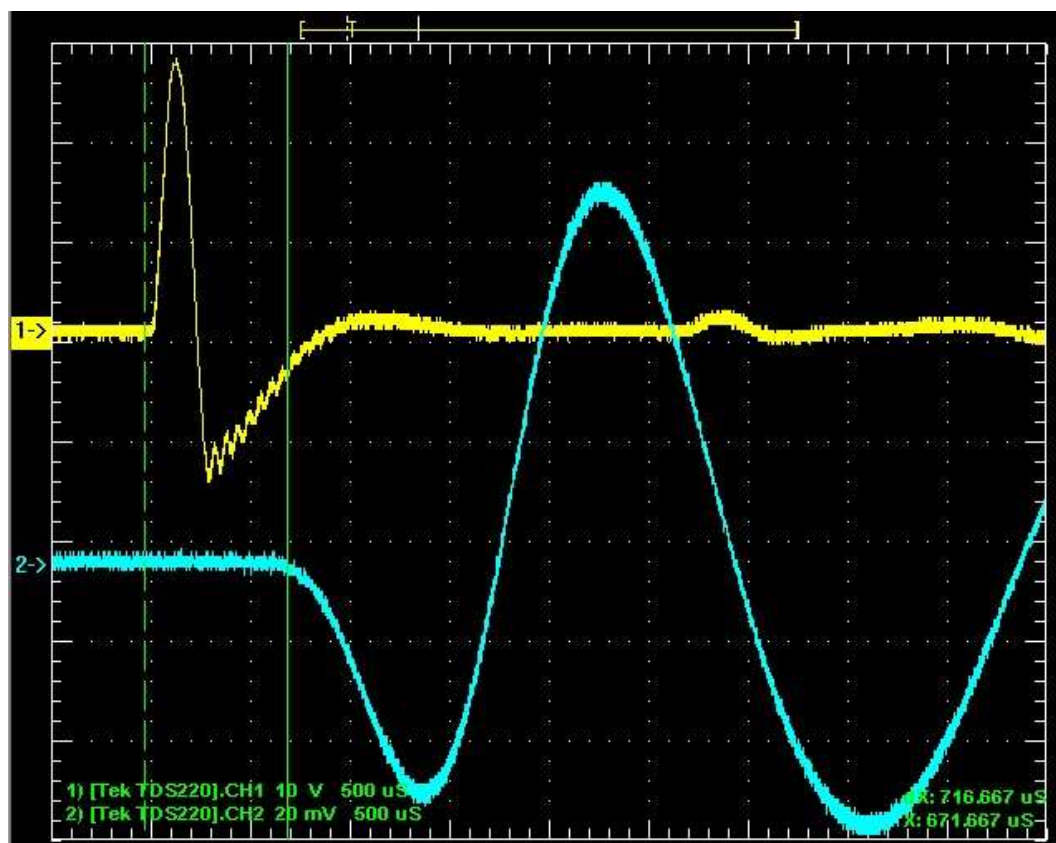


Anexo II - Figura 12 - Curva do CBR/Yd para cada determinada percentagem do teor em água (w).

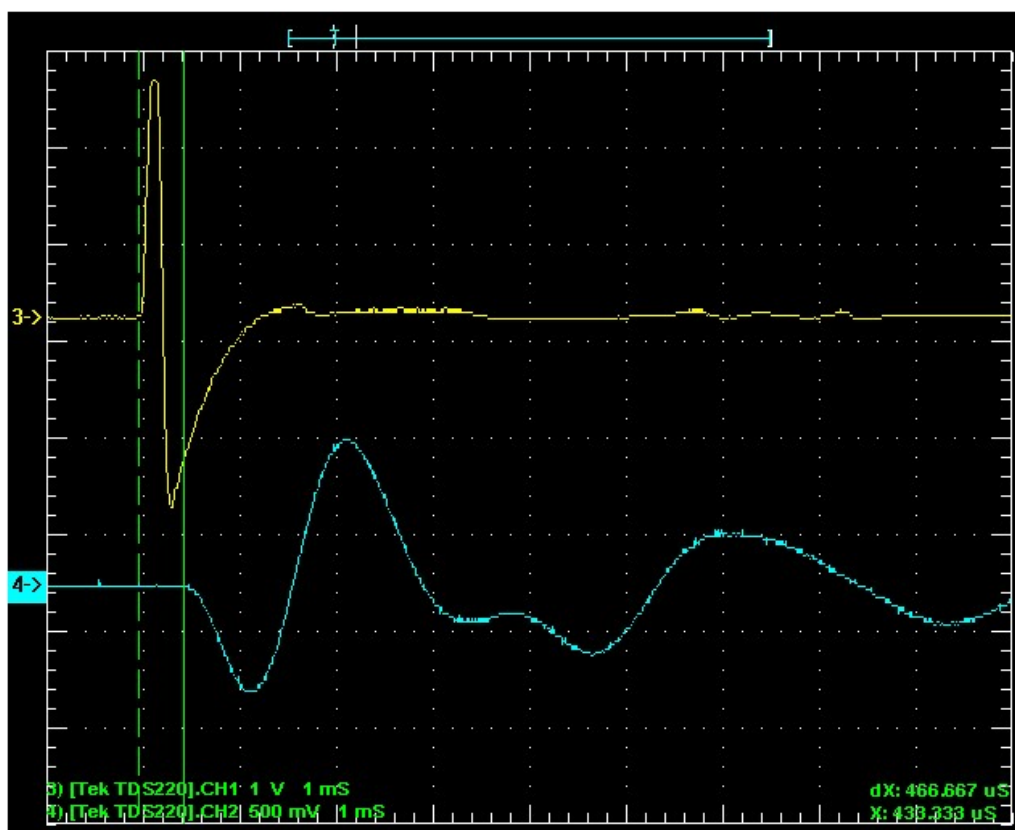


Anexo II - Figura 13 - Curva do CBR/Yd para cada determinada percentagem do teor de borracha.

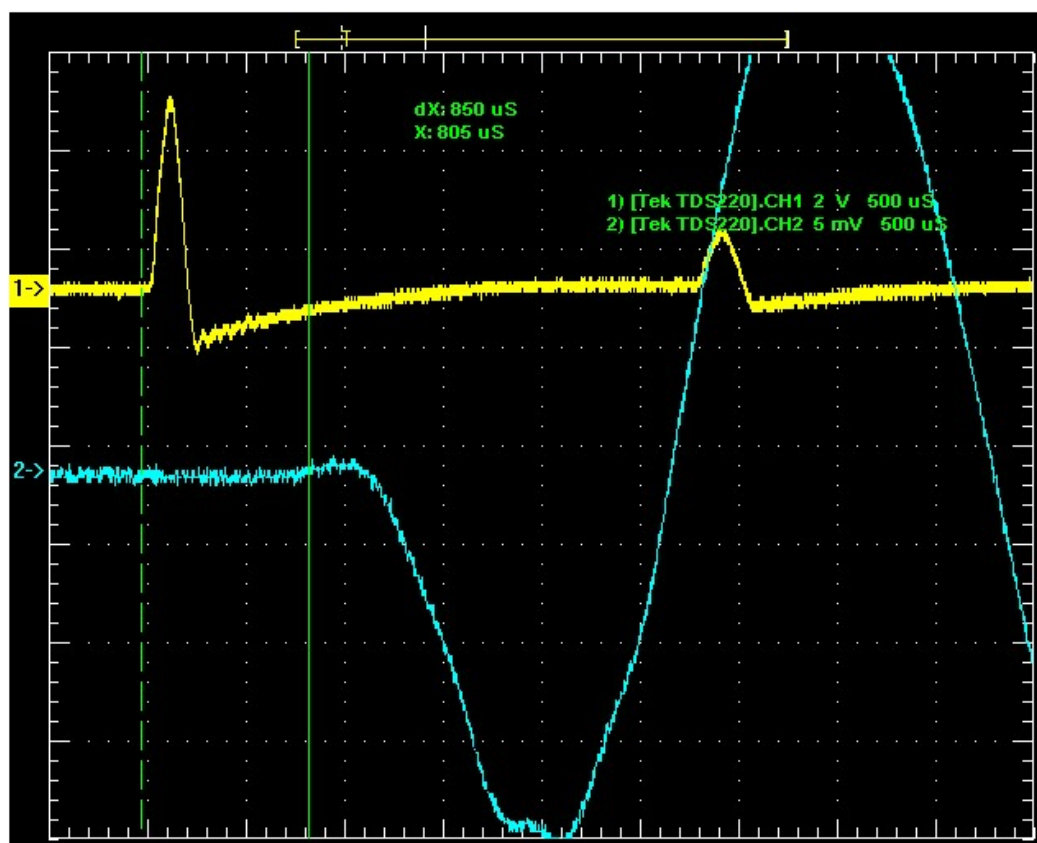
Anexo III - Resultados dos ensaios de ondas P



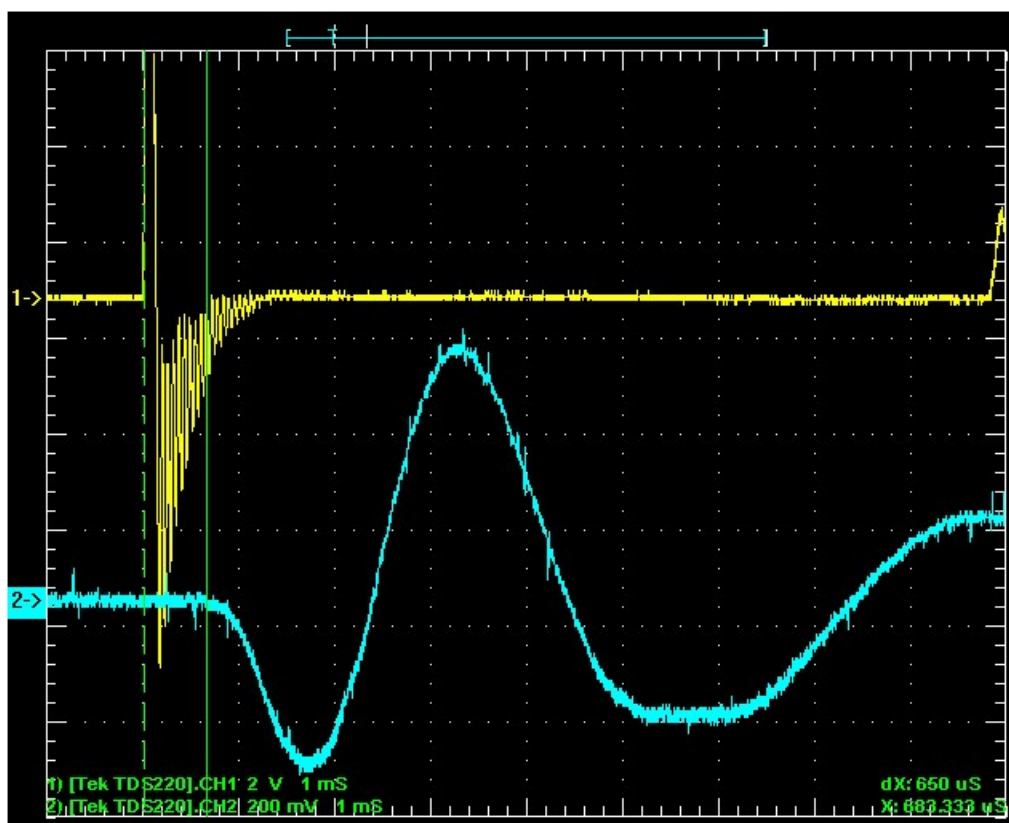
Anexo III - Figura 14 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC.



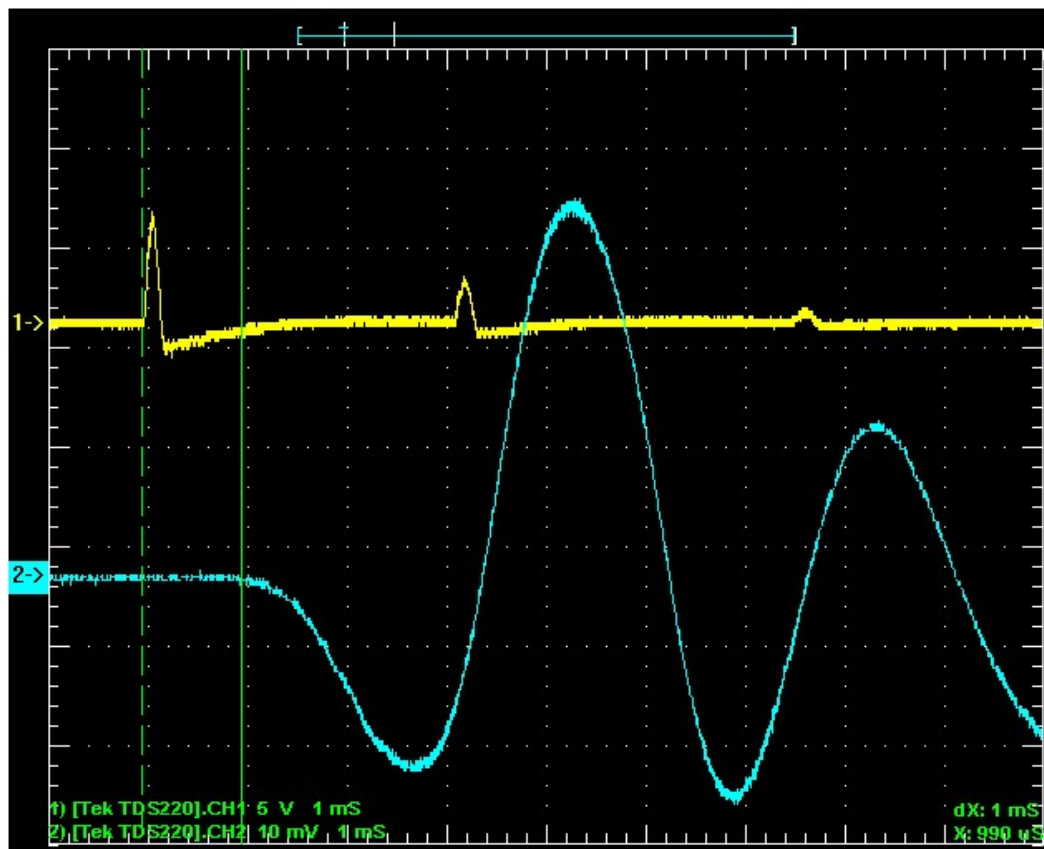
Anexo III - Figura 15 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 2,5% de borracha.



Anexo III - Figura 16 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 5% de borracha.

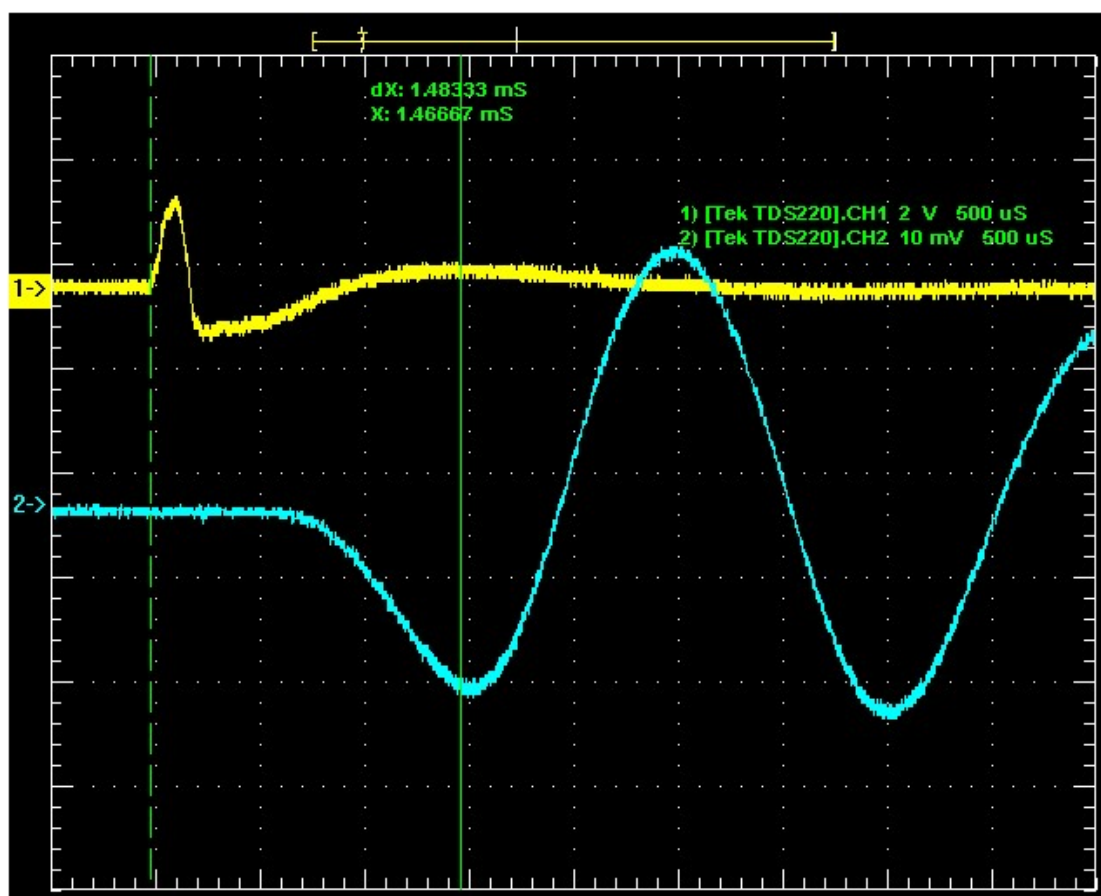


Anexo III - Figura 17 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 7,5% de borracha.

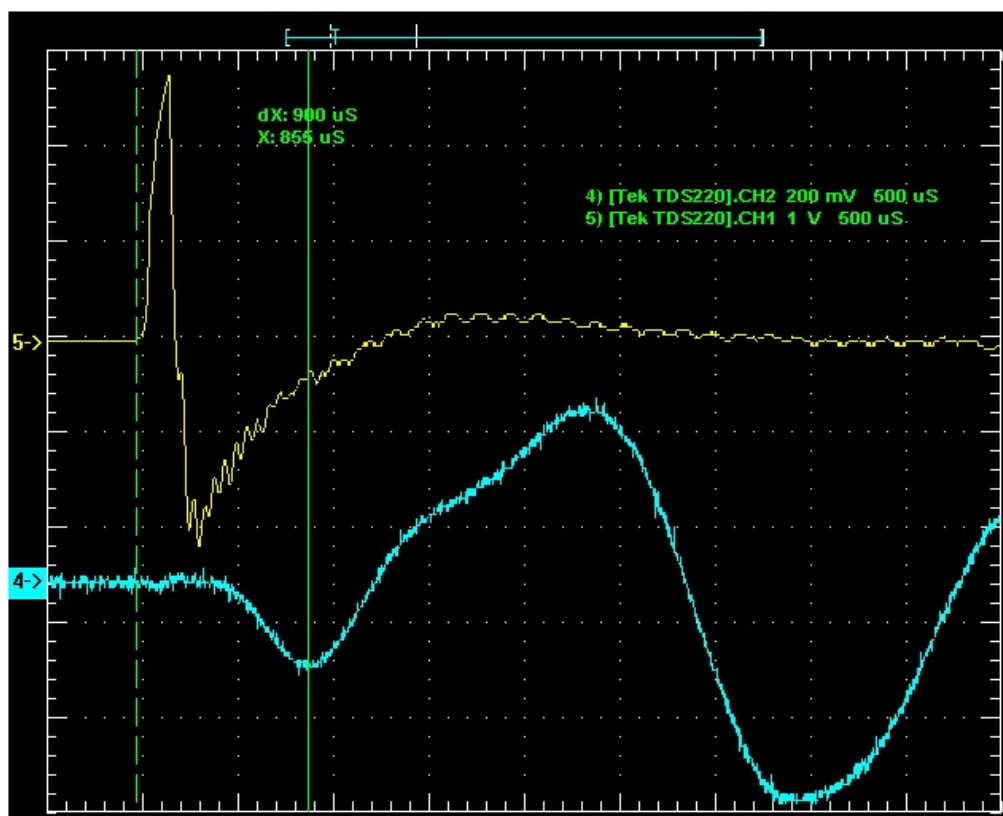


Anexo III - Figura 18 - Configuração de ensaio realizado. Ondas P para uma amostra com ASIC + 10% de borracha.

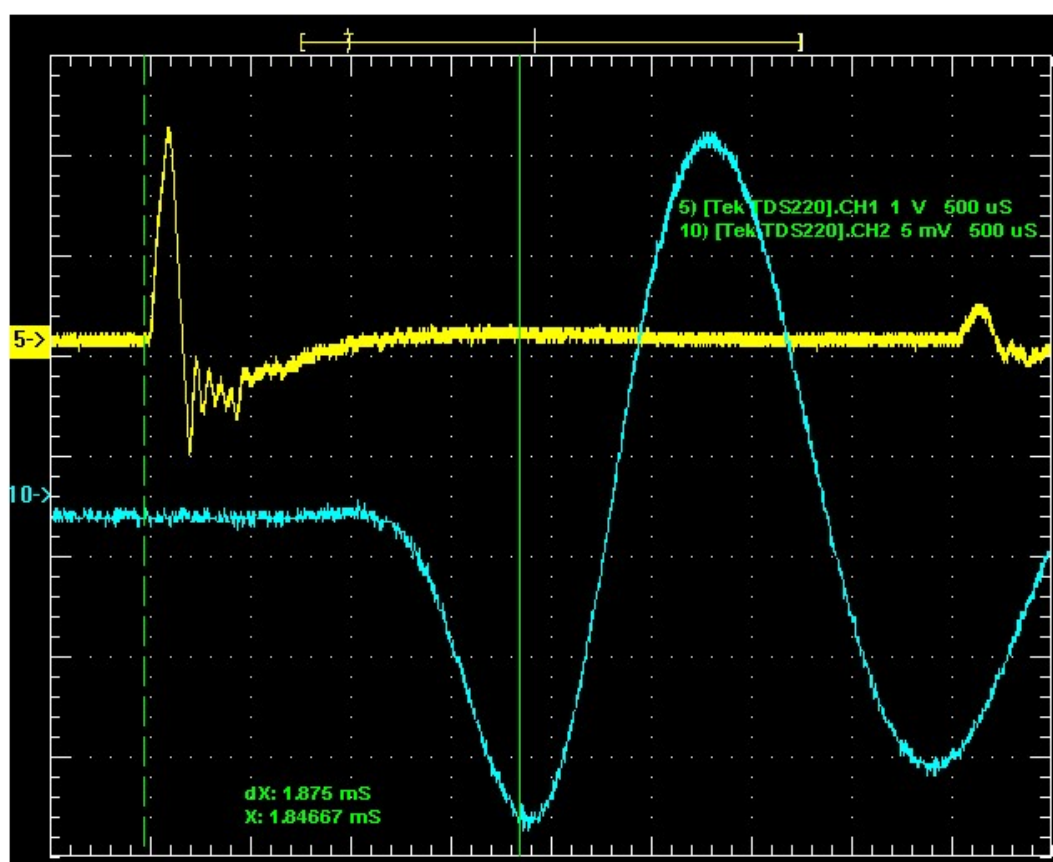
Anexo IV - Resultados dos ensaios de ondas S



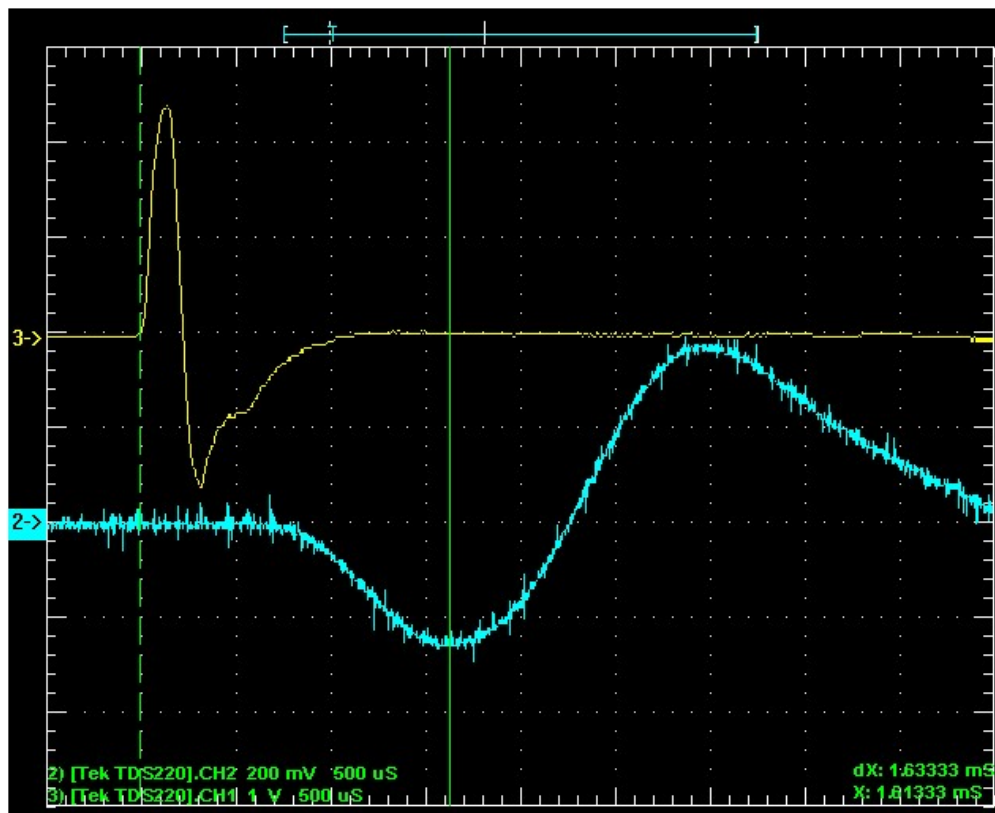
Anexo IV - Figura 19 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC.



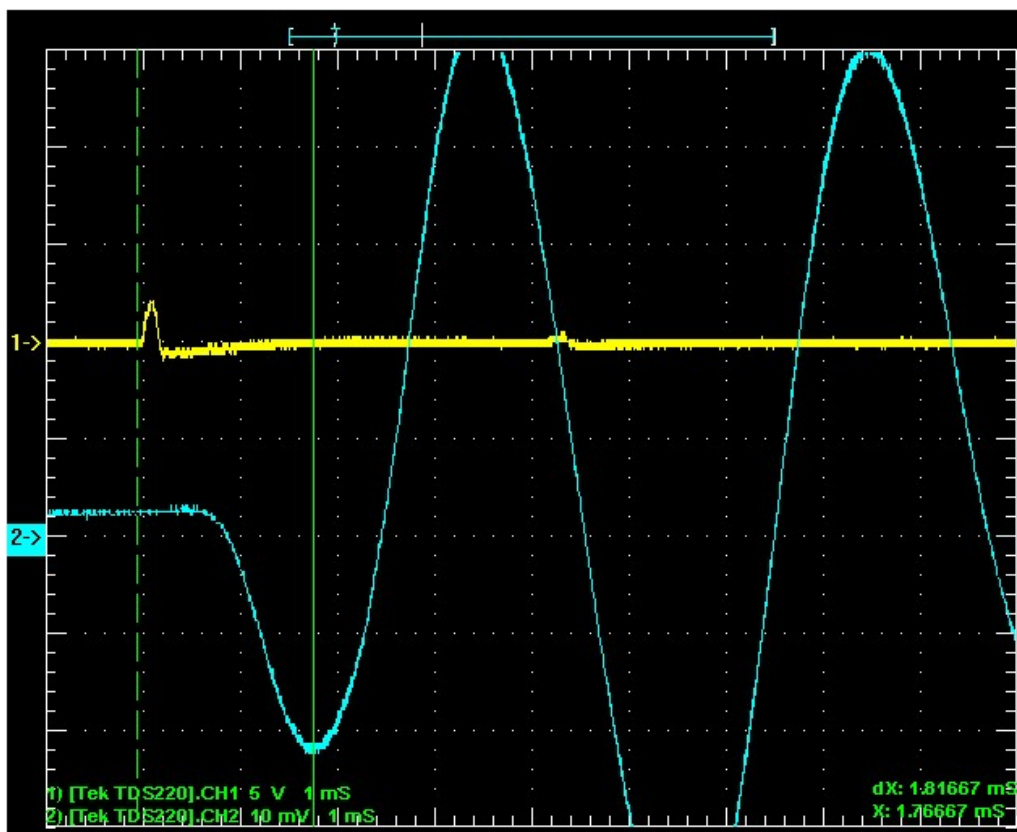
Anexo IV - Figura 20 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 2,5% de borracha.



Anexo IV - Figura 21 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 5% de borracha.



Anexo IV - Figura 22 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 7,5% de borracha.



Anexo IV - Figura 23 - Configuração de ensaio realizado. Ondas S para uma amostra com ASIC + 10% de borracha.