

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

DOUGLAS DE OLIVEIRA JOAQUIM

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS PRÉ-
MOLDADAS DE CONCRETO ASFÁLTICO E SUA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO QUANTO ÀS
TENSÕES CISALHANTES**

**VITÓRIA
2019**

DOUGLAS DE OLIVEIRA JOAQUIM

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS PRÉ-
MOLDADAS DE CONCRETO ASFÁLTICO E SUA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO QUANTO ÀS
TENSÕES CISALHANTES**

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

Orientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira
Pires

**VITÓRIA
2019**

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

J62p Joaquim, Douglas de Oliveira, 1991-
Proposta de desenvolvimento de peças pré-moldadas de
concreto asfáltico e sua avaliação de desempenho quanto às
tensões cisalhantes / Douglas de Oliveira Joaquim. - 2019.
115 f. : il.

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

1. Pavimentos de asfalto. 2. Pavimentos de concreto
asfáltico. I. Pires, Patrício José Moreira. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

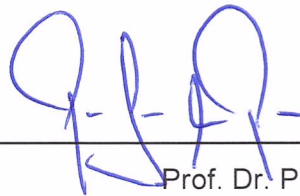
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO ASFÁLTICO E SUA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO QUANTO AS TENSÕES CISALHANTES

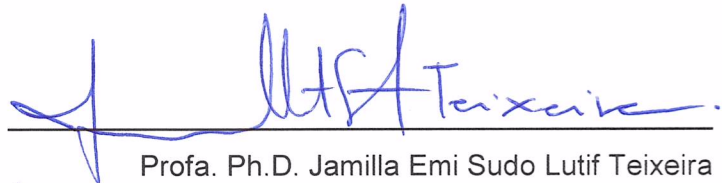
Douglas de Oliveira Joaquim

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

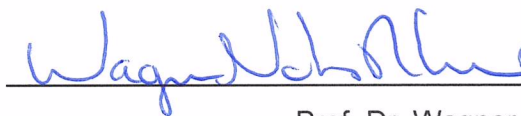
Aprovada no dia **30 de agosto de 2019** por:



Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Orientador – UFES



Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Interna - UFES



Prof. Dr. Wagner Nahas Ribeiro
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Externo - UFES

Vitória – ES, agosto de 2019

“Muitas das coisas mais importantes do mundo foram conseguidas por pessoas que continuaram tentando quando parecia não haver mais nenhuma esperança de sucesso. ”

Dale Carnegie.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

A meus pais Marcos e Niuza pelo amor, apoio e educação ao longo de minha vida sem medir esforços ao me apoiarem.

A minha irmã Dayala por me tornar sua referência e fazer com que juntos alcancemos patamares inimagináveis. Obrigado por acreditar em mim.

Aos meus avós Luzia e Sebastião que a cada dia me mostram como o amor e a vida são dádivas divinas.

Aos colegas de graduação que se tornaram grandes amigos e que levo para vida: Neemias, Caio, Mateus, Bruno, Gustavo, Robson, Gilmarc. Obrigado 'mitos' por crescer na companhia de vocês.

Aos colegas e amigos companheiros de CT Junior e Semana da Engenharia que foram fundamentais para que despertasse em mim a curiosidade pelo empreendedorismo e inovação.

Aos amigos de infância meu eterno agradecimento por estarem comigo nessa jornada. A Leticia pelo apoio nos momentos difíceis durante o desenvolvimento dessa dissertação. Ao Evinilton meu irmão e colega de trabalho.

Ao querido professor, orientador e amigo Patrício por ser referência como pessoa e profissional incentivando constantemente o desenvolvimento deste trabalho com dedicação e competência. Obrigado pelos conselhos de vida.

A professora Jamilla por sempre estar disposta ajudar e contribuir com o enriquecimento do trabalho. Obrigado pelo carinho e contribuição.

Ao professor Wagner por participar da banca avaliadora e contribuir de forma enriquecedora para o trabalho.

Aos técnicos Natália e Sidineidy, por me aturarem no laboratório por tanto tempo e por todo auxílio prestado nos ensaios.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Peças Pré-moldadas de Concreto Asfáltico (PPCA) são elementos já empregados em alguns países dada as suas vantagens quanto ao comportamento flexível, a possibilidade de estocagem em temperatura ambiente e sua aplicação simplificada em relação ao pavimento asfáltico convencional. No Brasil, o uso de PPCA ainda é pouco difundido pela falta de estudos e conhecimento sobre a tecnologia. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método de moldagem das PPCA através de amassamento por prensa hidráulica e a avaliação de suas características mecânicas e volumétricas em relação àqueles obtidos em CPS compactados por impacto por métodos convencionais. Foram avaliados dois tipos de Misturas asfálticas sendo uma com 100% de agregados naturais e outra com adição de 25% de escória de aciaria LD em suas composições. O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70. Foi avaliada a influência do método de compactação (por impacto e por amassamento) nas propriedades volumétricas e mecânicas de corpos de prova Marshall e PPCA. Os parâmetros volumétricos das PPCA apresentaram um aumento em relação aos obtidos tanto na metodologia de moldagem marshall quanto nas peças com adição de escória LD. Ensaio de cisalhamento direto foram executados a fim de se obter a tensão cisalhante no contato das PPCA com a base e no contato entre as próprias peças para efeito de comparação com o ensaio de arrancamento. Testes mecânicos foram efetuados nas PPCA para efeito de comparação evidenciando uma boa estabilidade e resistência a tração indicando a aplicação das PPCA como uma tecnologia viável na obtenção de pavimento modular.

Palavras chave: Peças Pré-moldadas de concreto asfáltico, escória de aciaria, estabilidade.

ABSTRACT

Precast Asphalt Concrete Parts (PPCA) are known around the world for the advantages of flexible handling, storage and simplified application over conventional asphalt pavement. Due to its limited research, the mechanical characteristics of the PPCA were evaluated in comparison to the conventional asphalt pavement. The objective of this project was to develop a method of manufacturing the PPCA through hydraulic press kneading and the evaluation of its mechanical and volumetric characteristics in relation to the asphalt pavement, as well as PPCAs developed around the world. The research contents include the blending project through the marshall methodology that was used as a reference parameter for the development of PPCAs. Asphalt mixtures with CAP 50/70, 100% natural aggregates and mixtures with 25% LD melt slag in their compositions were evaluated. The volumetric parameters of the PPCA presented an increase in relation to those obtained both in the marshall molding methodology and in the pieces with the addition of slag LD. Direct shear tests were performed in order to obtain the shear stress on the contact of the PPCA with the base and on the contact between the parts themselves for comparison with the pullout test. Mechanical tests were performed on PPCA for comparison purposes showing good stability and tensile strength indicating the application of PPCA as a viable technology in obtaining modular flooring.

Keywords: Precast asphalt concrete parts, steel slag, stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações de PPCA nos EUA: (a) <i>Praça Kendall em Cambridge, MA;</i> (b) <i>Residência privada em Andover, MA;</i> (c) <i>Genzyme Corporation, Cambridge,</i> <i>MA ;</i> (d) <i>Capital Gallery, Washington, DC.</i>	24
Figura 2 – Prensa hidráulica para confecção de PPCA: (A) Prensa hidráulica; (B) Detalhe formas.	30
Figura 3 – Extração das PPCA: (A) Extrusora; (B) PPCA com espessura de 8cm.	30
Figura 4 – Máquina para moldagem de PPCA por amassamento de roda: (A) Equipamento; (B) Detalhe forma e simulador de roda.	31
Figura 5 – PPCA reforçada: (a) posicionamento do geogrid na PPCA; (b) Detalhe do geogrid.	32
Figura 6 – PPCA após moldagem: (A) antes do corte; (B) após corte em peças de 15cm x 15cm.	32
Figura 7 – Espessura das juntas de assentamento de PPCA: (A) 3mm; (B) 2mm; (C) 0mm.	33
Figura 8 – Ensaio de Flexão em PPCA a 20°C.	34
Figura 9 – Esquema de extração de PPC pelo ensaio <i>pull-out</i>	36
Figura 10 – Equipamento para o ensaio <i>pull-out</i>	36
Figura 11 – Relação entre força de extração e deslocamento no ensaio <i>pull-out</i>	37
Figura 12 – Pull-out teste m pavimento antigo: (A) Operador do macaco hidráulico; (B) PPC central a ser extraída.	37
Figura 13 - Pull out Test: (A) juntas de 0mm e; (B) 3mm.	38
Figura 14 – Deslocamento vertical das PPCA no ensaio pull-out conforme espessura das juntas de assentamento.	39

Figura 15 – Interconexões das PPCA com juntas de 0mm	39
Figura 16 - Deslocamento vertical no ensaio <i>pull-out</i> conforme espessura das PPCA	40
Figura 17 - Vista esquemática do concreto de areia e asfalto na caixa de teste de cisalhamento direto.	41
Figura 18 – Molde de fabricação e amostras de mistura asfáltica com uma placa de aço utilizadas no ensaio de cisalhamento	42
Figura 19 - Diagrama esquemático mostrando a posição carregamento antes e depois do teste	43
Figura 20 – Ensaio de pull-out adaptado em prensa de cisalhamento direto ...	44
Figura 21 – Ensaio de arrancamento de geossintético em contato com areia .	45
Figura 22- Processo de produção do aço	47
Figura 23 – Efeitos provocados pela expansão da escória em pavimentos asfálticos: (A)vulcãozinho; (B) fissura longitudinal; (C)quebra-molas.....	54
Figura 24 – Estabilidade Marshall para as misturas estudadas	54
Figura 25 - Módulo de Resiliência (MR) das misturas estudadas	55
Figura 26 - Resistência à Tração das misturas estudadas.....	56
Figura 27 – Fluxograma do programa experimental.....	58
Figura 28 - Agregados Naturais	60
Figura 29 - Escória LD	61
Figura 30- Frações granulométricas utilizadas na pesquisa	62
Figura 31 – Moinho de bolas para determinação da abrasão Los Angeles.....	63
Figura 32 – Forma PPCA inicial: (A) Durante processo de produção de PPCA; (B) Deformação no macho.	65
Figura 33 - Molde para PPCA: (A) Projeto; (B) Forma usinada.....	66
Figura 34 – Preparação das misturas asfálticas: (A) Aquecimento de CAP e agregados; (B) Pesagem do CAP no teor de projeto; (C) Homogeneização de mistura no fogão; (D) Condicionamento de curto prazo.	67

Figura 35 – Equipamentos de moldagem de CP's: (A) Prensa de moldagem por amassamento das PPCA; (B) Macaco extrator das PPCA; (C) PPCA finalizadas.	69
Figura 36 – Moldagem e extração dos CP's que representam as PPCA.	70
Figura 37 – Processo de moldagem por amassamento das PPCA.....	70
Figura 38 – Prensa para análise de estabilidade Marshall.....	72
Figura 39 – Ensaio de Tração por compressão diametral.....	73
Figura 40 – Ensaio de Determinação de resistência a tração por compressão diametral de CP com adição de 25% de escória.....	74
Figura 41 – Ensaio de Cisalhamento Direto: Caixa de cisalhamento.....	76
Figura 42 – Caixa de cisalhamento: (A) Parte Superior; (B) Representação do contato entre PPCA.....	77
Figura 43 – Tensão cisalhante de ruptura.....	78
Figura 44 - Variação da inclinação α em função do deslocamento para a mistura com 0% de escória LD no contato PPCA-base adensada com 100 kPa.	79
Figura 45 – Ensaio de Flexão das PPCA de 35mm e 70mm.	81
Figura 46 – Curvas granulométricas para cada agregado utilizado na pesquisa	84
Figura 47 - (A)Agregado Natural; (B)Combinação de 25% de Escória LD e 75% de Agregado Natural; (C)Escória LD.....	86
Figura 48 – Composição granulométrica das misturas estudadas	87
Figura 49 – Curvas granulométricas da faixa AC-25 chinesa e do presente estudo	88
Figura 50 – Tentativas para dosagem Marshall da mistura com 25% de escória LD e 75% de agregados naturais.	89
Figura 51 – Volume de Vazios das amostras estudadas	92
Figura 52 – Relação Betume Vazios para as misturas estudadas	92

Figura 53 – Valores máximos e mínimos de estabilidade para as misturas estudadas.....	94
Figura 54 – Valores máximos e mínimos de resistência a tração para as misturas estudadas.....	95
Figura 55 – Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 0% de escória LD em contato com a camada de base do pavimento.	96
Figura 56 - Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 0% de escória LD em contato com outra PPCA.	97
Figura 57 - Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 25% de escória LD em contato com a camada de base do pavimento.	97
Figura 58 - Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 25% de escória LD em contato com outra PPCA.	98
Figura 59 – Envoltórias de ruptura das superfícies de contato analisadas.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do ligante asfáltico CAP 80/100.....	26
Tabela 2 – Faixas granulométricas utilizadas na produção de PPCA na China: AC : <i>Asphalt Concrete</i> ; 5,13,16,25: Dimensão máxima do agregado na mistura.	26
Tabela 3 – Propriedades do projeto de mistura das PPCA malaias.....	27
Tabela 4 – Projeto de mistura marshall para a faixa AC-25.	28
Tabela 5 – Resistência à Compressão Simples de acordo com a espessura da PPCA	33
Tabela 6 – Resultados do ensaio de Resistência a flexão para as PPCA a 20°C.	34
Tabela 7 – Comportamento mecânico das misturas avaliadas por Wang <i>et al.</i> (2008).....	41
Tabela 8 – Parâmetros de massa específica e absorção para escórias de Aciaria	49
Tabela 9 – Composição química da escória de aço.....	49
Tabela 10 – Propriedades mecânicas típicas da escória de aciaria.....	50
Tabela 11 – Características do CAP 50/70 utilizado neste estudo.....	59
Tabela 12 – Série de peneiras utilizadas na pesquisa	62
Tabela 13 – Massa das amostras utilizadas no ensaio de Abrasão Los Angeles: (A)Agregado Natural; (B)Combinação de 25% de Escória LD e 75% de Agregado Natural; (C)Escória LD	64
Tabela 14 – Valores de massa específica aparente de acordo com o processo de moldagem.....	68
Tabela 15 – Dados das amostras de PPCA utilizadas no ensaio de Flexão	82
Tabela 16 - Resistência característica à compressão	82

Tabela 17 – Porcentagens passantes nas peneiras da norma DNER – ME 083/98 para cada agregado utilizado.	83
Tabela 18 – Massas específicas reais para as misturas utilizadas na pesquisa	85
Tabela 19 - Abrasão Los Angeles: (A)Agregado Natural; (B)Combinação de 25% de Escória LD e 75% de Agregado Natural; (C)Escória LD	85
Tabela 20 – Porcentagem em massa referente a cada agregado nas misturas analisadas	87
Tabela 21 – Limites para camada de rolamento de pavimentos flexíveis	88
Tabela 22 – Parâmetros volumétricos das misturas 0%LD e 25%LD moldadas conforme compactação marshall e por amassamento passa as PPCA	90
Tabela 23 - Resultados dos ensaios mecânicos	93
Tabela 24 - Deslocamentos e tensões de ruptura das amostras.	98
Tabela 25 – Resultados obtidos do ensaio de cisalhamento direto.....	100
Tabela 26 Força normal de ruptura no contato entre as PPCA.....	102
Tabela 27 – Resultados de Resistência a Flexão e Compressão Simples das PPCA	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AC – *Asphalt Concrete*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CAUQ - Concreto Asfáltico Usinado à Quente

CBR – California Bearing Ratio

CNT - Confederação Nacional dos Transportes

CP – Corpo de Prova

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagens

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DPRF – Departamento de Polícia Rodoviária Federal

FHWA - *Federal Highway Administration*

Gmb - Densidade aparente do concreto asfáltico

Gmm - Densidade máxima da mistura asfáltica

HWTD - *Hamburg Wheel-Track Device*

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia

LD - Linz-Donawitz

MTPA - Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil

NBA – Norma Brasileira

NSA – *National Slag Association*

PPC – Peça Pré-moldada de Concreto de Cimento Portland

PPCA – Peça Pré-moldada de Concreto Asfáltico

RBV – Relação Betume/Vazios

RNTRC - Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Carga

RT – Resistência a Tração

VAM – Volume do Agregado Mineral

VV – Volume de Vazios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA	20
1.2. OBJETIVOS	21
1.2.1. Objetivo Geral	21
1.2.2. Objetivos Específicos	21
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO ASFÁLTICO (PPCA)	23
2.1.1. Características Gerais das PPCA	23
2.1.2. Estudos sobre Dosagem e Efeitos da geometria nas propriedades volumétricas e mecânicas de PPCA	25
2.1.3. Propriedades Físicas e Mecânicas de PPCA e misturas asfálticas	32
2.2. ESCÓRIA DE ACIARIA.....	46
2.2.1. Características Gerais	46
2.2.2. Propriedades das escórias de aciaria.....	48
2.2.3. Uso de Escória de Aciaria em camadas de revestimento asfáltico	51
3. MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1. MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL.....	57
3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	59
3.1.2. Agregados Naturais (AN).....	60
3.1.3. Escória LD (Coproduto Revsol Plus)	60
3.2. MÉTODOS	61

3.2.1. Análise Granulométrica	61
3.2.2. Caracterização dos Agregados.....	62
3.2.3. Moldagem das PPCA	64
3.2.4. Propriedades Mecânicas das PPCA.....	71
4. RESULTADOS	83
4.1. DOSAGEM MARSHALL	83
4.1.1. Caracterização dos agregados.....	83
4.1.2. Abrasão Los Angeles.....	85
4.1.3. Dosagem	86
4.2. ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS	93
5. CONCLUSÕES.....	104
5.1. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de proteção ambiental e atual escassez de recursos públicos tornam essenciais os investimentos em pesquisas de novos materiais e novas tecnologias de pavimentação utilizando materiais alternativos e novas metodologias de aplicação. Eles são imprescindíveis para o desenvolvimento sustentável e para a otimização de recursos públicos, especialmente em um país que possui materiais com diversas características regionais e com uma gama rica e diversificada.

A produção de coprodutos e resíduos é significativa no processo de produção de aço. Para cada tonelada de aço bruto produzido, gera-se mais de 607 kg de coprodutos e resíduos, dos quais, aproximadamente, 170 kg são de escória de aciaria, que por sua vez, corresponde cerca de 14,0% em massa da produção de aço mundial (IBS, 2018).

Pesquisas anteriores mostram que o emprego de escória de aciaria em camadas de pavimentos pode ser uma alternativa do ponto de vista técnico, em virtude das propriedades em grande parte serem equivalentes ou superiores aos agregados naturais. Do ponto de vista econômico, é de fácil obtenção nos locais próximos às indústrias geradoras e tornam-se alternativas ambientais quanto à extração de recursos naturais, transformando o rejeito em insumo e reduzindo as pilhas de materiais nos pátios das indústrias.

A pavimentação asfáltica fez com que a utilização de revestimentos modulares de concreto fosse reduzida consideravelmente, restringindo sua utilização em grande parte a pátios de estacionamento, vias urbanas e alguns acessos viários (DNIT, 2006). Segundo Smith (apud CRUZ, 2003), nos Estados Unidos, a cada cinco anos dobra a quantidade em metros quadrados de área aplicada de Peças Pré-moldadas de Concreto (PPC). O que eram quatro milhões de metros quadrados em 1980, em 2000 já atingia a marca de 40 milhões a mais de metros quadrados aplicados. No Brasil, na cidade do Rio de Janeiro, programas de urbanização como o Rio Cidade e Favela Bairro já assentaram mais de 1.000.000 de metros quadrados de pavimentos de peças pré-moldadas na área urbana da cidade, de 1998 a 2003 (CRUZ, 2003).

A forma segmentada dos revestimentos flexíveis por calçamento apresenta vantagens na utilização em trechos de rampas íngremes, promovendo maior aderência aos pneus e aumentando a segurança, principalmente em épocas de chuva. É vantajoso nos trechos urbanos que coincide com zonas densamente povoadas onde são previstos serviços de redes de água e esgotos e em aterros recém-construídos (DNIT, 2006). Além disso, nas localidades mais distantes das metrópoles, a menor disponibilidade de usinas de materiais betuminosos contribui para uma maior aplicação desses pavimentos.

1.1. JUSTIFICATIVA

A utilização dos recursos naturais oriundos das explorações de jazidas e de poços petrolíferos na pavimentação asfáltica, ao aumento do preço dos materiais de construção empregados na execução e a falta de recursos públicos para emprego em vias urbanas traz para o setor de pavimentação a necessidade de combinar soluções de engenharia e preservação do meio ambiente, uma vez que na pavimentação são empregados grandes volumes de materiais.

Por ser um material residual da produção de aço, ou seja, um rejeito, a escória de aciaria atende às necessidades de proteção ambiental e a preservação dos afloramentos rochosos, reduzindo a exploração dos mesmos. Além disso, o material tem sido utilizado para as mais variadas aplicações, dentre as quais se destaca o uso como agregado para pavimentação. Vários estudos verificaram a possibilidade de adição de escória de aciaria, tanto na mistura asfáltica como para composição de base e sub-base, podendo-se destacar, nacionalmente, as pesquisas de Lima *et al.* (2000), Silva *et al.* (2002), Rohde (2002), Castelo Branco (2004), Schumacher (2018).

A dificuldade de se pavimentar vias em Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ) em localidades distantes das metrópoles é uma realidade. O processo de usinagem dessa mistura asfáltica até a aplicação possui um relógio regressivo que determina a temperatura mínima de aplicação para que o pavimento seja de qualidade e esteja em perfeitas condições de tráfego. Quando a usina de asfalto fica muito distante do ponto de aplicação, avalia-se a possibilidade de substituição da camada rolante por uma outra alternativa.

A possibilidade de ter um CAUQ que possua um maior tempo de vida até a aplicação, mantendo suas características mecânicas, desempenho e assimilando características das PPC é uma solução que contribui para o aumento do número de vias brasileiras pavimentadas e da segurança de quem trafega.

Diante da importância dessa mistura e do uso de materiais na pavimentação, os seguintes questionamentos foram levantados:

- É possível que peças pré-moldadas de misturas asfálticas usinadas à quente apresentem características mecânicas compatíveis aos pavimentos asfálticos convencionais e à normatização vigente?
- A incorporação de coproduto siderúrgico nas misturas asfálticas usinadas à quente pode comprometer suas propriedades mecânicas após compactação?
- A resistência ao cisalhamento pode contribuir para o intertravamento de peças pré-moldadas de misturas asfálticas usinadas à quente?

Este estudo visa à produção e avaliação das Peças Pré-moldadas de Concreto Asfáltico (PPCA) através de moldagem por amassamento em prensa hidráulica para uso como revestimento flexível em vias. Além da potencial descoberta de uma nova metodologia construtiva com misturas de asfalto usinadas à quente para o uso de coproduto siderúrgico na incorporação e/ou substituição dos agregados, busca uma minimização da extração de recursos naturais e dá uma destinação nobre a um coproduto amplamente gerado no estado do Espírito Santo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia de produção de PPCA através de moldagem por amassamento e avaliar o efeito em suas características físicas, mecânicas e morfológicas no produto, verificando, ainda, a viabilidade técnica de incorporação de escória de aciaria na produção de PPCA.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Verificar os efeitos da moldagem das PPCA por amassamento em comparação com a compactação por impacto empregado na moldagem de CPs Marshall;

- Avaliar o efeito nos parâmetros volumétricos das PPCA da substituição parcial de agregados naturais por escória de aciaria LD.
- Avaliar os efeitos da substituição parcial de agregado natural por escória de aciaria LD na resistência à tração por compressão diametral, estabilidade e fluência Marshall e cisalhamento direto;
- Avaliar a resistência ao cisalhamento no intertravamento das PPCA e no contato com a camada de base em relação a ensaios de arrancamento.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação apresenta os capítulos conforme descritos a seguir:

Capítulo 1 – Contém a introdução, objetivo, justificativa e a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Abriga uma revisão bibliográfica dos conceitos necessários para compreensão do tema da dissertação.

Capítulo 3 – São apresentados os materiais empregados nesta pesquisa, os métodos utilizados nos ensaios de laboratório e a dosagem das misturas desenvolvidas.

Capítulo 4 – São apresentados, analisados e comentados os resultados obtidos.

Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas – Contém todas as referências bibliográficas das citações e bibliografias consultadas para o estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO ASFÁLTICO (PPCA)

2.1.1. Características Gerais das PPCA

Segundo Baillairge (1899), as PPCA tiveram suas primeiras aplicações no Canadá em meados do século XIX, na cidade de *Quebec*. Estendendo-se pela *Salaberry street* com cerca de 1,1 km de comprimento e 14,3m de largura, cerca de 17 mil metros quadrados foram pavimentados utilizando blocos com dimensões de cerca de 30,5x10x10 centímetros, totalizando o uso de aproximadamente meio milhão de blocos.

As PPCA estadunidenses eram fabricadas pela *Hastings Paving Company*, localizada em Nova Iorque. Porém, eram produzidas de fato em *Hudson*, há 48 km de Nova Iorque. Sua composição era cerca de 90% de pedra britada e areia misturadas ao ligante asfáltico proveniente dos lagos de *Trinidad*. Os materiais eram aquecidos a uma temperatura de 121° a 148°C, misturados e colocados em moldes de aço e submetidos à pressão de 34,47MPa. Após várias visitas aos Estados Unidos e pesquisas acerca dos materiais e métodos, o engenheiro inglês *Livingstone* publicou no periódico *The London Surveyor* matéria favorável ao uso do bloco pré-fabricado em asfalto (BAILLAIRGE, 1899).

Atualmente, as PPCA são comercializadas por empresas como a *Hanover® Architectural Products*, localizada em Hanover, distrito da Pensilvânia nos Estados Unidos da América (EUA). Elas se apresentam em diversos formatos e cores, variando conforme o tipo de agregado empregado (natural ou reciclado) e em função de sua aplicação em pavimentos leves e industriais, processo de fabricação e controle tecnológico (Figura 1).leves e industriais, processo de fabricação e controle tecnológico (Figura 1).

Figura 1 – Aplicações de PPCA nos EUA: (a) Praça Kendall em Cambridge, MA; (b) Residência privada em Andover, MA; (c) Genzyme Corporation, Cambridge, MA ; (d) Capital Gallery, Washington, DC.



Fonte: Hanover(2008)Adaptado

Na China, os denominados *precast Hot Mix Asphalt blocks* são divididos em blocos reforçados e não reforçados, com dimensões de 30cm x 30cm x 5cm e 15cm x 15cm x 5cm. A produção desses blocos é baseada na resistência ao afundamento dos trilhos de roda através do simulador de tráfego *Hamburg Wheel-Track Device* (HWTDD). Conforme as especificações chinesas, as misturas asfálticas utilizadas para produção dos blocos tem como temperatura de mistura entre 160-180°C, uma carga axial de 9kN e é moldada na temperatura de 170°C para o ligante CAP 80/100 (WANG e ZHAO, 2011). A norma americana AASHTO T-324 (2017) padroniza o método experimental que determina a suscetibilidade prematura às falhas das misturas asfálticas à quente e é usada nas PPCA chinesas (TSAI *et al.*, 2016).

No Brasil não há registros de aplicação desta tecnologia construtiva. Por meio desta pesquisa busca-se propor uma metodologia de fabricação de blocos pré-fabricados com misturas asfálticas usinadas à quente e compactadas por amassamento, denominada neste estudo de peças pré-moldadas de concreto asfáltico (PPCA).

2.1.2. Estudos sobre Dosagem e Efeitos da geometria nas propriedades volumétricas e mecânicas de PPCA

Apesar de sua aplicação inicial ter ocorrido a cerca de 120 anos, são incipientes os estudos de PPCA na literatura científica. É possível perceber uma limitação de trabalhos técnicos que avaliem a influência de diversos fatores como geometria, método de compactação, tipo de mistura e formas de carregamento no desempenho de PPCA a curto e longo prazo.

Embora existam diversos trabalhos sobre blocos pré-fabricados, grande parte destes utiliza Cimento Portland como aglomerante. O uso de Cimentos Asfáltico de Petróleo (CAP) é reportado, pelo menos de conhecimento deste autor, em apenas dois trabalhos: Abdelgalil e Nor (2014a) e Zhang *et al.* (2018).

2.1.2.1. Composição das PPCA

A classificação de ligante utilizado por Abdelgalil e Nor (2014a) foi o CAP 60/80, grau de penetração baseado em ensaios reológicos. Esse tipo de ligante é recomendado para uso em estradas de tráfego pesado de acordo com as normatizações da Malásia.

Uma graduação densa, que compreende agregados graúdos, miúdos e finos, com dimensão máxima do agregado de 10 mm foi selecionada neste estudo para produzir as PPCA alegando que as dimensões dos blocos utilizados neste estudo não são tão grandes.

Zhang *et al.* (2018) utilizaram ligante classificado como CAP 80/100 (Tabela 1) e agregados da faixa de graduação denominada AC-25 (Tabela 2) na mistura de suas PPCA. Os autores afirmam que mesmo que o pavimento de PPCA tenha uma desvantagem de fissuras de juntas, comparado com o pavimento asfáltico rolante, existem vantagens como construção conveniente e de baixa temperatura, produção em massa, reparação e reciclagens simples e rápidas.

Tabela 1 – Especificações do ligante asfáltico CAP 80/100.

Parâmetros	Resultados	Limites Normativos
Penetração (25°C, 0.1 mm)	93	80-100
Ductilidade (cm)		
15°C	>100	>100
10°C	54	>30
Ponto de Amolecimento (°C)	57	>44
Ponto de Fulgor (°C)	277	>245
Densidade (15°C, g/cm ³)	1.005	

Fonte: Zhang, *et al.* (2018).

Tabela 2 – Faixas granulométricas utilizadas na produção de PPCA na China: AC :*Asphalt Concrete*; 5,13,16,25: Dimensão máxima do agregado na mistura.

Porcentagem passante para cada faixa granulométrica (%)				
Graduação (mm)	AC - 5	AC - 13	AC - 16	AC - 25
35,1	100	100	100	100
26,5	100	100	100	98,8
19	100	100	100	75,3
16	100	100	99,1	64,7
13,2	100	90	91	57,3
9,5	100	68	76,4	46,4
4,75	95	38	47,1	30,8
2,36	65	24	32,4	21,7
1,18	45	15	24,9	16,5
0,6	30	10	17	11,3
0,3	20	7	10,8	8,1
0,15	12,5	5	7,8	5,6
0,075	7,5	4	5,7	3,1

Fonte: Li e Luo (2006).

2.1.2.2. Projeto de Mistura Asfáltica

O Projeto de mistura trata-se do estudo da proporção ótima de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) na mistura com agregados e fíler, baseando-se em análise das propriedades físicas, parâmetros volumétricos, estabilidade e fluência da composição.

Para Abdelgalil e Nor (2014) foram avaliados teores de ligantes respeitando o seguinte procedimento:

- Os agregados foram aquecidos até a temperatura de 170 °C e o CAP, a 160 °C;
- Em seguida, os agregados e ligantes foram misturados de forma que a temperatura de mistura não fosse superior a 163 °C (ASPHALT INSTITUTE, 1988; Croney e Croney, 1998; Liu *et al.* 2010);
- A temperatura da mistura foi verificada e deixou-se esfriar até a temperatura de 130 °C ideal para compactação;
- A mistura foi derramada num molde de aço pré-aquecido e uma espécie de cera foi usada para manter a aderência da mistura à placa de base (Abdelgalil & Nor, 2014a);
- Os CPs foram moldados e as propriedades volumétricas da mistura utilizada foram obtidas para um teor ótimo de CAP de 6,1% em massa escolhido como Teor ótimo para a produção das PPCA.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros obtidos no teor de projeto.

Tabela 3 – Propriedades do projeto de mistura das PPCA malaias.

Ligante	Teor de CAP (%)	Massa específica teórica (g/cm ³)	Compactação (%)	VV(%)	VAM (%)	RBV (%)
Betume PG 60-80	6,1	2,291	96,1	3,1	12,8	75,8

Fonte: Abdelgalil e Nor (2014b)

Zhang, *et al.* (2018) apresentam o projeto de misturas para PPCA conforme a Metodologia Marshall para quatro faixas diferentes de graduação dos agregados: AC-5, AC-13, AC-16, AC-25 (Tabela 2). O projeto de mistura para a faixa AC-25 foi da seguinte forma:

- Foram preparadas misturas com teores de ligante nas proporções de 2,4%, 2,8%, 3,2%, 3,6% e 4%.

- Os agregados e ligante foram aquecidos e misturados entre 160 °C e 180 °C. Em seguida moldaram-se em máquina que simula rolo compactador às PPCA que foram submetidas às determinações dos parâmetros volumétricos e mecânicos (Tabela 4)

Tabela 4 – Projeto de mistura marshall para a faixa AC-25.

Teor de ligante (%)	Altura do CP(mm)	Gmm (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	VV (%)	VAM (%)	RBV (%)
2,4	64,48	2,654	2,454	7,74	1,90	7,50	13,53	44,30
2,8	63,36	2,636	2,466	9,02	2,22	6,50	13,50	52,00
3,2	62,61	2,620	2,477	9,96	2,61	5,50	13,44	59,40
3,6	63,42	2,599	2,467	9,11	2,85	5,00	14,11	64,30
4,0	63,83	2,587	2,459	6,76	3,07	4,90	14,78	66,50

Fonte: Zhang, *et al.* (2018).

O TP utilizado para a faixa AC-25 foi de 3,4%.

Apesar de Abdelgalil e Nor (2014a) e Zhang, *et al.* (2018) seguirem a metodologia de dosagem Marshall para determinação dos TP das suas respectivas misturas, observou-se resultados bem diferentes nos seus teores, tendo em vista a diferença na composição granulométrica e característica dos agregados utilizados por cada autor. Comparando com os parâmetros das faixas granulométricas apresentadas na DNIT-ES 031/06, Abdelgalil e Nor (2014a) utilizaram uma faixa granulométrica mais fina que, de fato, necessita de um maior consumo de ligante. Já Zhang, *et al.* (2018) com uma faixa bem graduada (AC-25), e com diâmetro máximo do agregado duas vezes maior que os autores anteriores, obteve um teor de ligante bem abaixo da Faixa B apresentada na especificação DNIT-ES 031/06, que tem como variação de ligante entre 4,5% e 7,5% para camadas de ligação. A faixa granulométrica utilizada neste estudo difere das faixas de PPCA desenvolvidas pelos autores anteriores, propondo novas avaliações acerca do produto.

2.1.2.3. Moldagem das PPCA

A forma modular das PPCA se faz através do acondicionamento de misturas asfálticas submetidas a incrementos de força que reduzem o Volume de Vazios e aumenta a

densidade das peças até tomarem a forma desejada e os parâmetros pré-determinados.

A forma para moldagem utilizada por Abdelgalil e Nor (2014a) era feita de aço nas dimensões internas de 20 cm de comprimento por 10 cm de largura. A prensa hidráulica utilizada tem capacidade para moldagem de 2 PPCA por processo (Figura 2). As PPCA possuíam dimensões de 10cm de largura por 20 cm de comprimento e espessuras de 6, 7 e 8 cm alegando os autores uma maior facilidade no manuseio e aplicação das peças. O peso total da mistura para alcançar a espessura de 8cm foi de cerca de 3731,4 g.

A temperatura da mistura foi verificada e deixou-se esfriar até 130 °C para compactação. A mesma foi derramada num molde de aço pré-aquecido e uma espécie de cera foi usada para manter a aderência da mistura à placa de base e paredes do molde (Abdelgalil & Nor, 2014a).

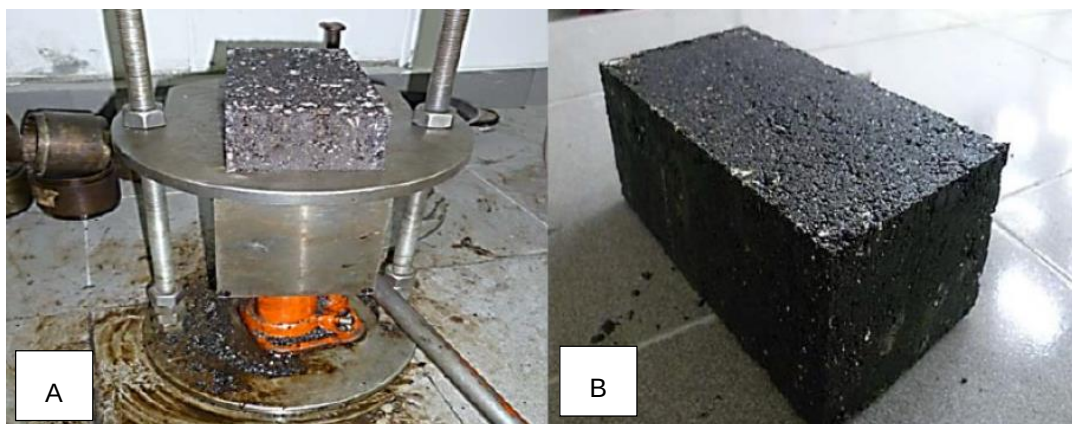
As PPCA foram compactadas por amassamento sob pressão de 8,3 MPa, de forma que cada PPCA recebesse uma força axial de cerca de 16,93 tf. Manteve-se o volume de Vazios (VV) acima de 3,0% como margem para a compactação exercida pelo tráfego dos veículos (Taha *et al.*, 2013; Mills-Beale e You, 2010). As PPCA foram retiradas dos moldes de aço com auxílio de um macaco extrusor (Figura 3) e submetidas aos ensaios mecânicos após atingirem a temperatura ambiente (20 °C).

Figura 2 – Prensa hidráulica para confecção de PPCA: (A) Prensa hidráulica; (B) Detalhe formas.



Fonte: Abdelgalil & Nor (2014b)(Adaptado)

Figura 3 – Extração das PPCA: (A) Extrusora; (B) PPCA com espessura de 8cm.



Fonte: Abdelgalil & Nor (2014b)(Adaptado)

Para a produção das PPCA chinesas as amostras foram preparadas utilizando um equipamento que aplica uma pressão padrão de 9kN sobre a mistura aquecida. Este equipamento simula a compactação de um rolo em laboratório com raio de rolagem de 50cm e 30cm de largura. A velocidade de deslocamento desta simulação é de seis ciclos por minuto. O molde em aço possui as dimensões de 30cm x 30cm x 5cm de altura (Figura 4).

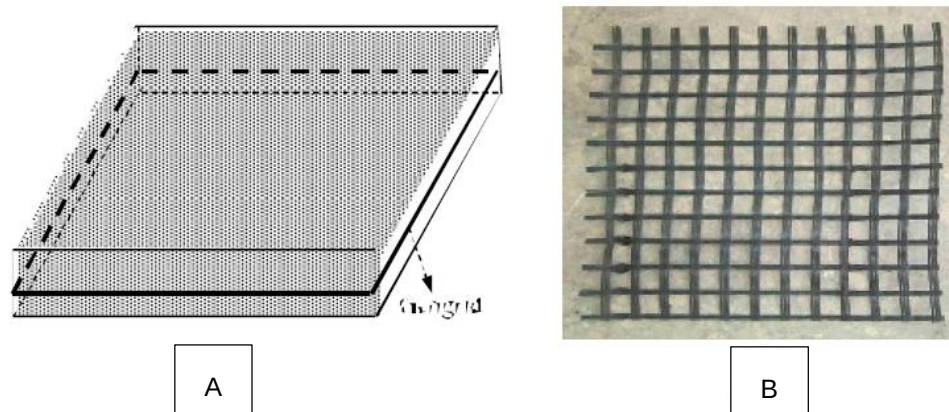
Figura 4 – Máquina para moldagem de PPCA por amassamento de roda: (A) Equipamento; (B) Detalhe forma e simulador de roda.



Fonte: Shaoxing Kare (2019)

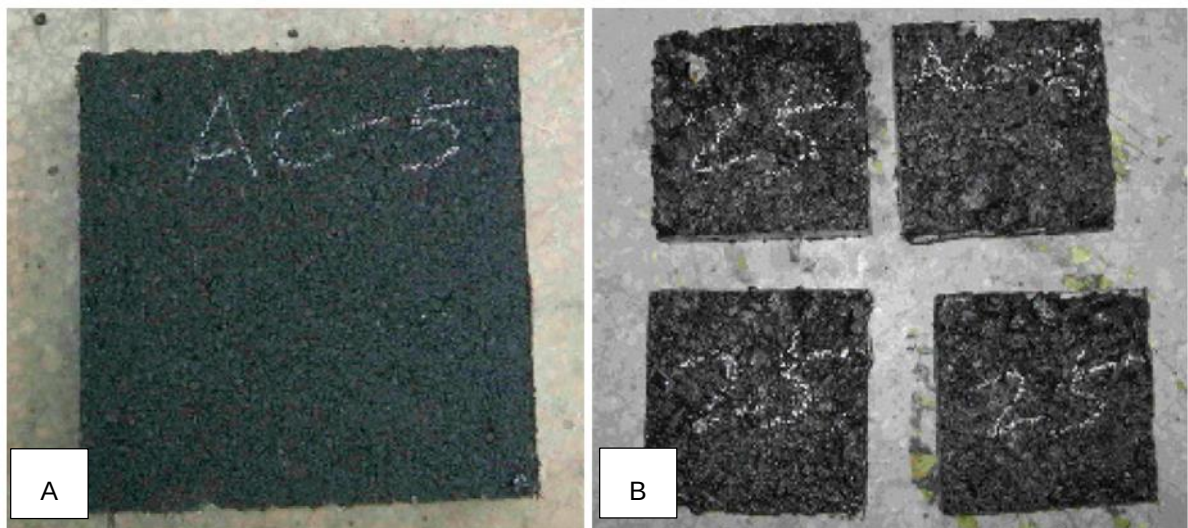
A temperatura da mistura na moldagem das PPCA foi em torno de 170 °C. A compactação é feita em um molde nas dimensões de 30cm x 30cm x 5cm e, quando necessário, recebem uma geogrelha de polipropileno em sua estrutura com uma malha de 4x4 mm e espessura de 2mm. Após moldagem, as peças passam por um processo de cura durante 12 horas a uma temperatura de 20 °C para resfriamento. Posterior a cura, as peças são cortadas nas dimensões de 15cm x 15cm para análise. A PPCA e o geogrid são apresentados nas Figura 5 e 6.

Figura 5 – PPCA reforçada: (a) posicionamento do geogrid na PPCA; (b) Detalhe do geogrid.



Fonte: (Wang e Zhao,2011)(Adaptado).

Figura 6 – PPCA após moldagem: (A) antes do corte; (B) após corte em peças de 15cm x 15cm.



Fonte: (Wang e Zhao,2011)(Adaptado).

2.1.3. Propriedades Físicas e Mecânicas de PPCA e misturas asfálticas

Foram avaliadas propriedades mecânicas para as espessuras de 6, 7 e 8 cm das PPCA. Estas foram submetidas a ensaio de compressão simples que apresentou um aumento da resistência à compressão simples diretamente proporcional a variação de espessura da PPCA (Tabela 5). Além disso, as peças provaram ter capacidade de

resistir a carregamentos estáticos de veículos menores que 156,6 kN. De acordo com o *AASHTO Road Test* e outros estudos de Shackel, (1990), a maior carga por eixo permitida nos EUA e outros países é equivalente a 80 kN (Garber e Hoel, 2009). Consequentemente, os autores afirmam que as PPCA são adequadas o suficiente para carregamentos estáticos por eixo dos veículos (Abdelgalil e Nor, 2014b).

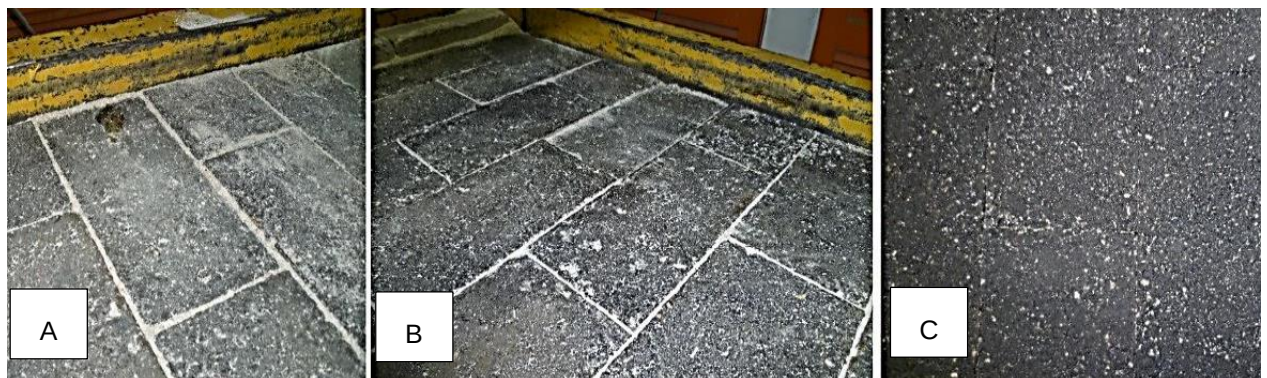
Tabela 5 – Resistência à Compressão Simples de acordo com a espessura da PPCA

Espessura do bloco (mm)	Tensão de Compressão (Mpa)
70	7,83
80	8,00
90	8,19

Fonte: Abdelgalil e Nor (2014a)(Adaptado)

Abdelgalil e Nor (2014b) também analisaram a influência da espessura de juntas preenchidas com areia fina entre as PPCA através do *Accelerated trafficking load test* (Figura 7). Esse teste simula um tráfego de até 20 mil ciclos no qual verificou-se que o pavimento com juntas de 2,0 mm apresentou uma maior deformação em relação ao pavimento com juntas de 0mm. Este resultado foi justificado pelo maior atrito entre a superfície de contato 'bloco-bloco' que na superfície 'bloco-areia', fornecendo assim, uma melhor resistência à deformação e travamento horizontal.

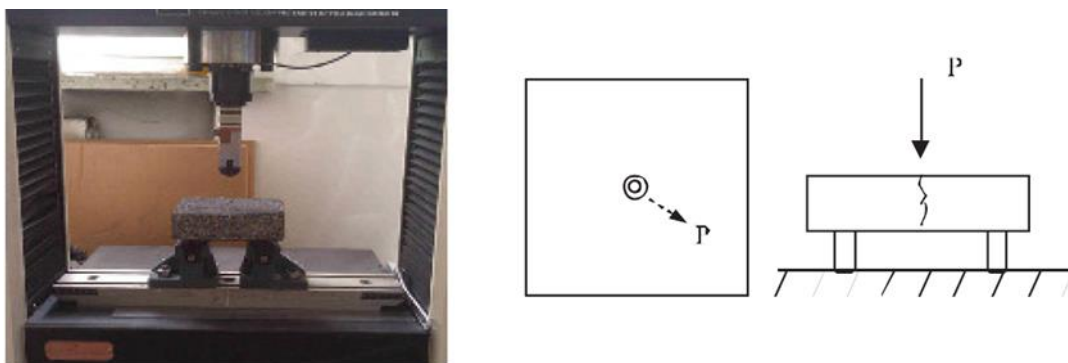
Figura 7 – Espessura das juntas de assentamento de PPCA: (A) 3mm; (B) 2mm; (C) 0mm.



Fonte: Abdelgalil e Nor (2014b)(Adaptado)

Zhu *et al.* (2011) e Wang *et al.* (2012), de acordo com as especificações chinesas, utilizaram como parâmetros de análise entre as PPCA (reforçadas e não-reforçadas) ensaios de resistência à Flexão nas temperaturas de -18°C, 20°C e 60°C (Figura 8).

Figura 8 – Ensaio de Flexão em PPCA a 20°C.



Fonte: Zhang *et al.*, (2018).

Foi observado que a resistência à flexão das PPCA diminui gradualmente em relação ao aumento do diâmetro do agregado nas diferentes misturas estudadas. Em relação às PPC, a resistência à flexão das PPCA é maior nas temperaturas de 20 °C e de congelamento e descongelamento, sugerindo, assim, uma possível aplicação das PPCA em pavimentos modulares (Tabela 6) (ZHANG *et al.*, 2018).

Tabela 6 – Resultados do ensaio de Resistência a flexão para as PPCA a 20°C.

Espessura da PPCA	Resistência à flexão (kN)							
	100 mm				80 mm			
	AC-5	AC-13	AC-16	AC-25	AC-5	AC-13	AC-16	AC-25
Não reforçada	14,78	12,80	12,13	10,50	14,55	11,29	14,04	8,97
Reforçada	14,85	12,50	18,01	8,55	17,52	12,78	17,23	12,26

Fonte: Zhang *et al.*, (2018).

Através de testes comparativos sobre as características mecânicas entre os pré-moldados, os resultados da pesquisa indicaram que as PPCA possuem melhores características mecânicas e podem ser aplicadas em pavimentos asfálticos modulares. Quando comparado com a PPC, as PPCA têm as vantagens em ampla

faixa de aplicação, comportamento flexível, cura e reciclagem. Dessa forma, tornam-se uma tecnologia viável na opção de pavimento modular (ZHANG et al., 2018).

2.1.3.1. Ensaio de Arrancamento

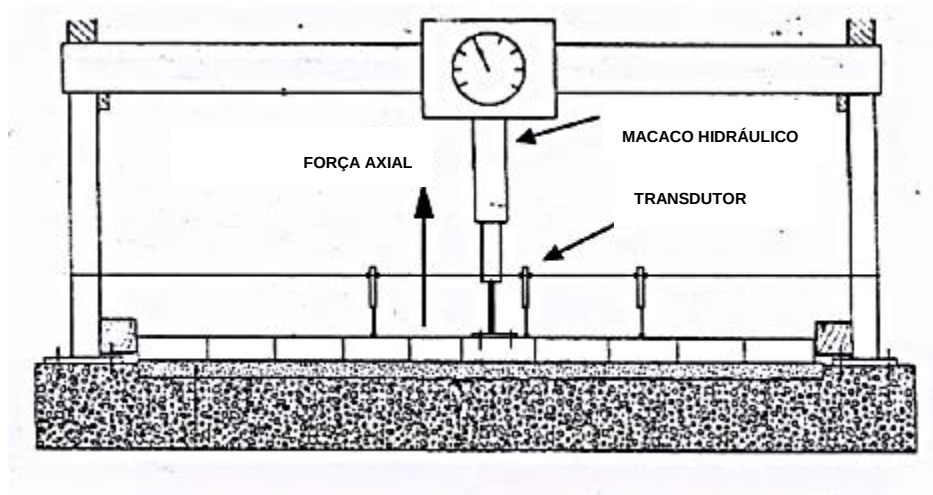
O ensaio de arrancamento das PPCA, denominado *Pull-out Test*, trata da extração de um bloco individual do pavimento. Clifford (1984), afirma que blocos de PPC se comportam de forma elástica no pavimento, apesar de individualmente serem rígidos. Esse comportamento depende das juntas entre as peças que recebem as tensões, forças cisalhantes e atrito induzidas por cargas aplicadas verticalmente ou torcionalmente no pavimento. O autor complementa que o pavimento torna-se mais capaz de suportar cargas aplicadas com um menor deformação quando utilizados materiais de melhor qualidade nas juntas. Deformação reduzida acarreta em maior vida útil do pavimento.

Abdelgalil e Nor (2014b) utilizaram metodologia proposta por Clifford (1984) e Husin (2001) do ensaio de arrancamento (*pull-out*):

- Uma caixa de 1,0m x 1,0m foi pavimentada com as PPCA;
- O piso foi considerado como camada única de pavimento;
- Não houve incidência de carregamento lateral nas PPCA. Apenas o uso de areia nos casos de juntas maiores que 0mm;
- As peças são perfuradas e parafusos são conectados a fim de conectá-las ao macaco hidráulico (10 tf);
- Uma célula de carga mede a força exercida pelo macaco hidráulico na retirada das PPCA e é medido deslocamento vertical ao longo da extração da peça;
- O deslocamento referente à tensão cisalhante máxima durante o arrancamento da PPCA é computado para efeitos de comparação.

As Figuras 9 e 10 apresentam a execução do ensaio *pull-out*.

Figura 9 – Esquema de extração de PPC pelo ensaio *pull-out*.



Fonte: Husin (2001)(Adaptado).

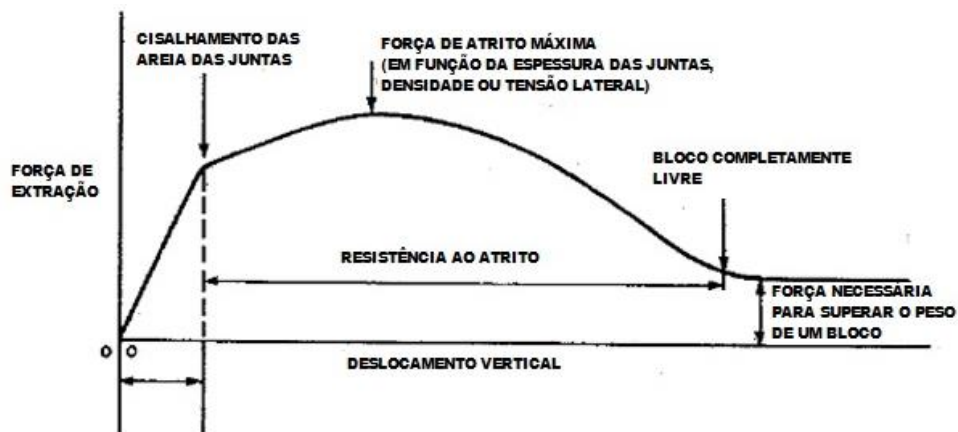
Figura 10 – Equipamento para o ensaio *pull-out*.



Fonte: Abdelgalil e Nor (2014b)(Adaptado).

Durante o arrancamento, ao puxar um bloco para fora de seu local de assentamento, existe um deslocamento vertical relacionado à força de atrito nas juntas (Figura 11). Essa força é referente ao contato entre a areia de rejuntamento e as peças. Num determinado momento dá-se a resistência ao atrito máxima (pico), em que se determina o deslocamento vertical das peças adjacentes (HUSIN, 2001).

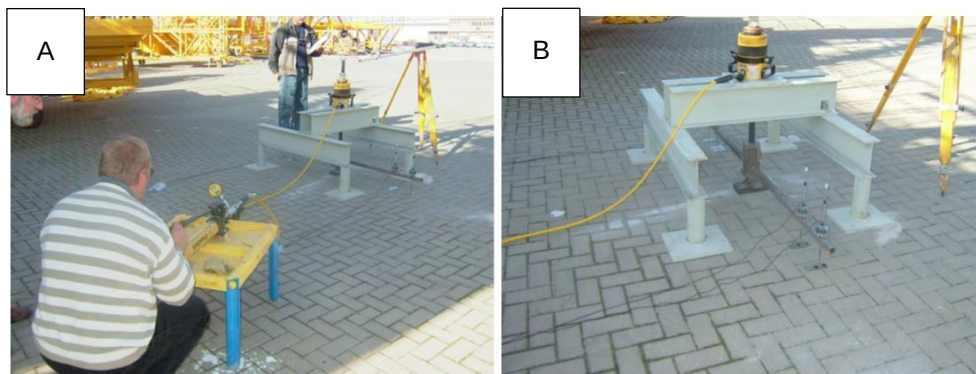
Figura 11 – Relação entre força de extração e deslocamento no ensaio *pull-out*.



Fonte: Husin (2001)(Adaptado).

Ishai *et al.* (2006) avaliaram a resistência ao arrancamento de PPC retangulares em pistas de aeroportos e obteve a força máxima de arrancamento de 1.500 kgf, e a deflexão do bloco central na condição de arrancamento de 12 mm (Figura 12).

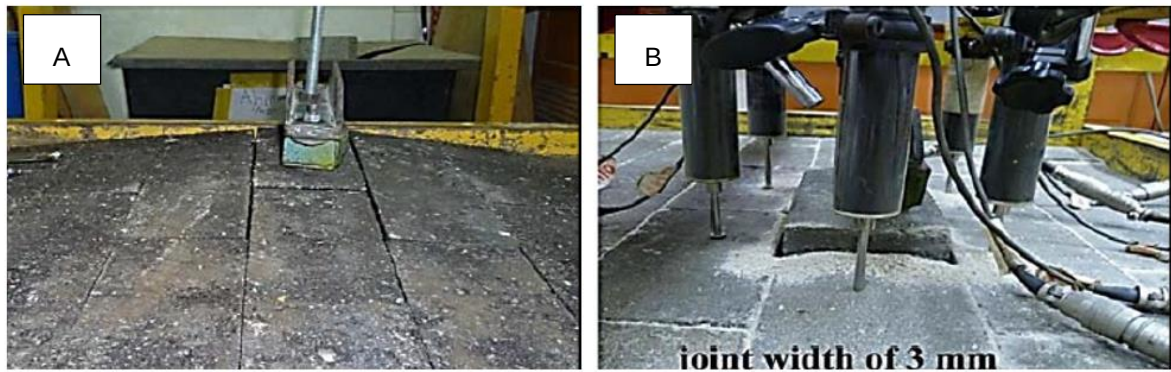
Figura 12 – Pull-out teste m pavimento antigo: (A) Operador do macaco hidráulico; (B) PPC central a ser extraída.



Fonte: Ishai *et al.* (2006)(Adaptado).

Seguindo o proposto em Husin (2001), a força vertical máxima de extração das PPCA nas pesquisas de Abdelgalil e Nor (2014) foi de 1500kgf. O teste de arrancamento foi feito em três diferentes localizações, como borda, canto e centro. A Figura 13 mostra o deslocamento final que ocorreu no pavimento do bloco como um resultado da extração da PPCA.

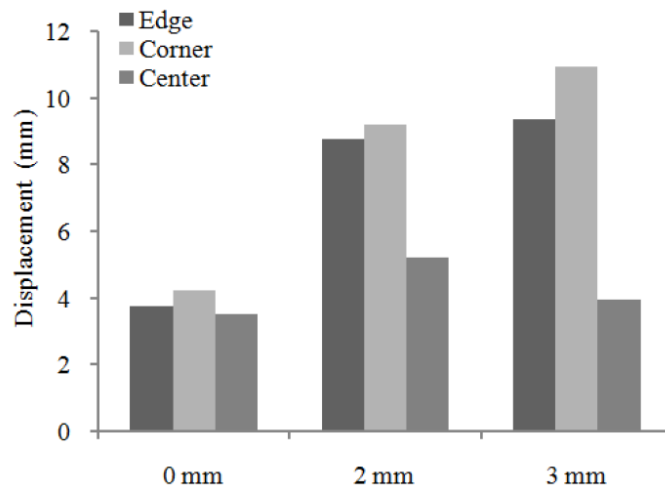
Figura 13 - Pull out Test: (A) juntas de 0mm e; (B) 3mm.



Fonte: Abdelgalil e Nor (2014b)(Adaptado)

O desempenho do pavimento em PPCA é altamente influenciado pela largura da junta (espaçamento) entre os blocos. O resultado mostrou que as PPCA colocadas em contato tão próximo quanto possível (0mm) tiveram um menor valor do deslocamento vertical (cerca de 4mm), sendo assim mais propensos a impedirem rotação ou extração das PPCA do pavimento durante os movimentos dos veículos. Figura 14. (ABDELGALIL E NOR, 2014b).

Figura 14 – Deslocamento vertical das PPCA no ensaio pull-out conforme espessura das juntas de assentamento.



Fonte: Abdelgalil e Nor (2014b)

Conforme observado, o desempenho do pavimento de PPCA é altamente influenciado pela espessura da junta entre as peças indicando uma alta coesão do asfalto. Este pode ser observado na Figura 15 que apresenta as interconexões de uma placa de PPCA após compactação.

Figura 15 – Interconexões das PPCA com juntas de 0mm

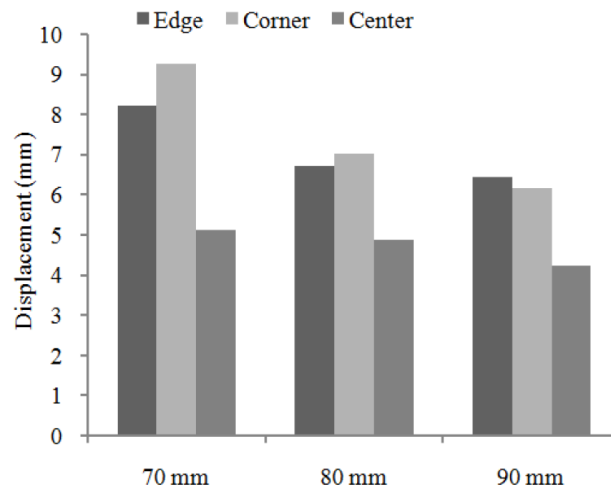


Fonte: Abdelgalil e Nor (2014b)(Adaptado)

Este experimento foi também realizado em PPCA com diferentes espessuras, ou seja, 70, 80 e 90 mm, respectivamente (Figura 16). Verificou-se que o comportamento da

PPCA durante o processo de extração não é afetado pelas interações entre PPCAs vizinhas nos mais espessos dada a maior superfície de contato comparado aos blocos de menor espessura.

Figura 16 - Deslocamento vertical no ensaio *pull-out* conforme espessura das PPCA



Fonte: Abdelgalil e Nor (2014a).

2.1.3.2. Ensaio de Cisalhamento Direto

A resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas é um parâmetro diretamente relacionado à deformação permanente dos pavimentos flexíveis. Wang *et al.* (2008), avaliaram a resistência ao cisalhamento para misturas asfálticas com cinco diferentes graduações. Os autores observaram que a propriedade de cisalhamento de uma mistura asfáltica é influenciada pelo Teor de Projeto da mistura, taxa de carregamento, e temperatura do ensaio. Esses parâmetros de teste mostram influências notáveis na coesão e as ligeiras influências no ângulo de atrito interno.

A Tabela 7 apresenta os resultados de Wang *et al.* (2008) obtidos nos ensaios mecânicos à temperatura de 60°C para misturas com graduações conforme a metodologia Chinesa de composição granulométrica de misturas asfálticas (AC), segundo o método Bailey de composição granulométrica (BL), composição proposta na metodologia *SUPERPAVE* (SP) e baseada no método de verificação dos parâmetros volumétricos (VL). Os números 16 e 31,5 após cada sigla representam a dimensão máxima do agregado utilizado em milímetros de cada composição. Observou-se que o ângulo de atrito de cada mistura é suscetível a sua composição

granulométrica e dosagem. As misturas de graduação aberta apresentaram maiores valores de ângulo de atrito do que misturas continuamente densas.

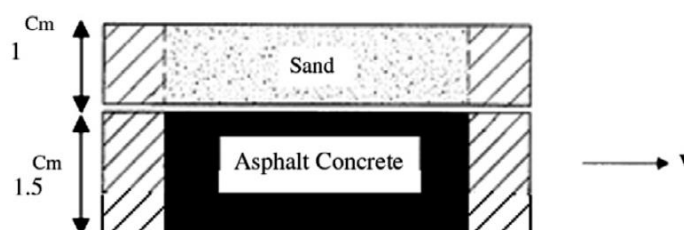
Tabela 7 – Comportamento mecânico das misturas avaliadas por Wang *et al.* (2008)

Graduação	Teor de CAP (%)	Estabilidade (KN)	Tração (Mpa)	Tensão Cisalhante (kPa)	Coesão (kPa)	ângulo de atrito interno (°)
AC-16	4,50	11,20	75,60	431,00	91,80	45,243
BL-16	5,00	8,30	55,30	442,00	70,50	47,184
SP-31.5	4,00	22,70	67,20	351,00	80,70	44,79
BL-31.5	3,80	20,00	49,10	365,00	63,50	47,673
VL-31.5	3,70	20,30	56,50	374,00	73,70	48,097

Fonte: Wang *et al.* (2008) (Adaptado).

Tajdini *et al.* (2014), investigaram a resistência ao cisalhamento na interface de mistura asfáltica e materiais granulares. Os valores obtidos foram em torno de 49kPa e 51kPa para uma tensão normal teórica de 80kPa nas condições de areia secas e saturadas, respectivamente, e 150kPa e 200kPa para uma tensão normal teórica de 280kPa nas condições de areia seca e saturada. Os autores afirmam que os parâmetros de resistência ao cisalhamento crescem com o aumento da densidade e da tensão normal na interface e, diminuem com o aumento do teor de umidade na interface. A Figura 17 apresenta o esquema do teste de cisalhamento direto.

Figura 17 - Vista esquemática do concreto de areia e asfalto na caixa de teste de cisalhamento direto.

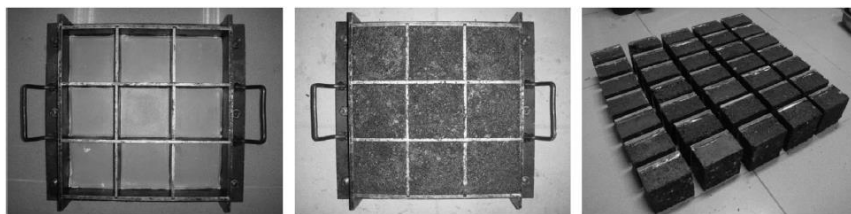


Fonte: Tajdini *et al.* (2014).

Yao, *et al.* (2016) avaliaram as características de cisalhamento na interface aço-concreto asfáltico para pavimentos flexíveis em pontes de estruturas metálicas. As amostras com dimensões de 9,6 x 9,6 cm e 6,5cm de espessura foram preparadas

com epóxi e asfaltos modificados por polímeros nas temperaturas de 25°C e 60°C para observar a influência dos materiais de revestimento da aderência o pavimento a estrutura das pontes (Figura 18). Os testes foram conduzidos à temperaturas de 25 e 60°C, a carregamentos normais de 0, 200, 400 e 700 kPa para cada temperatura. Os autores constataram que a resistência ao cisalhamento da interface cresce com o aumento da tensão normal. As alterações percentuais na resistência ao cisalhamento devido ao aumento da tensão normal a 60°C são maiores do que aquelas a 25°C, indicando que a tensão normal desempenha um papel mais importante no componente de resistência ao cisalhamento da interface em alta temperatura.

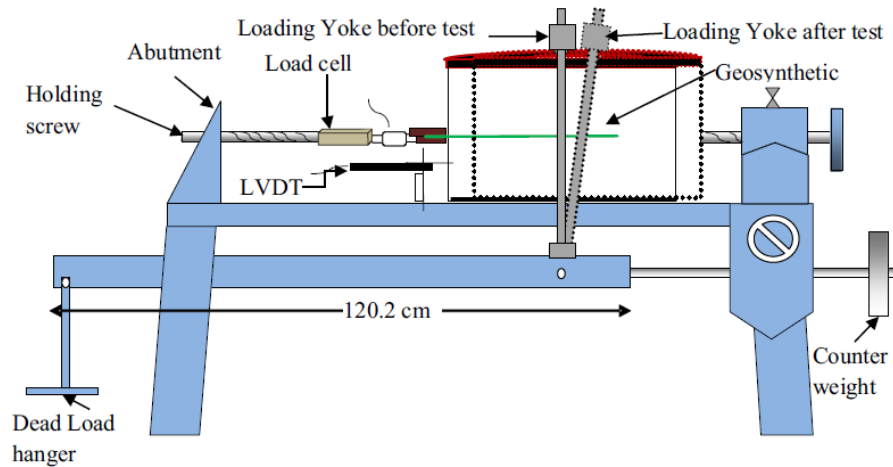
Figura 18 – Molde de fabricação e amostras de mistura asfáltica com uma placa de aço utilizadas no ensaio de cisalhamento



Fonte: Yao, et al. (2016).

As análises de cisalhamento direto e testes de arrancamento são comumente utilizados para determinar parâmetros de interação entre materiais. Muitas vezes é economicamente viável obter estes parâmetros através de configurações de testes existentes e que são convencionalmente utilizados. No entanto, as configurações desses testes precisam de certas modificações para obtermos parâmetros específicos. Em estudos desenvolvidos por Prashanth, *et al.* (2016) foram efetuados testes de arrancamento usando a instalação do aparelho de cisalhamento direto modificado para avaliar a interação na massa entre solo e geossintéticos (Figura 19).

Figura 19 - Diagrama esquemático mostrando a posição carregamento antes e depois do teste

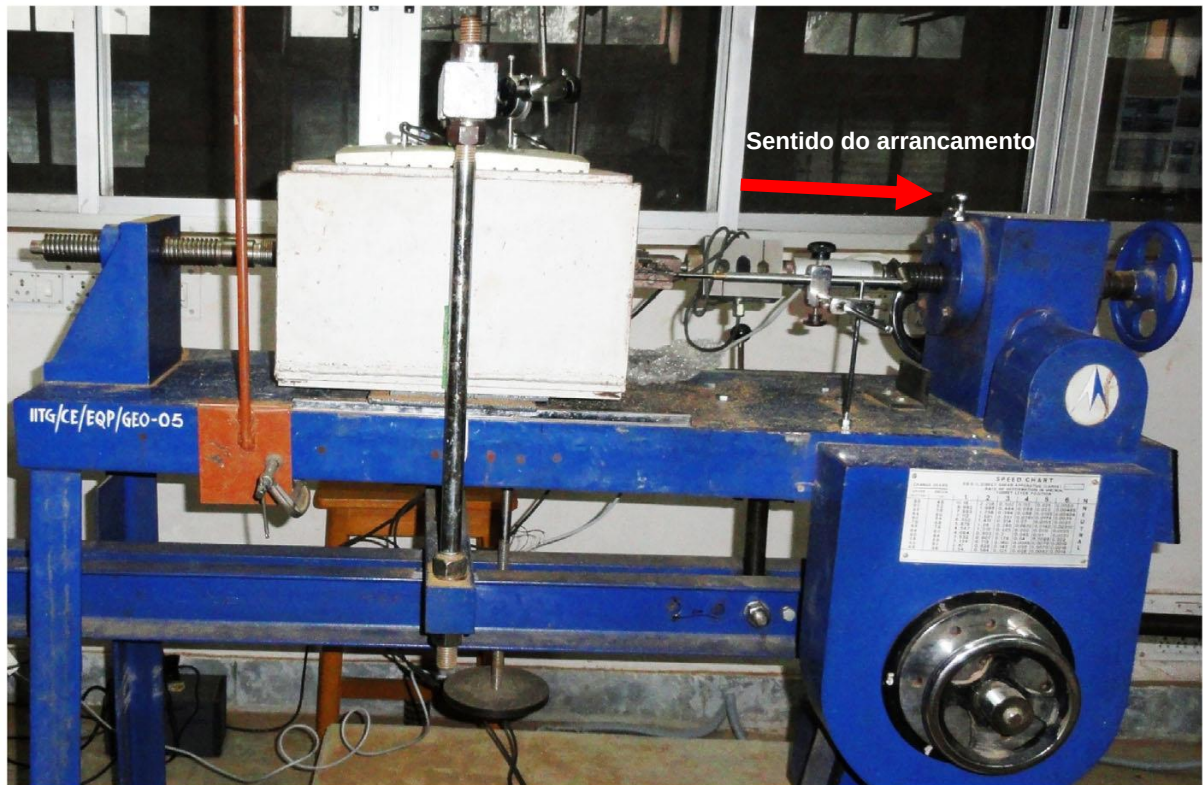


Fonte: Prashanth, *et al.* (2016).

A tensão normal é aplicada na placa rígida que repousa sobre os corpos de prova por meio de sistema de braço de alavanca, como é feito no ensaio de cisalhamento direto convencional. Subsequentemente, a tração é aplicada ao caixa de arrancamento na taxa constante selecionada. O deslocamento é medido por um LVDT ligado à face frontal, como mostra a Figura 20. A resistência oferecida pelo geossintético é medida usando a célula de carga e dados do sistema de aquisição. Nesta modificação a amostra de geossintético é mantida em posição fixa, enquanto o solo junto com a caixa é puxado para longe. Conforme figura, durante o processo a alavanca responsável pelo carregamento vertical se mantém girando e como resultado, a força normal na amostra continua variando. Como o deslocamento da caixa de arrancamento aumenta, o valor de padrão de carga aumenta, assim, o mecanismo de braço de alavanca afeta a mudança no carregamento normal (PRASHANTH, *et al.* 2016).

Para que essa interferência da força normal fosse mitigada inverteu-se o procedimento de arrancamento, tornando a caixa fixa e mantendo, assim, a posição do carregamento vertical. Já o deslocamento foi aplicado ao geossintético, invertendo o sentido de deslocamento do equipamento original (Figura 17).

Figura 20 – Ensaio de pull-out adaptado em prensa de cisalhamento direto

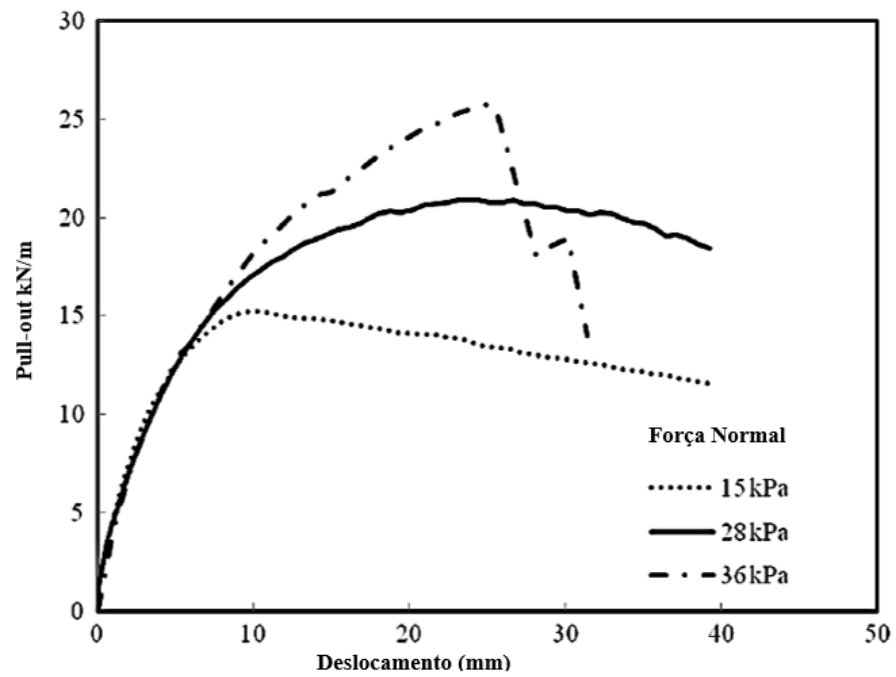


Fonte: Prashanth, *et al.* (2016) (Adaptado).

O efeito do carregamento normal no ensaio de arrancamento de geossintético em contato com areia foi investigado por Prashanth, *et al.* (2016), conforme se apresenta na Figura 21. Três tensões normais diferentes ($r_n = 15, 28$ e 36 kPa) foram aplicadas; um aumento na tensão normal confinante de 15 para 28 kPa causou um crescimento de 67% na carga máxima de arrancamento.

Dessa maneira confirma-se que no ensaio de arrancamento os parâmetros de interação são altamente sensíveis à tensão normal confinante e à rugosidade superficial dos materiais. Isso significa que o aumento do carregamento confinante contribui para um menor deslocamento durante o processo de arrancamento.

Figura 21 – Ensaio de arrancamento de geossintético em contato com areia



Fonte: Prashanth, *et al.* (2016) (Adaptado).

2.2. ESCÓRIA DE ACIARIA

.

2.2.1. Características Gerais

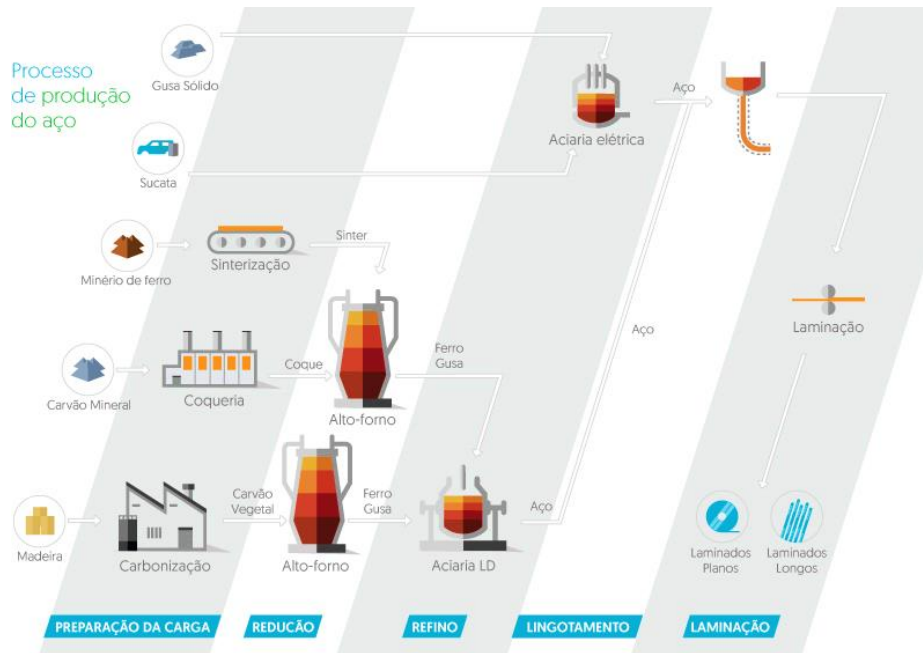
Os agregados siderúrgicos são produtos resultantes de processo industrial destinado a obter o ferro gusa líquido, e em seguida o aço. Dentre eles temos escória de alto-forno, pó de alto forno, lama de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria LD, lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa (ROCHA, 2011).

As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro juntamente com a adição de materiais fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque (carvão mineral). As mesmas tornam-se essenciais no refino do aço, pois absorvem as inclusões não metálicas produzidas durante a fabricação do aço e determinam as propriedades mecânicas desejadas para cada tipo de aço (ASTH, 2011; VAZ, 2001; THOMAZ, 2012)

A produção e a composição da escória dependem de alguns fatores, tais como: processo ou tipo de forno utilizado, tipo de matéria-prima, especificação do aço e resfriamento do resíduo (Figura 22). Esse material sai do forno à temperatura aproximada de 1500°C, e o tipo de resfriamento afeta também a granulometria, pois neste momento ocorre a maior parte das reações químicas (LIMA *et al.*, 2000).

Há basicamente três grandes processos de fabricação do aço de acordo com o que se deseja produzir e conforme o processo de refino. São eles: LD (Linz-Donawitz) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*), que utiliza o conversor a oxigênio; elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*), que utiliza o Forno de Arco Elétrico (FAE) e OH (*Open Heart*), que utiliza o forno Siemens-Martin (MACHADO, 2000).

Figura 22- Processo de produção do aço



Fonte: IBS (2018).

Segundo dados da *National Slag Association* (NSA) (2013), a escória de aciaria é gerada a uma taxa de 75-150 kg por tonelada de aço produzido. Escórias que foram resfriadas lentamente ao ar geralmente são inertes devido à cristalização dos óxidos. Escórias resfriadas rapidamente (ar ou vapor) possuem a natureza expansiva e tornam-se leves. Já as escórias resfriadas bruscamente (jato d'água) são vítreas, com granulometria miúda semelhante a areia de rio, com uma textura áspera e estrutura porosa. As escórias ácidas são mais densas e as básicas mais porosas com estrutura vesicular (GEYER, 2001).

Após a produção do aço, coprodutos e resíduos que seriam descartados em aterros se tornam matéria-prima para pavimentação de estradas, corretivo de solo, fabricação de cimento, materiais cerâmicos, entre outros. Os benefícios do reaproveitamento desses materiais em uma economia circular incluem a preservação de recursos naturais não renováveis e a redução de emissões de CO₂ referente ao processo de produção de aço via minério de ferro. Na dinâmica da economia circular, na indústria do aço tudo se transforma (SCHUMACHER, 2018).

De acordo com o Relatório de Sustentabilidade do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) (2018), em 2017, cada tonelada de aço produzido gerou cerca de 607 kg de

coprodutos diretos e resíduos. Destes, 86% foram aproveitados em diversos setores. Os agregados siderúrgicos de alto-forno, em sua quase totalidade, foram utilizados especialmente para a produção de cimento (99%). No caso das escórias de aciaria, foram comercializadas cerca de 36% em 2017 e reutilizados nas próprias indústrias (23%). Sua principal aplicação, cerca de 50%, foi como base para a pavimentação de vias e estradas.

2.2.2. Propriedades das escórias de aciaria

As escórias de aciaria possuem textura áspera na superfície e forma angular, facilitando uma maior interação entre os fragmentos e fornecendo maior rigidez nas camadas em que são empregadas (NBR 6954,1989; GUIMARÃES, 2013). Segundo Rohde (2002), de acordo com a especificação DNER-EM 262/94, para a escória de aciaria ser aceita como agregado para pavimentação, entre outras características, deve apresentar massa específica variando entre 3-3,5 g/cm³ e absorção de água de 1-2% em peso. Na Tabela 8 é possível observar que os valores se apresentam, em alguns casos, diferente dos especificados na norma do DNER. É importante ressaltar que essa norma não explicita se sua validade se estende a qualquer tipo de escória de aciaria, LD ou elétrica. Sendo a composição química desses resíduos diferente, pode-se esperar que os valores de fato também o sejam.

O relatório que estipula as diretrizes para uso de materiais residuais e subprodutos na construção de pavimentos da Federal Highway Administration (FHWA) (2008) descreve que as escórias de aciaria têm uma elevada densidade específica e absorção de água geralmente menor do que 3%, uma massa específica real em torno de 3,2-3,6 g/cm³ e peso unitário em torno de 1600-1900kg/m³ o que mostra de fato uma grande variabilidade nos resultados dos parâmetros em questão.

Tabela 8 – Parâmetros de massa específica e absorção para escórias de Aciaria

Autores	Propriedades físicas de Escórias de Aciaria		
	Densidade Real (Gsa)	Densidade Aparente (Gsb)	Absorção (%)
Rohde (2002)	3,39	-	2,6
Castelo Branco <i>et al.</i> (2004)	3,3	2,88	4,47
Freitas (2007)	2,98	2,76	2,6
Pedrosa (2010)	3,238	1,901	1,97
Rocha (2011)	3,5	1,7	1,45
Tavares (2012)	3,399	2,931	4,7
Schumacher (2018)	3,23	-	2,55

Fonte: Autor.

A composição química da escória é em geral expressa em termos de óxidos simples calculados a partir de análise elementar determinada por fluorescência de raios-X. A Tabela 9 lista a os compostos presentes na escória de aço de um típico forno de oxigênio de base. Grande parte das escórias de aço contemplam essas faixas químicas, mas nem todas são adequadas para utilização como agregados. Mais importante é a forma mineralógica da escória, que é altamente dependente da taxa de resfriamento de escória no processo de fabricação de aço (FHWA, 2008).

Tabela 9 – Composição química da escória de aço

Constituinte	Composição (%)
CaO	40 - 52
SiO ₂	10 - 19
FeO	10-40(70 - 80% FeO, 20 - 30% Fe ₂ O ₃)
MnO	5 - 8
MgO	5 - 10
Al ₂ O ₃	1 - 3
P ₂ O ₅	0.5 - 1
S	< 0.1
Ferro Metálico	0.5 - 10

Fonte: FHWA (2008).

Pesquisas como Rohde (2002), Araújo (2008) e Júnior *et al.* (2011) apresentam resultados para a composição química da escória de aciaria semelhantes em grande parte com o descrito na Tabela 10. A taxa de resfriamento da escória de aço é suficientemente baixa para que os compostos cristalinos sejam geralmente formados. Predominam silicato dicálcico, silicato tricálcico, aluminato de cálcio, óxido de ferro, cálcio e magnésio, e alguns óxidos de magnésio (periclásio). As proporções relativas destes compostos dependem da prática de produção de aço e da taxa de resfriamento da escória de aço (SCHUMACHER, 2018).

As propriedades mecânicas das escórias são favoráveis a seu uso como agregado. A Tabela 10 apresenta os valores típicos de algumas propriedades de escórias de aço.

Tabela 10 – Propriedades mecânicas típicas da escória de aciaria

Propriedade	Valor
Abrasão Los Angeles (ASTM C131), %	20 - 25
Durabilidade (Sodium Sulfate Soundness Loss - ASTM C88), %	<12
Ângulo de atrito interno	40° - 50°
Dureza (medida pela escala de Mohs da dureza mineral) *	6 - 7
Índice de Suporte Califórnia (CBR), % superior tamanho 19 mm (3/4")	Até 300

* Dureza da dolomita medida na mesma escala, é de 3 a 4

** Valor do CBR típico para calcário britado é de 100%

Fonte: FHWA-(2008).

Assim como na Tabela 10, diversos autores obtiveram valores diferentes de resultados no ensaio de Abrasão Los Angeles. Parente *et al.* (2003) e Nóbrega (2007) encontraram valores acima do limite típico (25%). Já Souza (2007) obteve valores menores que 20%, apresentando, assim, a alta heterogeneidade dos agregados siderúrgicos no Brasil.

Óxidos livres de cálcio e magnésio não são completamente consumidos na escória de aciaria e há um consenso geral na literatura técnica de que a hidratação da cal e do magnésio em contato com a umidade é amplamente responsável pela natureza expansiva da maioria das escórias de aço (FHWA, 2008).

A principal questão que existe quanto à utilização da escória de aciaria LD como um agregado nas obras de pavimentação e aterro é a possibilidade de ocorrer expansão deste material. Ocorrem envolvendo compostos presentes na escória de aciaria, gerando tensões internas que originam trincas e resultam até na pulverização do material. Entre estes compostos volumetricamente instáveis, os óxidos de cálcio e magnésio (CaO e o MgO) são os maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento, por diferença de volume molar nas suas reações (SCHUMACHER, 2018).

2.2.3. Uso de Escória de Aciaria em camadas de revestimento asfáltico

O emprego da escória de aciaria na pavimentação viária justifica-se pelo fato de ser um material de boa qualidade com elevada resistência mecânica, ter custo de aquisição reduzido e, por ser um subproduto da produção do aço, seus estoques localizam-se a pequenas distâncias de centros urbanos. Elas podem ser utilizadas nas camadas granulares do pavimento (reforço do Silsubleito, sub-base e base) e, adicionalmente, como agregado nos revestimentos betuminosos (PEDROSA, 2010).

A produção de aço e escória em 2010 na China chegou a 626,7 milhões de toneladas e 90 milhões de toneladas, respectivamente. No entanto, a atual taxa de utilização de escória de aço na China é de apenas 22%, muito atrás dos países desenvolvidos, como EUA, Japão, Alemanha e França, onde as taxas são de quase 100% (YI, 2013).

Segundo Rocha (2011), as escórias de aciaria podem ser aplicadas em camadas de rolamento de rodovias de tráfego pesado devido às suas características de elevada resistência ao desgaste e ao polimento, boa adesividade para emulsões e CAPs, em substituição aos agregados pétreos convencionais.

Países como Grã-Bretanha, Alemanha, Polônia, França, Japão, Estados Unidos e Rússia utilizam escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos. No Brasil um dos primeiros usos intensivos em pavimentação foi em 1986, com execução de 100 km de base e sub-base no estado do Espírito Santo (SILVA, 1994). Silva e Mendonça (2001) relatam que pavimentos construídos com este material suportaram tráfego pesado, como transporte de placas de aço, por 16 anos.

Silva e Mendonça (2001) apresentam dosagem Marshall de mistura asfáltica utilizando 97,0% de escória de aciaria com graduação menor do que 12,5 mm, fíler calcário e CAP. A escória foi envelhecida durante mais de três anos e apresentava expansão (1,83%) abaixo do limite de 3% estabelecido pela norma do DNER - EM 262/94. Os autores descrevem que estradas construídas com escória de aciaria em suas camadas resistiram ao trânsito pesado e tiveram vida útil de 16 anos.

Rhode (2002) avaliou o emprego de escória como agregado para pavimentação analisando características mecânicas e ambientais, concluindo que a escória de aciaria pode ser empregada como material de pavimentação seja por meio de estabilização granulométrica ou pela modificação com cinza pesada e cal de carbureto, e foi classificado como resíduo ambiental de classe II.

Raposo (2005) analisou a compactação e expansão de escória de aciaria LD visando a utilização em bases e sub-bases de pavimentos através dos ensaios de expansão: PTM-130/78, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00. Observou-se que a umidade ótima da compactação teve menor influência nos resultados de expansão que a temperatura e energia de compactação.

Ahmedzade e Sengoz (2009) investigaram a influência da fração graúda da escória de aciaria nas propriedades das misturas asfálticas usinadas a quente para as temperaturas de ensaio de 40 e 60°C. Os autores analisaram misturas asfálticas contendo dois tipos de CAP (AC-5 e AC-10) e variando o tipo de material da fração graúda retida na peneira 4.75 mm (escória de aciaria e agregado natural) equivalente a 35% da mistura. As misturas com agregado graúdo de escória de aciaria apresentaram elevada rigidez e valores de estabilidade Marshall equivalentes a 19,54 KN e 20,19 KN, para AC-5 e AC-10, respectivamente. As misturas com agregado natural apresentaram valores de estabilidade Marshall de 16,50 KN e 17,46KN, respectivamente. Os pesquisadores observaram que as misturas com escória exibiram resultados substancialmente maiores em relação às misturas contendo apenas agregado natural. Assim sendo, constataram uma melhoria significativa na resistência à deformação permanente das misturas contendo escória de aço.

Zumrawi e Khalil (2017) avaliaram o uso da escória de aciaria como substituto de agregados naturais na produção de misturas asfálticas usinadas à quente em proporções de 0, 50, 75, e 100% de escória na mistura. Os resultados revelaram que a adição de escória de aciaria proporcionou uma melhoria significativa nas

propriedades das misturas asfálticas, principalmente no que diz respeito ao aumento da estabilidade das misturas.

Schumacher (2018) avaliou o potencial expansivo de escórias de aciaria e seus efeitos no desempenho de concretos asfálticos. Utilizou escória do tipo LD, obtidas na cidade de Vitória, em diferentes expansões (6,71%, 3,16%, 1,33%) e submeteu as misturas asfálticas desenvolvidas a diferentes ensaios mecânicos e determinações físicas. Havia uma certa suposição de que a expansão das escórias afetava o comportamento do concreto asfáltico ao longo de sua vida útil. Segundo o autor, é consenso entre os pesquisadores, que o fenômeno da expansibilidade das escórias de aciaria é provocado pela hidratação do óxido de cálcio livre (CaO) e do óxido de magnésio não reagido (MgO). Em presença de umidade, estes óxidos hidratam-se, aumentando de volume. Ainda, é sabido que o óxido de cálcio é responsável pela expansibilidade inicial, enquanto o óxido de magnésio pela manutenção do fenômeno de expansibilidade continuar por um longo tempo (TAVARES, 2012).

Os efeitos provocados durante a expansão da escória geram tensões internas que podem provocar trincas e fracionamento do material. Fissuras radiais ou “vulcãozinhos”, geralmente são geradas pela expansão da fração fina da escória, A expansão volumétrica transversal é responsável pelas fissuras longitudinais irregulares no revestimento asfáltico, o qual não apresenta elasticidade suficiente para acompanhar a ação das forças de tração resultantes desta expansão da camada de base e sofre ruptura longitudinal. Os estofamentos, predominantemente, transversais chamados “quebra-molas”, são causados pela expansão volumétrica longitudinal, cuja tendência de crescimento está relacionada às características internas do material na camada, como maior concentração de agregados graúdos e percentagem de vazios ou concentrações de material finamente pulverizado (GONTIJO, 2006). A Figura 23 apresenta os efeitos provocados pela expansão da escoria no concreto asfáltico.

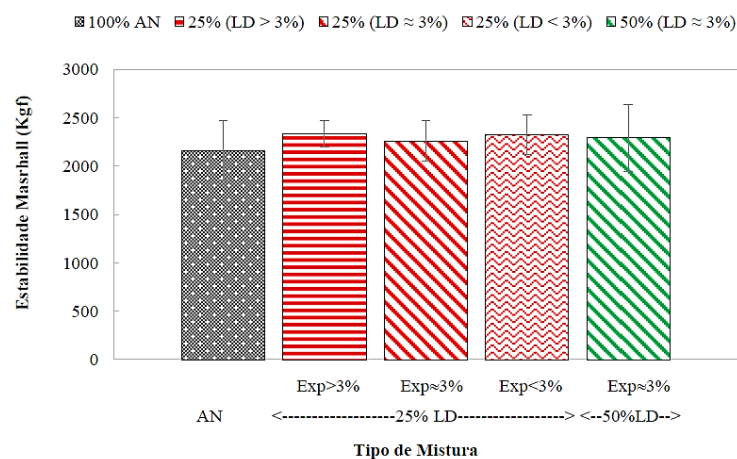
Figura 23 – Efeitos provocados pela expansão da escória em pavimentos asfálticos: (A) vulcãozinho; (B) fissura longitudinal; (C) quebra-molas.



Fonte: Schumacher (2018) (Adaptado).

Os resultados obtidos por Schumacher (2008) revelaram que quanto às características mecânicas e físicas, o agregado siderúrgico apresentou resistência mecânica muito maior do que os agregados calcários segundo a abrasão Los Angeles, o que confirma as propriedades superiores de resistência ao atrito da escória de aço, resultando em resistência à deformação permanente, resistência à abrasão e durabilidade. As características mecânicas da escória de aço não foram sensíveis ao nível de expansão do material. No entanto, os valores de absorção foram maiores para as escórias LD do que para os agregados naturais. Além disso, os valores de absorção aumentaram à medida que o nível de expansão de LD diminuiu. Isso pode levar ao aumento no percentual de ligante empregado na mistura asfáltica com grande substituição de agregados naturais por agregados de escória de aço. A Figura 24 apresenta os resultados de estabilidade Marshall para as misturas estudadas.

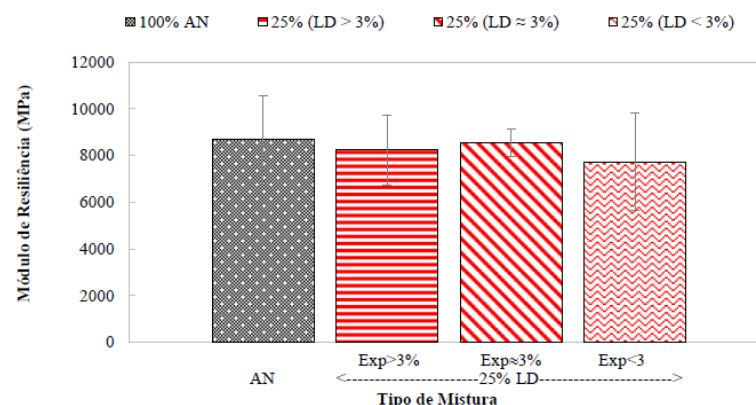
Figura 24 – Estabilidade Marshall para as misturas estudadas



Fonte: Schumacher (2018).

Os resultados para o Módulo de Resiliência (MR) desenvolvidos por Schumacher (2018), apresentados na Figura 25, confirmaram a alta rigidez das misturas aqui estudadas. No entanto, nenhuma diferença significativa foi encontrada entre as misturas pesquisadas. A literatura relata resultados positivos e negativos em relação aos efeitos do agregado siderúrgico sobre o módulo de resiliência. Ameri et al. (2013), por exemplo, obtiveram valores de MR menores em mistura com adição de agregado siderúrgico se comparadas à misturas com agregados naturais. Os autores atribuíram esse comportamento a menor afinidade do agregado siderúrgico com o aglutinante, quando comparado ao agregado natural. Outros estudos, no entanto, encontraram maior rigidez e relacionaram esses resultados ao melhor intertravamento do agregado siderúrgico em comparação com agregados naturais. Fakhri e Ahmadi (2017), afirmaram que o efeito da adesividade entre aglutinante e agregados no módulo de resiliência poderia ser mais significativo do que os efeitos de intertravamento promovidos pela escória. Como as amostras foram ensaiadas na temperatura intermediária (25°C), pode haver um efeito sinérgico de adesividade e intertravamento de partículas com alguns pequenos resultados negativos devido a adesão, mas resultados positivos em virtude do melhor intertravamento dos agregados.

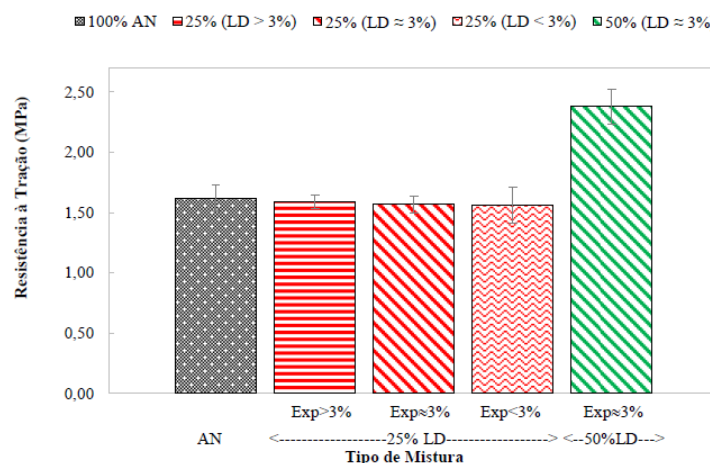
Figura 25 - Módulo de Resiliência (MR) das misturas estudadas



Fonte: Schumacher (2018).

Em relação à resistência à tração indireta à 25 °C, a norma brasileira DNIT ES 031/06 especifica um valor mínimo de 0,65 Mpa para o uso de misturas asfálticas. Assim, verifica-se que todas as misturas estudadas por Schumacher (2018) apresentaram RT acima desse valor (Figura 26). Esse resultado indica que, apesar da alta rigidez encontrada para as blendas, elas ainda têm a flexibilidade de atender às tensões de tração às quais serão submetidos quando a carga de tráfego é aplicada. A mistura com 50% de agregado siderúrgico apresentou valores mais elevados de resistência a tração provavelmente em consequência do maior teor de ligante nesta mistura. No entanto, este teste único não é conclusivo em relação à resistência à tração. Recomenda-se o uso de testes dinamicamente carregados para simular o efeito temporal e repetitivo do acúmulo de tensões de tração em misturas de asfalto.

Figura 26 - Resistência à Tração das misturas estudadas



Fonte: Schumacher (2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

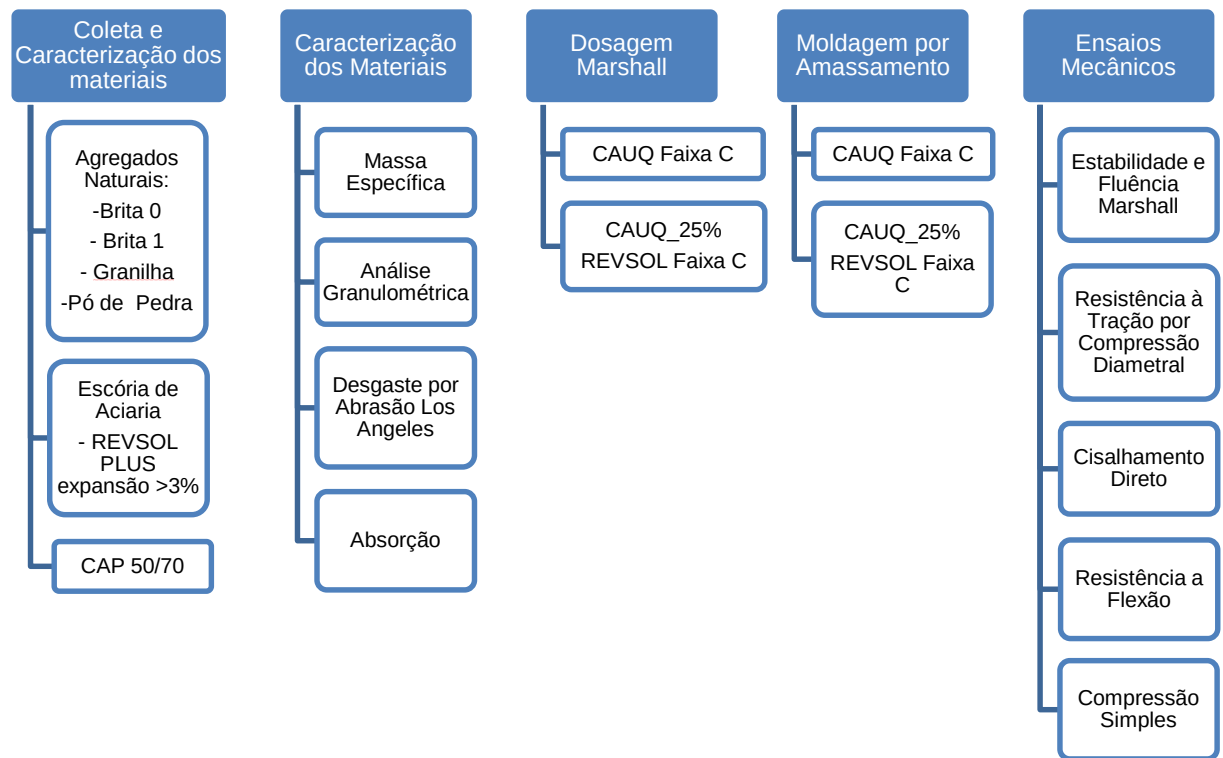
Este capítulo apresenta os métodos científicos necessários ao desenvolvimento da pesquisa, definindo as variáveis do problema bem como os ensaios para caracterização dos materiais utilizados e das misturas asfálticas em estudo.

3.1. MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL

Para a produção das misturas asfálticas foram utilizados agregados naturais britados (grãos e miúdos), cimento asfáltico de petróleo (CAP) e o coproduto Revsol Plus, disponibilizado pela Arcellor Mital Tubarão.

O programa experimental foi dividido em quatro etapas (Figura 27). Primeiro tem-se a coleta e caracterização de materiais. Em seguida, partiu-se para a obtenção dos teores de ligantes ótimos das misturas sem coproduto e com coproduto siderúrgico. Após a definição do teor de ligante, usinou-se as diferentes misturas conforme metodologia de compactação Marshall, que foram utilizadas como parâmetros de comparação com os corpos de prova extraídos de PPCA e moldados no cilindro padrão por amassamento. Por fim, realizaram-se ensaios para obtenção das propriedades mecânicas das PPCA.

Figura 27 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autor.

3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é proveniente da refinaria Petrobras/REDUC, a partir da destilação a vácuo do petróleo. O material foi fornecido pela empresa Único Asfaltos. Suas características, conforme ficha de especificação técnica da refinaria, são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Características do CAP 50/70 utilizado neste estudo

CERTIFICADO DE ENSAIO (Cimento asfáltico 50/70)					
Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade	T
Penetração	D5	50 a 70	57	0,1 mm	
Ponto de amolecimento	D36	46 min	49,9	grau C	
Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21 20RPM	D4402	274 min	420	cp	1 3 5
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	D4402	112 min	214	cp	1 5 0
Viscosidade Brookfield a 177 GC SP21	D4402	57 a 285	76	cp	1 7 7
RTFOT penetração retida	D5	55 min	58	%	
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	D36	8 max	6,4	grau C	
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D113	20 min	>150	cm	
RTFOT Variação em % massa	D2872	-0,5 a 0,5	-0,367	%	
Ductilidade a 25 GC	D113	60 min	>150	cm	
Solubilidade no Tricloroetileno	D2042	99,5 min	100,0 (3)	% massa	
Ponto de fulgor	D92	235 min	>300	grau C	
Índice de suscetibilidade térmica	X018	-1,5 a 0,7	-0,9	N/A	
Densidade relativa a 20/4 Graus celsius	D70	Anotar (1)	1,052	N/A	
Aquecimento a 177 °C	X215	NESP (2)	NESP	N/A	
Local: TQ 230254.		Data/horas amostragem: 27/06/2017 06:00			

Fonte: Laboratório REDUC conforme ensaios da especificação ANP realizados na própria refinaria.

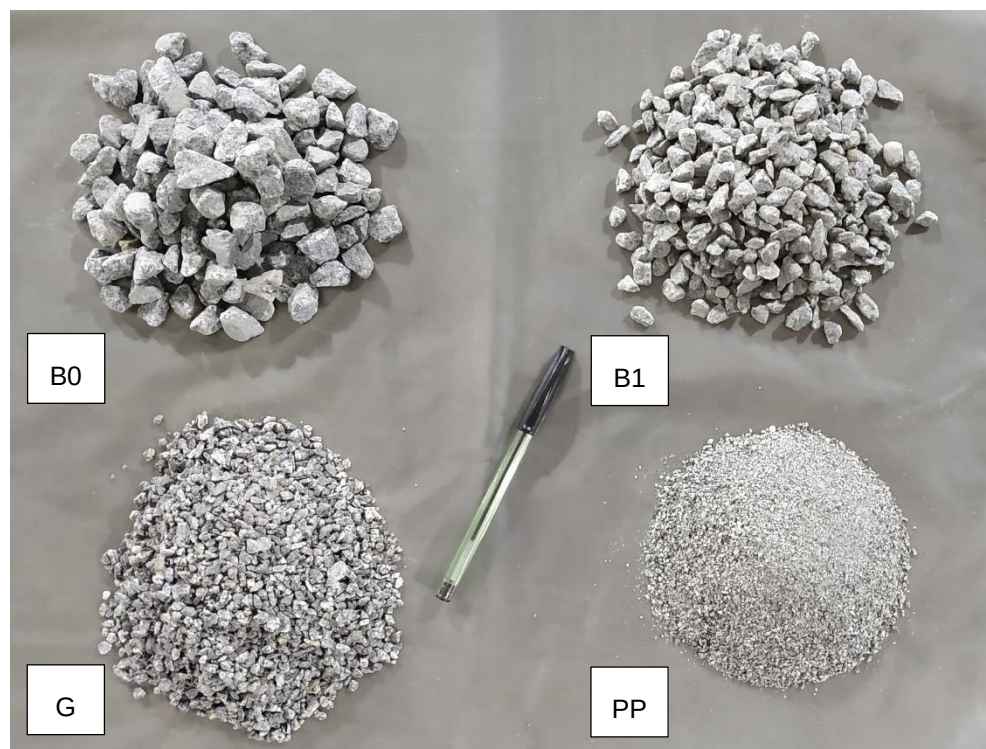
Baseado em Schumacher (2018), a faixa de temperatura utilizada para mistura do CAP com os agregados foi de 156°C à 165°C, determinada de acordo com a curva de viscosidade obtida utilizando os resultados da ficha técnica. Para compactação à

quente foi utilizada a faixa de 145°C à 152°C, também determinada pela curva de viscosidade do CAP.

3.1.2. Agregados Naturais (AN)

Os agregados naturais empregados são graníticos, originários da Pedreira Brasitália, localizada em Cariacica/ES. Foram utilizados na pesquisa quatro diferentes graduações, sendo elas: brita 1 (B1), brita 0 (B0), granilha (G) e pó de pedra (PP) (Figura 28).

Figura 28 - Agregados Naturais



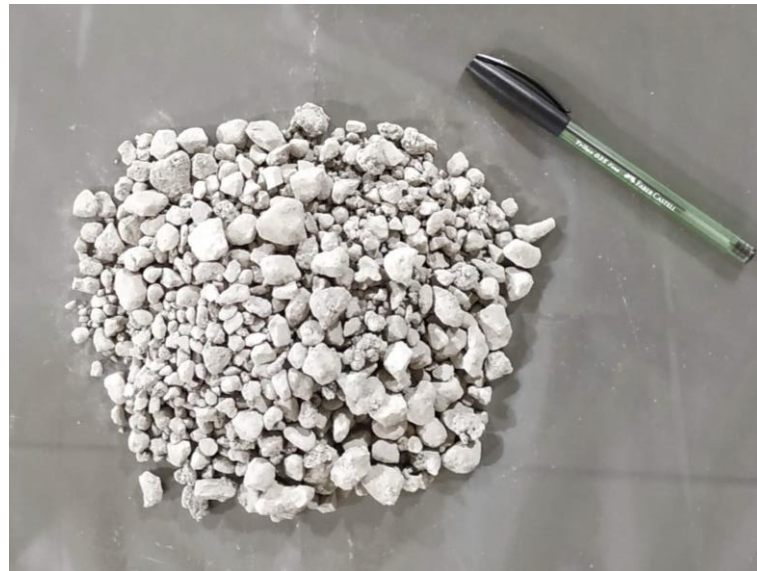
Fonte: Autor.

3.1.3. Escória LD (Coproduto Revsol Plus)

O coproduto Revsol Plus utilizado na pesquisa, foi coletado e fornecido pela empresa Arcelor Mittal Tubarão. Trata-se de um *blend* de escória de aciaria do tipo LD com

diferentes expansões (Figura 29). A amostra fornecida foi levada a ensaios de caracterização e, posteriormente, incorporada no projeto de misturas asfálticas na proporção de 25% em massa.

Figura 29 - Escória LD



Fonte: Autor.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Análise Granulométrica

A dimensão máxima do agregado ($D_{m\acute{a}x}$) pode afetar as misturas asfálticas tornando-as instáveis, prejudicando a trabalhabilidade ou provocando a segregação (LOURES,2017).

Baseando-se no proposto por Schumacher (2018), a análise granulométrica dos agregados naturais e reciclados foi realizada de acordo com a DNER-ME 083/98 e foram adotadas as frações correspondentes a faixa granulométrica C do DNIT. Quanto ao tamanho do agregado, foram divididos em grãos, retidos na peneira de 4,8mm, miúdo, passantes na peneira de 4,8mm e retidos na 0,075mm, e fíler ou

material de enchimento, passantes na peneira de 0,075mm. A Tabela 12 e a Figura 30 apresentam essas faixas.

Tabela 12 – Série de peneiras utilizadas na pesquisa

Série ASTM	Dimensões nominais das Peneiras										
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
Abertura (mm)	50,8	38,1	25,4	19,1	12,7	9,5	4,8	2	0,42	0,18	0,075

Fonte: Autor.

Figura 30- Frações granulométricas utilizadas na pesquisa



Fonte: Schumacher (2018)

3.2.2. Caracterização dos Agregados

3.2.2.1. Massa específica, densidade e absorção

Para verificação da massa específica, e sua influência na utilização do coproduto e agregados naturais, foi realizada a verificação de massa específica real e aparente conforme as metodologias de ensaio existentes.

Para a fração graúda de agregados, a massa específica real, aparente e absorção, que é a relação entre massa de água absorvida após 24 horas de imersão à temperatura ambiente e a massa seca do material, foram determinados de acordo com a metodologia DNER-ME 081/98.

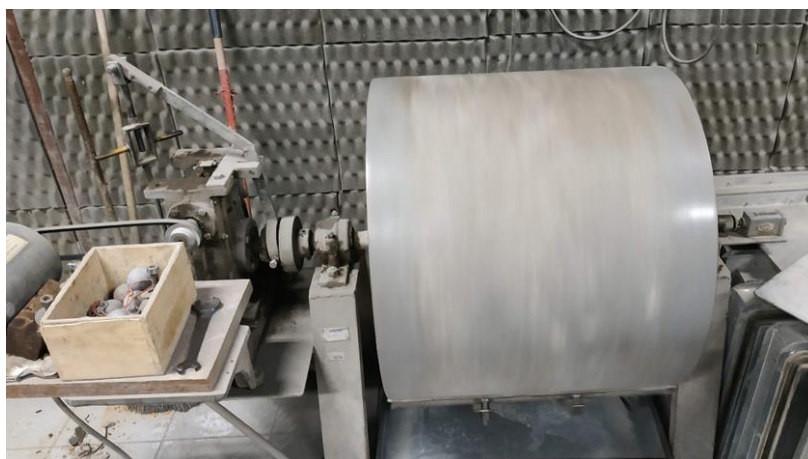
Na fração miúda, foram realizados os ensaios de massa específica real e aparente conforme a DNER-ME 194/98. E os mesmos parâmetros foram obtidos para o fíler de acordo com a metodologia DNER-ME 085/94.

3.2.2.2. Abrasão Los Angeles

O ensaio de determinação da abrasão Los Angeles foi executado de acordo com a faixa C na norma DNER-ME 035/98 colocando-se massa total $5.000\text{ g} \pm 10$ de agregado seco e lavado no tambor de desgaste (Los Angeles), juntamente com uma carga abrasiva equivalente a oito esferas de aço, submetidos a 500 revoluções à velocidade de 30 rpm a 33 rpm (Figura 31).

O ensaio foi realizado de acordo com a faixa C da norma acima citada para uma amostra de agregado natural, uma amostra de agregado coproduto e uma amostra de agregados naturais e coproduto na proporção de 25% em massa representando a mistura asfáltica utilizada na moldagem das PPCA (Tabela 13).

Figura 31 – Moinho de bolas para determinação da abrasão Los Angeles



Fonte: Autor.

Tabela 13 – Massa das amostras utilizadas no ensaio de Abrasão Los Angeles: (A)Agregado Natural; (B)Combinação de 25% de Escória LD e 75% de Agregado Natural; (C)Escória LD

Massa (g) da amostra para cada combinação de agregados			
Combinação	A	B	C
A.N.	5000,1	3750,3	0
Escória LD	0	1250,6	5004,3

Fonte: Autor.

3.2.3. Moldagem das PPCA

A moldagem dos CP's das misturas na faixa C com agregados naturais e com 25%, em massa, de escória LD foram desenvolvidas conforme procedimentos da norma DNIT 178/18 – PRO para dosagem Marshall. Os parâmetros volumétricos e as massas específicas real e aparente obtidas para as misturas após o procedimento de dosagem (DNIT 031/04-ES; DNER 043/95-ME) serviram como base para a moldagem das PPCA por amassamento.

Fixados os percentuais do Volume de Vazios, de massa específica aparente (σ_{mb}) e sabendo as dimensões de cada molde de aço, foi possível obter a massa da mistura asfáltica necessária para moldagem das PPCA.

$$M_{CAUQ} = \sigma_{mb} \cdot V_{PPCA} \quad (1)$$

Onde:

M_{CAUQ} = Quantidade em massa de mistura asfáltica numa PPCA;

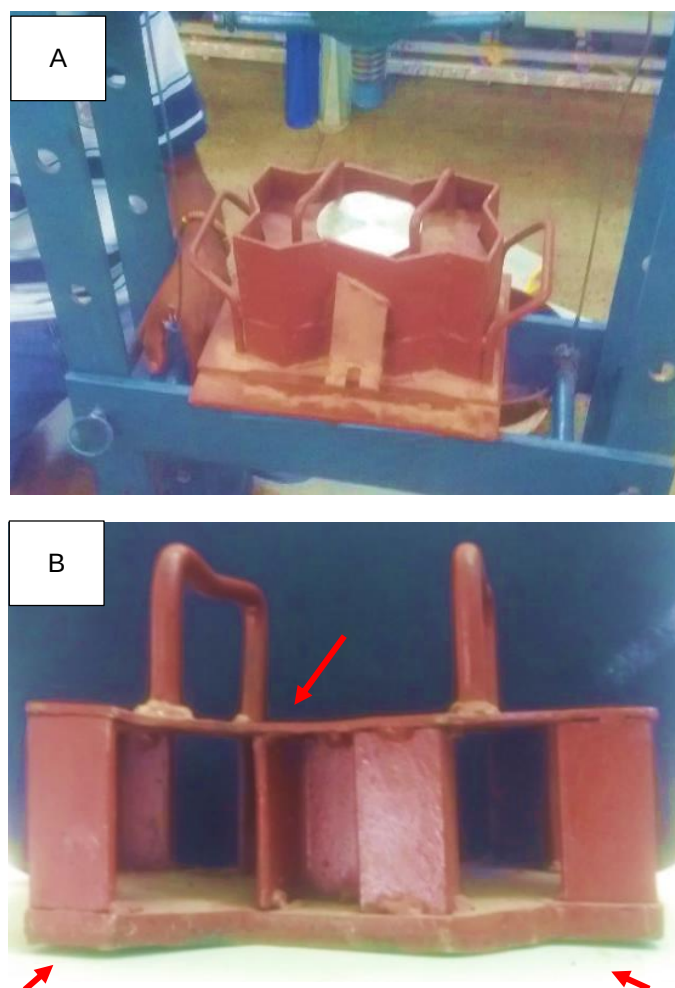
σ_{mb} = massa específica aparente;

V_{PPCA} = Volume de uma PPCA.

Sabendo a quantidade em massa de mistura asfáltica necessária para a moldagem das PPCA, partiu-se para o processo de preparação das misturas de acordo com Schumarcher (2018) e DNIT 178/18 – PRO.

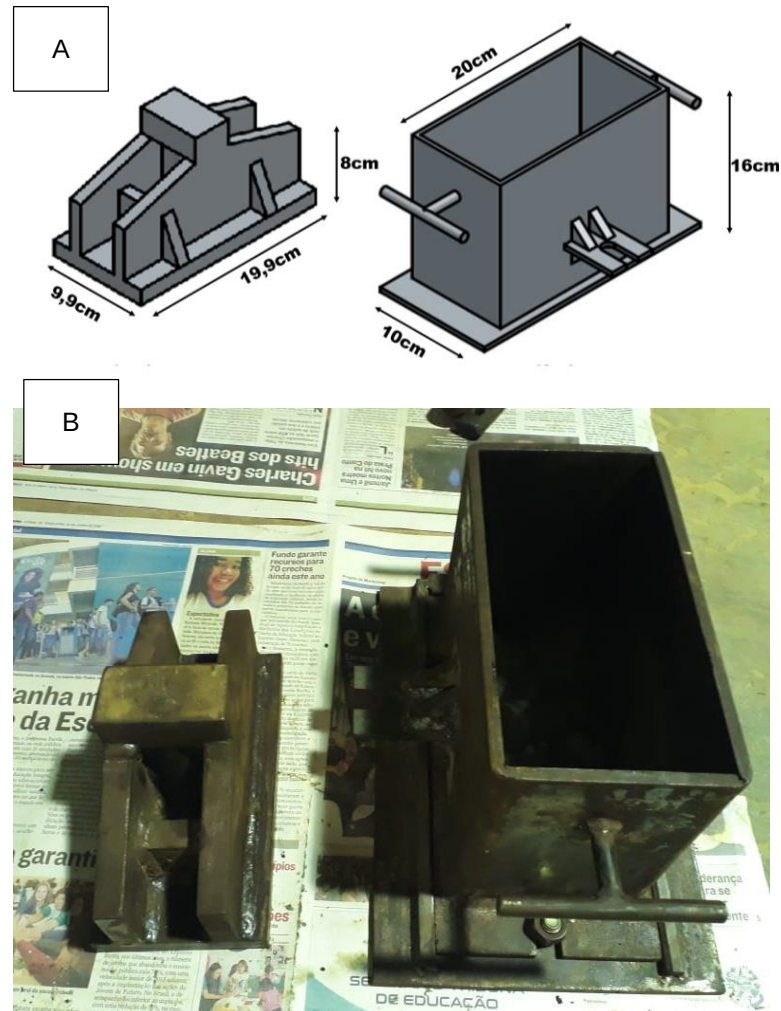
No processo inicial de prototipagem e moldagem das PPCA foi utilizado um molde usinado com geometria das PPC, denominado bloco de 16 faces, e utilização de CAUQ para aplicação a frio como material das peças. Ao longo dos testes preliminares, a mistura a frio apresentou uma baixa estabilidade e diminuição da coesão entre as peças. Também foi observada uma maior dificuldade na aplicação tendo em vista a necessidade de cortes nas peças para eventuais testes, além da forma desenvolvida apresentar uma grande deformação durante amassamento (Figura 32). Sendo assim, após avaliações preliminares, optou-se pela geometria mais simples retangular, bem como a fabricação de três moldes conforme a Figura 33.

Figura 32 – Forma PPCA inicial: (A) Durante processo de produção de PPCA; (B) Deformação no macho.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Molde para PPCA: (A) Projeto; (B) Forma usinada.

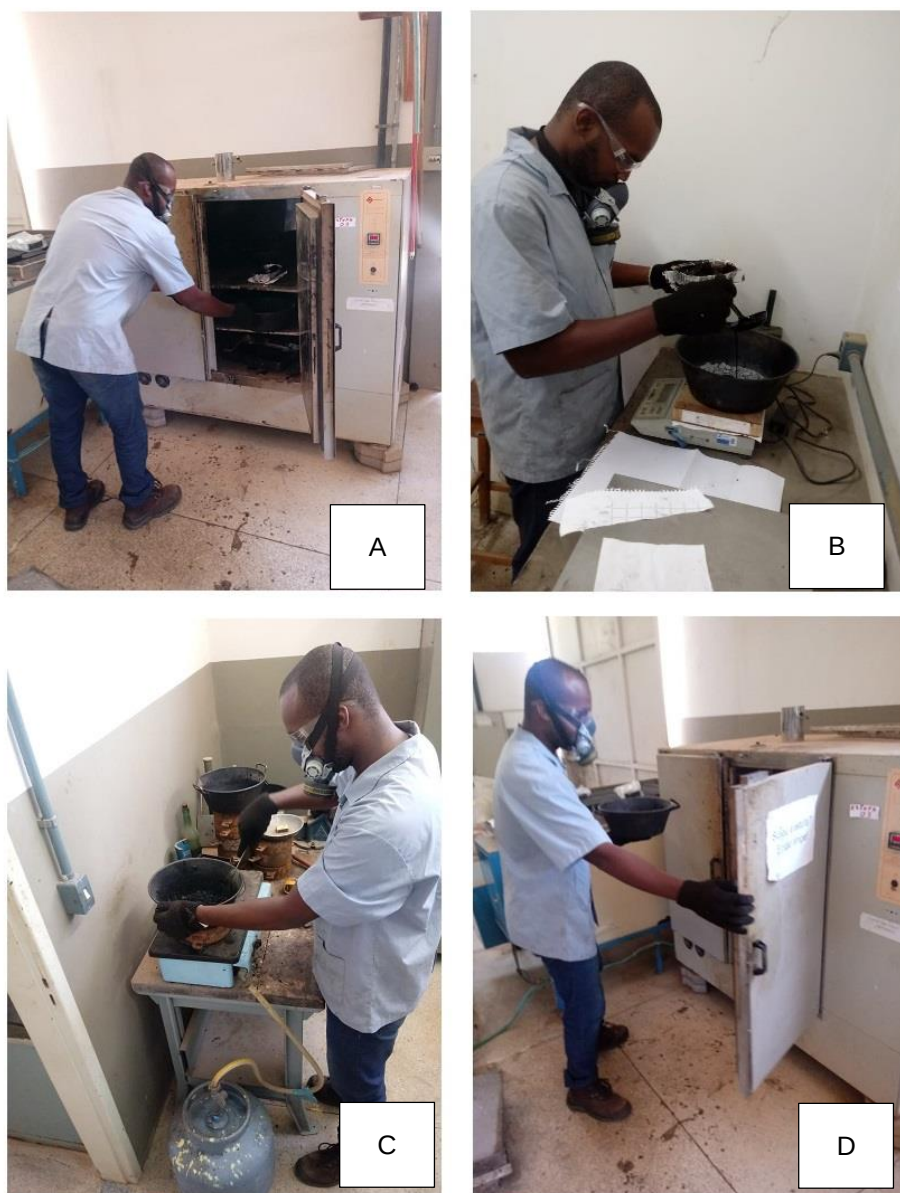


Fonte: Autor.

Os agregados naturais e reciclados foram aquecidos em estufa juntamente com CAP até a temperatura de mistura entre 156°C e 165°C (Figura 34 a, b e c). Após o processo completo de mistura, foi colocada em um recipiente metálico numa estufa na temperatura de compactação, entre 145°C e 152°C, por um período de 2 horas

± 10 minutos, denominado como período de envelhecimento de curto prazo (Figura 34 d).

Figura 34 – Preparação das misturas asfálticas: (A) Aquecimento de CAP e agregados; (B) Pesagem do CAP no teor de projeto; (C) Homogeneização de mistura no fogão; (D) Condicionamento de curto prazo.



Fonte: Autor.

Ao término do período de condicionamento, foram retirados da estufa o recipiente com a mistura solta e o molde de compactação. Colocou-se papel filtro dentro do molde para facilitar a separação do CP da placa de base após a compactação e aplicou-se

de 10 a 15 golpes com a espátula a fim de distribuir uniformemente a mistura dentro do molde (DNIT 178/18 – PRO). Em seguida, colocou-se a parte superior do molde que foi levado a uma prensa hidráulica e a mistura foi submetida ao processo de amassamento com uma carga axial máxima de 21 toneladas até que a PPCA chegasse ao volume correspondente à massa específica aparente obtida no projeto de mistura Marshall. Os CP's foram produzidos de forma que as PPCA tivessem a espessura de 2,0 cm para serem utilizadas no ensaio de cisalhamento direto, 3,5 cm e 7,0 cm nos ensaios de flexão e compressão simples. No entanto, a altura necessária não foi atingida num primeiro momento. Percebeu-se que para que as alturas fossem respeitadas, os valores de massa específica aparente encontrados nos corpos de prova moldados por amassamento foram menores que o valor pré-fixado. A Tabela 14 apresenta os valores de massa específica e o sistema de moldagem das PPCA na Figura 35.

Tabela 14 – Valores de massa específica aparente de acordo com o processo de moldagem

Mistura	σ_{mb} (g/cm ³)	
	Marshall	Amassamento
0% LD	2,515	2,428
25% LD	2,535	2,461

Fonte: Autor.

Figura 35 – Equipamentos de moldagem de CP's: (A) Prensa de moldagem por amassamento das PPCA; (B) Macaco extrator das PPCA; (C) PPCA finalizadas.



Fonte: Autor.

CPs nas dimensões padrões da norma DNIT 178/18 – PRO também foram moldados por amassamento a fim de se obter parâmetros comparativos com os CP's Marshall de estabilidade e fluência e resistência a tração (Figura 36).

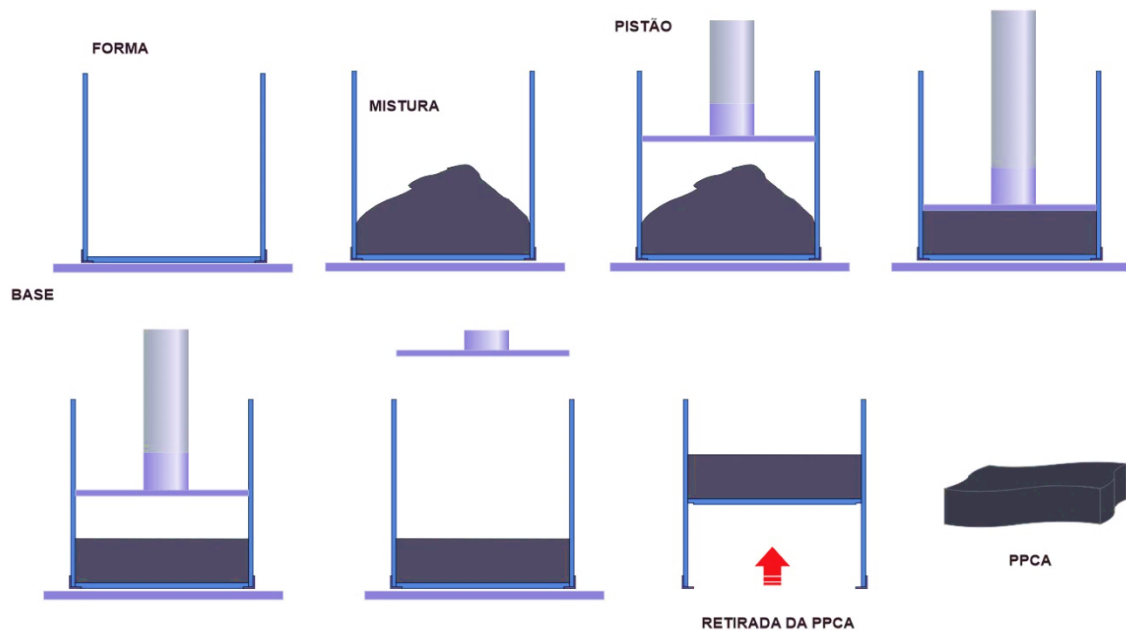
Figura 36 – Moldagem e extração dos CP's que representam as PPCA.



Fonte: Autor.

A Figura 37 apresenta o processo esquemático de produção das PPCA.

Figura 37 – Processo de moldagem por amassamento das PPCA.



Fonte: Autor.

3.2.4. Propriedades Mecânicas das PPCA

3.2.4.1. Estabilidade Marshall

A carga máxima a qual o CP resiste antes da ruptura é definida com estabilidade Marshall. O ensaio é realizado conforme os procedimentos descritos na norma DNER-ME 043/95. Durante a realização do ensaio, o CP é colocado em banho térmico à temperatura de 60 °C no período de 30 a 40 minutos. Em seguida, ele é colocado no molde de compressão e levado à prensa pneumática (Figura 38). A estabilidade é determinada a partir da carga, em kgf, necessária para produzir o rompimento do CP multiplicado pelo fator de correção (f), que é função da espessura do CP registrada como Estabilidade Lida. este valor é corrigido para a espessura do CP ensaiado, multiplicando-o por um fator que é função da espessura do CP:

$$f=927,23 h^{-1,64} \quad (2)$$

Onde:

f = fator de correção;

h = espessura do CP.

Figura 38 – Prensa para análise de estabilidade Marshall



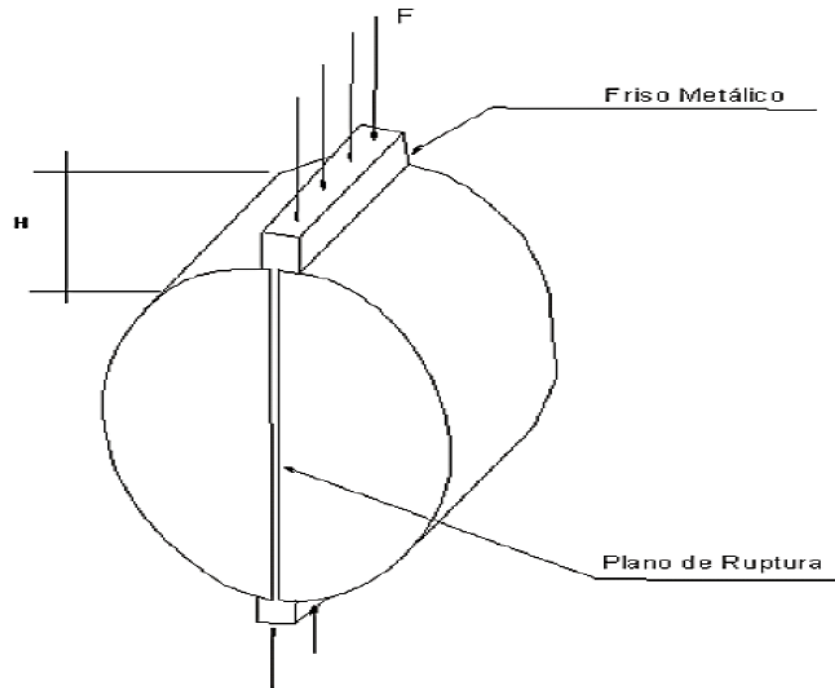
Fonte: Autor.

3.2.4.2. Resistência a Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração segue a normativa DNIT-ME 136/10, que é equivalente à americana ASTM D6931/2012. O ensaio utiliza a compressão diametral de um CP cilíndrico, de medidas 3,50 - 6,50cm de altura (conforme o tamanho do friso) e $10\text{cm} \pm 0,2\text{cm}$ de diâmetro, respectivamente (MENESES,2017).

O corpo de prova deve ser acondicionado à temperatura de ensaio de 25°C durante 2h. Após seu condicionamento, o CP é levado à prensa pneumática e montado de maneira que os pratos da prensa comprimam frisos metálicos e estes o CP, conforme ilustra a Figura 39.

Figura 39 – Ensaio de Tração por compressão diametral



Fonte: DNIT ME-136 (2010).

A compressão é aplicada progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que o CP se rompa. De posse da carga de ruptura (F), é possível se calcular a resistência à tração:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH} \quad (2)$$

Onde:

σ_r - resistência à tração, em kgf/cm²;

F - carga de ruptura, em kgf;

D - diâmetro de corpo de prova, em cm;

H - altura do corpo de prova, em cm.

Este ensaio foi desenvolvido no Brasil pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland (Carneiro, 1943 apud BERNUCCI, *et al.*, 2008). A configuração desse ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro (Figura 40).

Bernucci, *et al.* (2008) ressaltam que os valores típicos de Resistência à Tração (RT) para misturas asfálticas à quente recém-moldadas ou logo após a construção em pista situam-se entre 0,5 MPa e 2,0MPa. À medida que as misturas asfálticas envelhecem em pista, a RT aumenta, o que nem sempre representa vantagem, pois também perde sua flexibilidade, ou seja, aumenta seu módulo de resiliência.

Figura 40 – Ensaio de Determinação de resistência a tração por compressão diametral de CP com adição de 25% de escória.



Fonte: Autor.

Para a análise de resistência à tração, foram ensaiados seis CPs para cada tipo de mistura (agregado natural e mistura com adição de escória): sendo três moldados no compactador Marshall e três por amassamento no cilindro de aproximadamente 10cm de diâmetro e 6,5cm de altura.

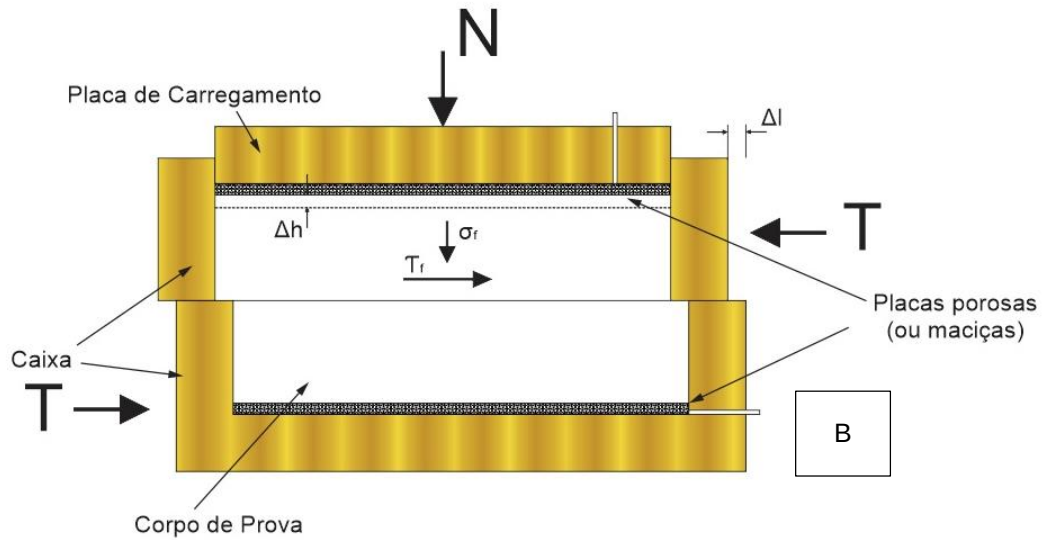
3.2.4.3. Cisalhamento Direto

Este método de ensaio determina a resistência ao cisalhamento de um material (em sua maioria, solo) através da deformação a uma taxa controlada em um único plano de cisalhamento determinado pela configuração do aparelho. Os ensaios foram executados de acordo com a norma ASTM D3080/2011.

A amostra é confinada em uma caixa de cisalhamento, metálica, de seção transversal quadrada ou circular, dividida horizontalmente a meia-altura mantendo-se uma pequena folga entre as duas partes da caixa. Ao ocorrer o colapso dentro de um elemento da amostra submetida às tensões principais σ'_1 e σ'_3 , será formado um plano de deslizamento no interior do elemento a um ângulo θ (Figura 41).

A caixa de cisalhamento destina-se a representar as condições de tensão ao longo do plano desse deslizamento. É aplicada uma força vertical (N) no corpo de prova por meio de uma placa de carregamento, e sob a ação dela, pode acontecer adensamento da amostra. Em seguida, a tensão cisalhante é aplicada gradualmente sobre um plano horizontal, fazendo com que as duas metades da caixa se movam, uma em relação a outra, sendo a força cisalhante necessária (T) medida junto ao deslocamento de cisalhamento (Δl) correspondente. A tensão cisalhante induzida no interior da amostra no plano de deslizamento é igual àquela exigida para cisalhar as duas metades da caixa (KNAPPETT e CRAIG, 2014).

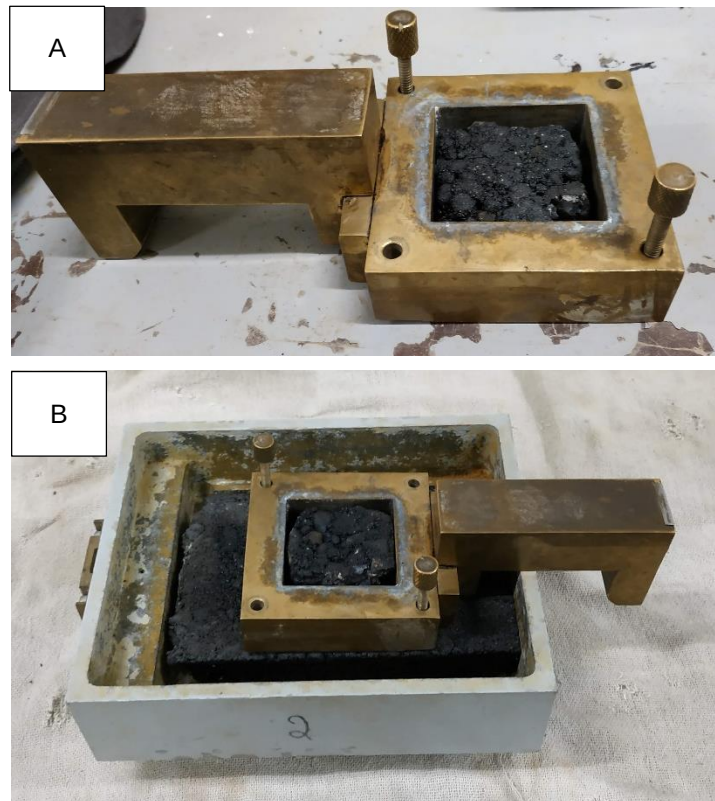
Figura 41 – Ensaio de Cisalhamento Direto: Caixa de cisalhamento.



Fonte: Autor.

Para essa pesquisa as amostras foram previamente moldadas no formato de PPCA, conforme o item 3.2.3, na espessura de aproximadamente 2,0 cm. Foram avaliados os comportamentos das PPCA em contato com uma camada de solo e o contato bloco-bloco. Para a parte superior da caixa de cisalhamento, PPCA foram talhadas individualmente até obter as dimensões de 5x5cm do anel de cravação quadrado de forma a ser encaixada na caixa (Figura 42).

Figura 42 – Caixa de cisalhamento: (A) Parte Superior; (B) Representação do contato entre PPCA.



Fonte: Autor.

A parte inferior da caixa metálica do equipamento foi substituída por uma PPCA e por uma camada de solo compactado simulando a camada de base do pavimento compactada na umidade ótima de acordo com pesquisas desenvolvidas por Pimenta (2019). Na superfície da camada de solo compactado foi aplicada uma pintura de ligação desenvolvida pelo autor composta de CAP 50/70 e querosene na proporção de 1:1 em massa. A proporção de asfalto diluído foi baseada na composição do asfalto diluído CM-30, da Greca asfaltos, com 50% em massa de ligante e 50% em massa de solvente. A aplicação da pintura de ligação seguiu as recomendações de execução de pavimentos asfálticos.

Durante o cisalhamento de cada amostra, foram registrados os valores de deslocamento horizontal, tensão normal e tensão cisalhante.

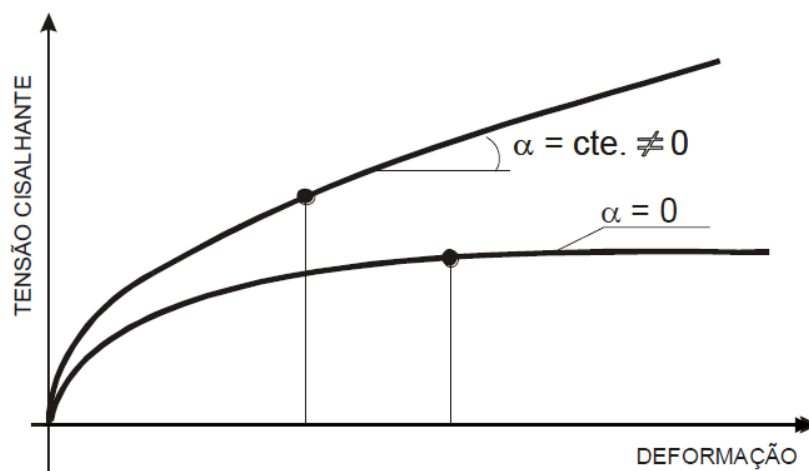
Foram avaliadas duas situações diferentes para cada mistura asfáltica em estudo (agregado natural e com adição de escória): o contato entre as superfícies das PPCA e o contato entre a superfície de camada granular, com pintura de ligação, e a PPCA.

Para os resultados nos quais as curvas não possuem uma caracterização da ruptura bem definida, diferentes critérios podem ser adotados para essa determinação conforme Gerscovich (2010):

- Tensão de Pico;
- Máxima razão das tensões principais;
- Deformação Limite;
- Estado crítico, a partir do qual as deformações passam a ser nula;
- Resistência residual.

Neste estudo, o material se comporta com um enrijecimento progressivo para determinadas tensões e o critério de ruptura utilizado pode ser o de deformação limite baseado no proposto por Campos e Carrillo (1995) para solos. Segundo os autores, a ruptura para solos pode ser assumida quando a curva tensão-deformação permanece com uma inclinação constante α , e a tensão cisalhante de ruptura corresponderia ao deslocamento no qual a condição de α constante prevalece (Figura 43).

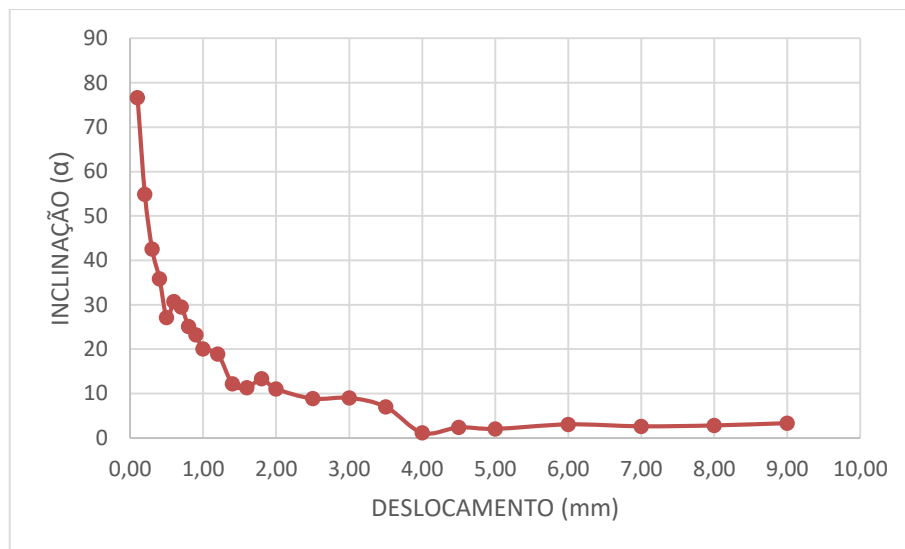
Figura 43 – Tensão cisalhante de ruptura



Fonte: Gerscovich (2010).

Foram geradas curvas relacionando a inclinação α com o deslocamento horizontal para as condições de estudo explicitando o ponto em que α se torna constante (marcado pela reta). Tal ponto, de deslocamento conhecido, pode ser determinado então na curva de cisalhamento. A Figura 44 apresenta a variação da inclinação α em relação ao deslocamento horizontal para o contato PPCA-base com adensamento de 100 kPa. Nela, foi observada a constância da inclinação a partir de 4,0mm de deslocamento. Feita a análise para todas as curvas, apresentou-se os valores de tensão cisalhante de ruptura para cada situação.

Figura 44 - Variação da inclinação α em função do deslocamento para a mistura com 0% de escória LD no contato PPCA-base adensada com 100 kPa.



Fonte: Autor.

Prashanth, *et al.* (2016) ao avaliarem a resistência ao arrancamento de geossintéticos do solo com o equipamento de cisalhamento direto adaptado, utilizaram uma relação para aferição dos parâmetros de força normal e ângulos de atrito na interface entre os materiais.

Os resultados dos testes de arrancamento são geralmente representados por termos de fator de eficiência ($\tan \delta / \tan \phi$), onde " δ " é o ângulo de atrito da interface geossintético e solo e " ϕ " é o ângulo de atrito do solo. No entanto, autores como Wang e Richwien (2002) e Ochai *et al.* (1996) também apresentaram resultados de arrancamento em termos de coeficiente de atrito (f^*), que é avaliado usando a

equação a seguir. Isso também pode ser definido como razão de máxima tensão de cisalhamento sobre a tensão normal aplicado.

$$f^* = \tan \delta = \frac{P_{max}}{2 \times b \times l \times \sigma_n}$$

$$f^* = \frac{\tau_{max}}{\sigma_n}$$

Onde:

b – largura do corpo de prova;

l – Comprimento do corpo de prova;

σ_n – tensão normal;

$P_{m\acute{a}x}$ – Força Normal de arrancamento máxima obtida no ensaio;

T_{cor} – tensão cisalhante;

f^* – coeficiente de atrito na interface dos materiais;

3.2.4.4. Flexão de Corpos de Prova

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 12142/10 e com a metodologia de Zhang *et. al* (2018) com três amostras PPCA na espessura de 35mm e três na espessura de 70mm. O equipamento utilizado no ensaio foi uma prensa hidráulica calibrada para ensaios mecânicos com capacidade de carga de 5 toneladas. As PPCA foram apoiadas na face inferior com dois apoios distantes 80mm entre si e na face superior por um apoio no centro da peça conforme Figura 45. Aplicou-se um carregamento gradativo até a ruptura da amostra. Este ensaio foi baseado na norma ASTM C 674 (1977b), que indica que a tensão de ruptura

à flexão pode ser calculada através da seguinte expressão. A equação a seguir apresenta a resistência a tração na flexão das PPCA

$$TRF = \frac{3.P.L}{2.b.h^2}$$

Onde:

TRF = Tensão de Ruptura à Flexão;

P = carga no instante de ruptura (N);

L = distância entre os apoios em mm;

b = largura média do corpo-de-prova na seção de ruptura, em mm;

h = altura média do corpo-de-prova na seção de ruptura, em mm.

Figura 45 – Ensaio de Flexão das PPCA de 35mm e 70mm.



Fonte: Autor.

A Tabela 15 apresenta os parâmetros das PPCA utilizadas no ensaio de flexão.

Tabela 15 – Dados das amostras de PPCA utilizadas no ensaio de Flexão

Espessura Nominal da PPCA (mm)	Amostra	d (mm)	b (mm)	Comprimento médio da PPCA (mm)	Massa da PPCA (g)
35	B1	35,56	100,85	200,70	1557,3
	B2	35,29	100,72	201,25	1556,6
	B3	35,90	100,63	201,34	1565,30
70	B4	70,22	101,29	201,68	3106,6
	B5	70,22	100,73	200,88	3079,9
	B6	69,67	100,75	202,31	3117,50

Fonte: Autor.

3.2.4.5. Ensaio de Compressão Simples das PPCA

Os ensaios de resistência à compressão seguiram o preconizado pela ABNT NBR 9781/13 em todas as etapas, conforme descrito sucintamente a seguir. A exceção é que nesta etapa, antes da realização dos ensaios de compressão, todas as peças passaram por uma análise dimensional, com resolução de 1 mm, determinando altura, largura, comprimento, sua identificação de numeração e seu peso. Conforme estabelece a ABNT NBR 9781/13, o ensaio de resistência à compressão simples deve ser realizado após imersão das peças em água por 24 horas. Este procedimento não foi adotado na realização deste estudo. Foram utilizadas três PPCA na espessura de 35mm e três na espessura de 70mm para execução do ensaio. A Resistência à Compressão para PPC padrão apresenta-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Resistência característica à compressão

Solicitação	Resistência característica à compressão (MPa)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados,	≥ 50

Fonte: ABNT NBR 9781 (2013).

4. RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados os resultados dos parâmetros de dosagem e dos ensaios complementares propostos para este estudo. Embora exista uma correlação entre os resultados, estes serão apresentados na forma de tópicos, para melhor disposição dos dados.

4.1. DOSAGEM MARSHALL

4.1.1. Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados no desenvolvimento da pesquisa apresentaram as seguintes características granulométricas conforme a norma DNER-ME 083/98 (Tabela 17).

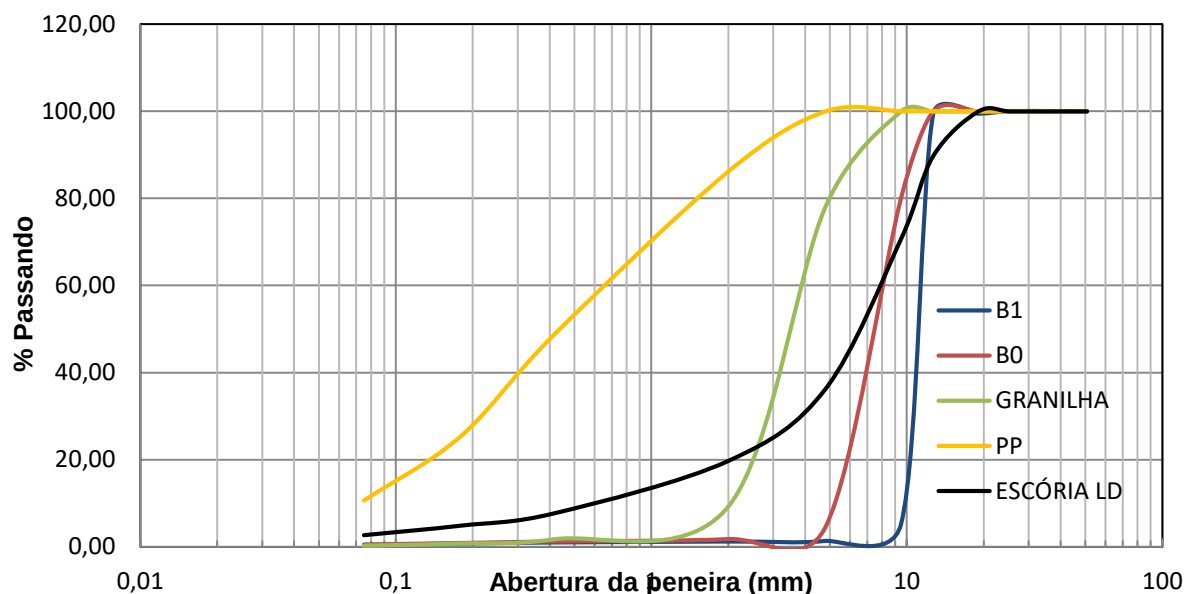
Tabela 17 – Porcentagens passantes nas peneiras da norma DNER – ME 083/98 para cada agregado utilizado.

Porcentagem passante por agregado (%)						
Série ASTM	Abertura (mm)	LD	B1	B0	GRANILHA	PP
2"	50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	99,41	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	89,76	99,41	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	70,70	5,16	80,09	100,00	100,00
Nº 4	4,8	36,19	1,31	4,46	78,00	99,95
Nº 10	2	19,69	1,17	1,79	9,20	86,13
Nº 40	0,42	7,72	0,95	1,23	1,74	48,91
Nº 80	0,18	4,85	0,70	0,88	0,74	25,41
Nº 200	0,075	2,66	0,40	0,52	0,25	10,57

Fonte: Autor.

É possível observar a escória LD como um material bem graduado em relação as demais curvas da Figura 46. Essa característica favorece o uso do material em diferentes aplicações dada a facilidade em adicioná-la as composições.

Figura 46 – Curvas granulométricas para cada agregado utilizado na pesquisa



Fonte: Autor.

Os agregados utilizados no projeto de mistura foram divididos, de acordo com o diâmetro dos grãos, em três frações diferentes para análise dos parâmetros físicos. São elas: agregado graúdo (material retido na peneira de abertura 4,8mm), agregado miúdo (material passante na peneira de abertura 4,8mm e retido na de 0,075mm) e fíler (material passante na peneira de 0,075mm). Para essas diferentes frações, foram avaliadas as massas específicas real e aparente e calculada a massa específica combinada para a mistura com 25% de escória LD. A Tabela 18 apresenta os valores obtidos para as frações de agregado natural, escória LD e para a mistura com Escória LD.

Tabela 18 – Massas específicas reais para as misturas utilizadas na pesquisa

Fração do agregado	Graúdo	Miúdo	Fíler
% da fração na composição de agregados	44,41%	51,58%	4,01%
Gsb LD (g/cm ³)	3,459	3,497	2,984
Gsb AN (g/cm ³)	2,828	2,828	2,657
Gsb Combinado (75%AN + 25%LD) (g/cm ³)	2,986	2,995	2,739
Absorção AN	0,55%	-	-
Absorção LD	5,19%	-	-

Fonte: Autor.

4.1.2. Abrasão Los Angeles

A abrasão típica de uma a escória varia entre 20-25% (FHWA, 2008). Para os agregados naturais a norma DNIT-ES 031/06 estabelece um desgaste igual ou inferior a 50% como valor aceitável na elaboração de um projeto de misturas asfálticas.

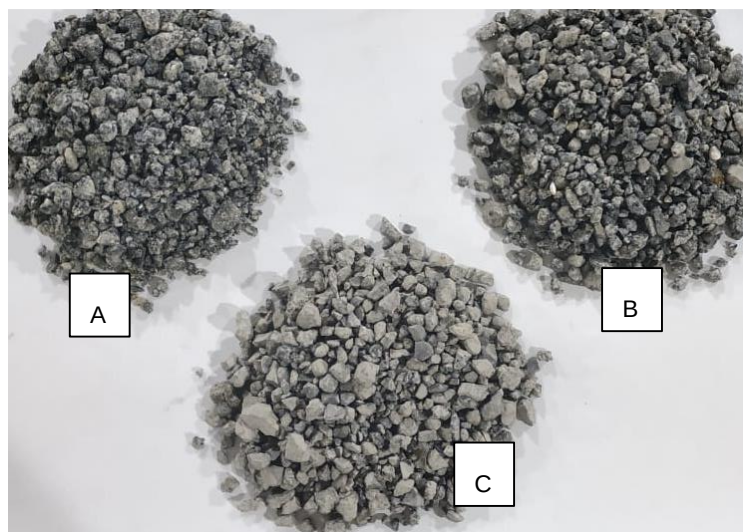
Os valores obtidos para as amostras de agregado natural, amostra com 75% de agregado natural e 25% de escória LD e amostra de escória LD encontram-se na Tabela 19 e as amostras na Figura 47.

Tabela 19 - Abrasão Los Angeles: (A)Agregado Natural; (B)Combinação de 25% de Escória LD e 75% de Agregado Natural; (C)Escória LD

Amostra	A	B	C
Massa total (g)	5001,1	5000,9	5004,3
Massa após ensaio (g)	2721,0	3018,0	3709,0
Abrasão Los Angeles	45,6%	39,7%	25,9%

Fonte: Autor.

Figura 47 - (A) Agregado Natural; (B) Combinação de 25% de Escória LD e 75% de Agregado Natural; (C) Escória LD



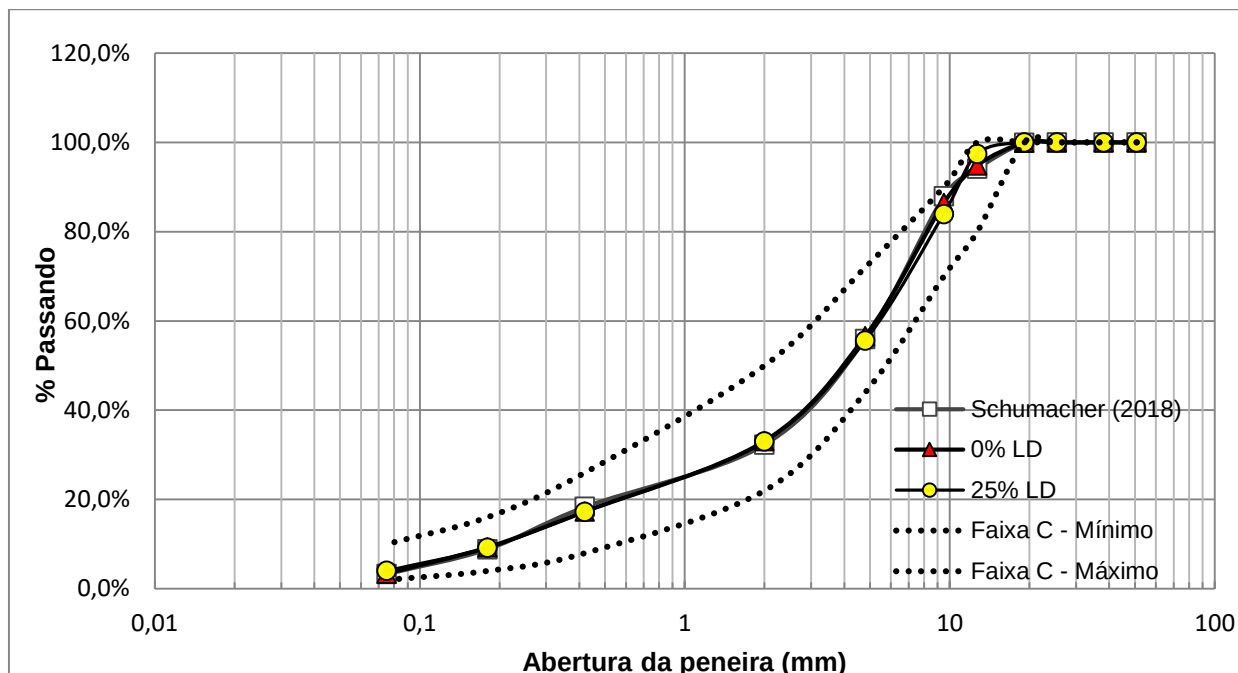
Fonte: Autor.

4.1.3. Dosagem

Segundo Roberts *et al.* (1996), é importante compreender que o projeto de mistura é um processo que determina o volume de asfalto e agregado requerido para produzir uma mistura com as propriedades projetadas. Todavia, a obtenção exata de medidas do volume de agregados e asfalto no laboratório ou em campo são muito difíceis. Para simplificar este problema, massas são usadas no lugar de volumes e a massa específica é usada para converter massa para volume.

Para a dosagem na Faixa “C” da norma DNIT-ES 031/06, foram realizadas dosagens Marshall para misturas com 100% de agregado natural e com substituição de agregado natural por 25% de escória LD. A curva granulométrica foi enquadrada nos limites da norma e aproximando à curva desenvolvida nas pesquisas de Schumacher (2018) (Figura 48).

Figura 48 – Composição granulométrica das misturas estudadas



Fonte: Autor.

A composição granulométrica para cada mistura foi ajustada a curva similar às da pesquisa de Schumacher (2018), obtendo as porcentagens em massa por agregado conforme mostra a Tabela 20.

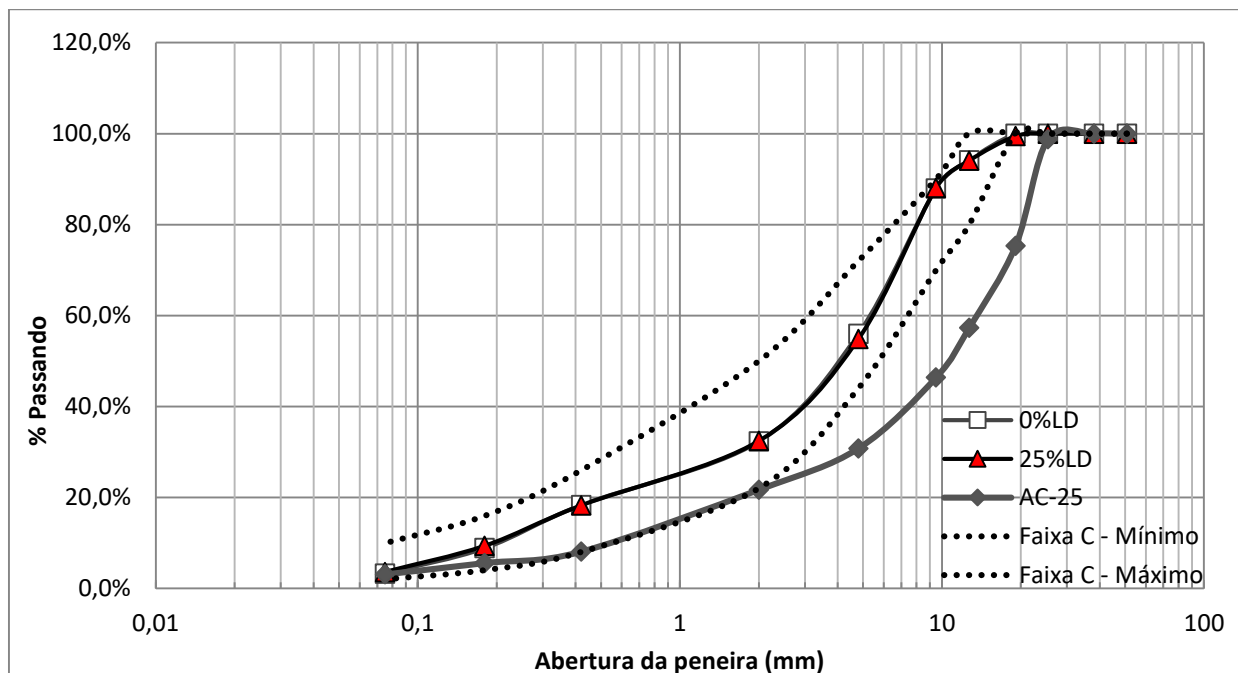
Tabela 20 – Porcentagem em massa referente a cada agregado nas misturas analisadas

Mistura	Escória LD	Brita 1	Brita 0	Granilha	Pó de Pedra
0% LD	0%	10%	30%	25%	35%
25% LD	25%	5%	20%	20%	30%

Fonte: Autor.

Em relação as PPCA moldadas por Zhang, *et al.* (2018), a Figura 49 apresenta a faixa granulométrica utilizada comparadas ao estudo atual apresentando uma maior graduação.

Figura 49 – Curvas granulométricas da faixa AC-25 chinesa e do presente estudo



Fonte: Autor.

As dosagens foram realizadas conforme a metodologia Marshall. Foram produzidos CPs com aplicação de 75 golpes em cada lado, conforme a norma DNER 043/95, variando o teor de ligante a partir de 4,0% com incrementos de 0,5%. A determinação do teor ótimo de ligante, também chamado teor de projeto (TP), para as faixas granulométricas utilizadas (0% LD e 25%LD) deram-se a partir da relação entre Volume de vazios (VV) e teor de ligante e da Relação Betume/Vazios (RBV) e teor de ligante (Bernucci *et al.*, 2008). As médias dos teores centrais obtidos no ensaio determinaram o TP. Os parâmetros devem atender aos limites estabelecidos para aplicação em camada de rolamento, especificados em DNIT-ES 31/06 e explicitados na Tabela 21. A Figura 50 apresenta tentativas para a dosagem Marshall com 25% de escória LD.

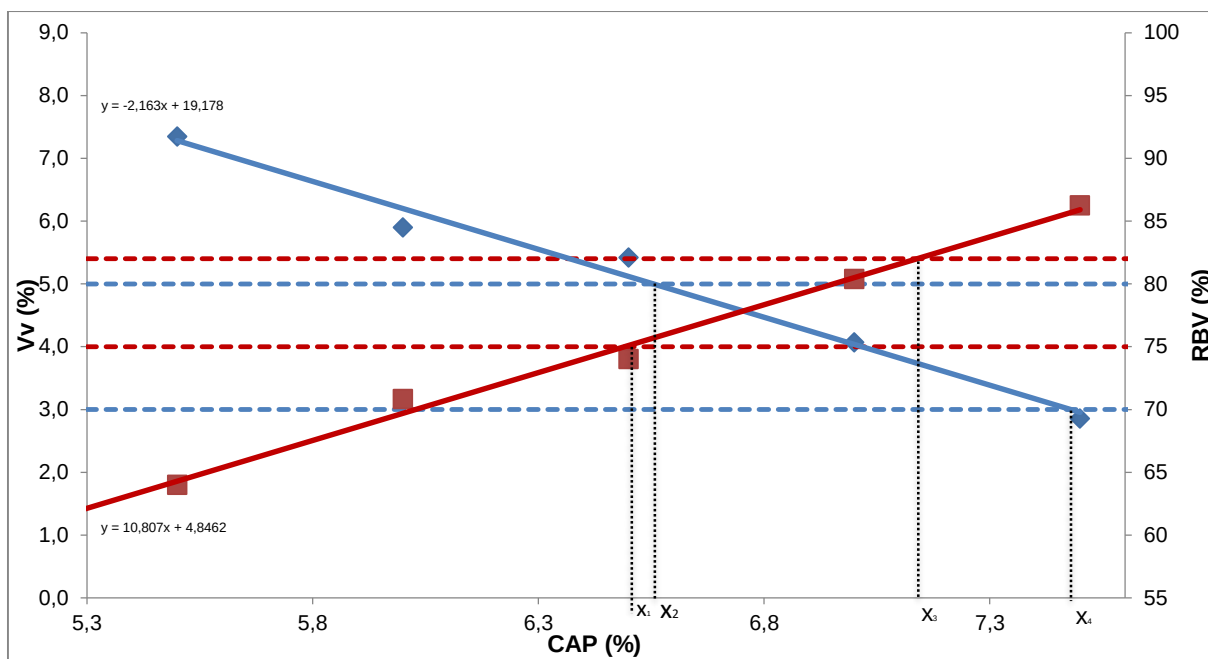
Tabela 21 – Limites para camada de rolamento de pavimentos flexíveis

Característica	Valor
TP(%)	4,5 - 9
Vv(%)	3 - 5
RBV	75-82

Estabilidade Mínima (kgf)	500
Resistência a tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima (Mpa)	0,65

Fonte: DNIT (2006).

Figura 50 – Tentativas para dosagem Marshall da mistura com 25% de escória LD e 75% de agregados naturais.



Fonte: Autor.

O projeto de mistura elaborado segundo Schumacher (2018) com 0% de agregados siderúrgicos obteve um TP de 5,14%. Para a mistura com substituição parcial de agregados naturais por 25% de agregado siderúrgico, a média dos teores centrais encontrou um TP de 6,52%. Essa variação na percentagem de ligante dá-se pela composição da escória LD estudada, que é diferente da analisada por Schumacher (2018). Prova disso é a absorção da escória LD estudada (Tabela 18) ser duas vezes maior que a absorção da escória LD utilizada por Schumacher (2018), para expansão aproximada de 3% que pode ser um dos fatores para o aumento no consumo de ligante. A expansão adotada no presente estudo foi de 3% baseada no estabelecido pela norma do DNER - EM 262/94.

Abdelgalil e Nor (2014a) obtiveram TP de 6,1% que induz um consumo maior de ligante dada a menor faixa granulométrica para a composição de agregados naturais em comparação com o estudo atual. Já Zhang, *et al.* (2018) obtiveram TP de 3,4%

para a Faixa AC-25 que representa uma faixa granulométrica maior que a utilizada no presente estudo.

A Tabela 22 mostra os parâmetros geométricos e volumétricos dos CP's cilíndricos compactados bem como o tipo de ensaio que cada CP foi ensaiado para as misturas CAUQ_25%LD e CAUQ_0%LD e, a metodologia de compactação implementada.

Tabela 22 – Parâmetros volumétricos das misturas 0%LD e 25%LD moldadas conforme compactação marshall e por amassamento passa as PPCA

Mistura	CP	H (mm)	D (mm)	TP (%)	VV (%)	RBV (%)	Compactação	Ensaio
0% LD	38AN	65,23	101,84	5,2	3,66	76,84	Marshall	EF
	39AN	64,86	101,33		3,23	78,71		
	40AN	64,12	101,93		3,13	79,28		
	41AN	64,45	101,97		3,48	75,78		
	42AN	64,86	101,94		3,36	77,36		
	43AN	63,87	102,05	5,2	3,59	75,48	Amassamento em prensa hidráulica	RT
	44AN	66,32	101,79		6,76	63,87		
	45AN	67,46	102,43		6,04	66,61		
	46AN	66,95	102,3		6,13	66,26		
	47AN	68,13	101,88		6,94	63,21		
25% LD	48AN	63,47	102,15	6,52	6,50	64,85	Marshall	RT
	49AN	63,33	102,04		6,10	66,34		
	34	63,46	101,83		4,87	76,14		EF
	35	63,55	101,86		4,86	76,18		
	36	63,61	101,82		4,92	75,97		
	37	63,66	101,34		4,88	76,12		RT
	38	64,48	101,11		4,97	75,76		
	39	64,64	101,79	6,52	4,97	75,78	Amassamento em prensa hidráulica	EF
	40	66,25	100,99		8,11	64,94		
	41	65,74	101,20		7,78	65,96		
	42	65,64	101,43		7,69	66,24		RT
	43	65,38	101,52		7,51	66,82		
	44	65,38	101,38		7,50	66,84		
	45	65,45	101,64		7,54	66,71		

Fonte: Autor.

Observa-se que para as misturas com CAUQ_0% e CAUQ_25% moldadas por amassamento em prensa hidráulica, semelhante às PPCA, há um aumento no Volume de Vazios em relação a moldagem pela metodologia Marshall na faixa de 1,04% - 3,11% e de 2,64% - 3,25% acima do limite superior recomendado pela DNIT-ES 031/06, que é 5% de vazios. Essa variação pode estar ligada a eficiência da prensa

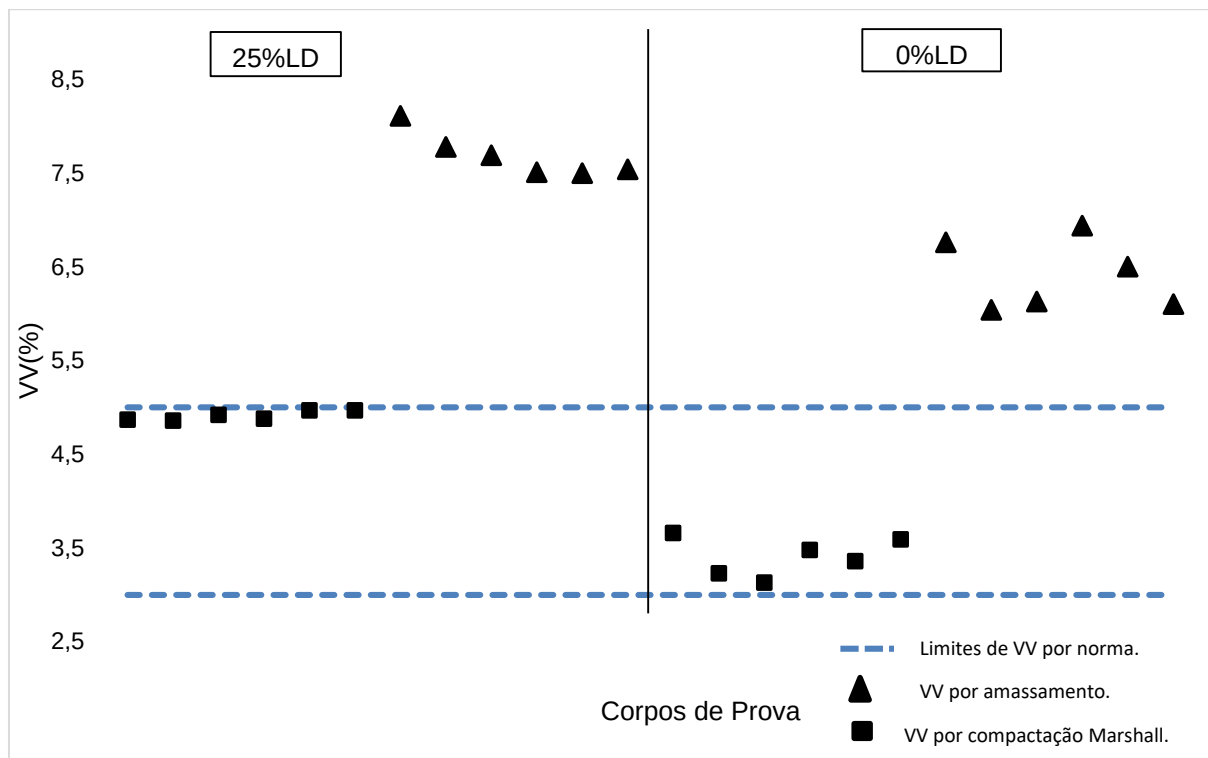
hidráulica utilizada no estudo, que não possuía uma capacidade de carregamento suficiente para enquadrar as misturas dentro da faixa de volumes de vazios normatizada apresentando CP's com alturas maiores que $63,35 \pm 1,3\text{mm}$. Importante ressaltar que as normas do DNIT foram utilizadas como padrão de referência, uma vez que não há metodologia existente.

Observa-se também um aumento no volume de vazios na adição de 25% de escória mesmo seguindo a metodologia de compactação Marshall. Abdelgalil e Nor (2014a) obtiveram volume de vazios em torno de 3,1% devida sua faixa granulométrica mais fina em relação ao estudo atual, além das PPCA terem sido moldadas com uma tensão muito superior (16 tf) a Zhang, *et al.* (2018), que para a faixa AC-25, obtiveram volume de vazios da ordem de 5,25% devido a sua faixa granulométrica ser mais grossa em relação ao estudo atual e contar com um menor teor de ligante. Para Epps e Monismith (1969) misturas com elevados índices de vazios, em geral, apresentam menores resistências à fadiga quando ensaiados a tensão controlada e, para um mesmo volume, vazios maiores e em menor número são mais desfavoráveis do que pequenos vazios dispersos na mistura.

Caso não seja deixado certo volume de vazios com ar, as misturas asfálticas deixam de ser estáveis ao tráfego e, por fluência, deformam-se significativamente favorecendo a ocorrência do fenômeno da exsudação, em que o asfalto tende a subir para a superfície de rolamento e os agregados tendem a se compactar.

A relação Betume Vazios (RBV) fixa a proporção de betume pelos mesmos motivos descritos acima. As Figuras 51 e 52 apresentam as variações para cada parâmetro volumétrico.

Figura 51 – Volume de Vazios das amostras estudadas



4.2. ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

A seguir, são apresentados os ensaios mecânicos de Estabilidade e Fluência Marshall, Resistência à Tração e Resistência ao Cisalhamento das misturas de CAUQ moldadas conforme compactação Marshall e, moldados por amassamento para produção das PPCA estudadas variando o percentual de substituição do agregado siderúrgico (Tabela 23).

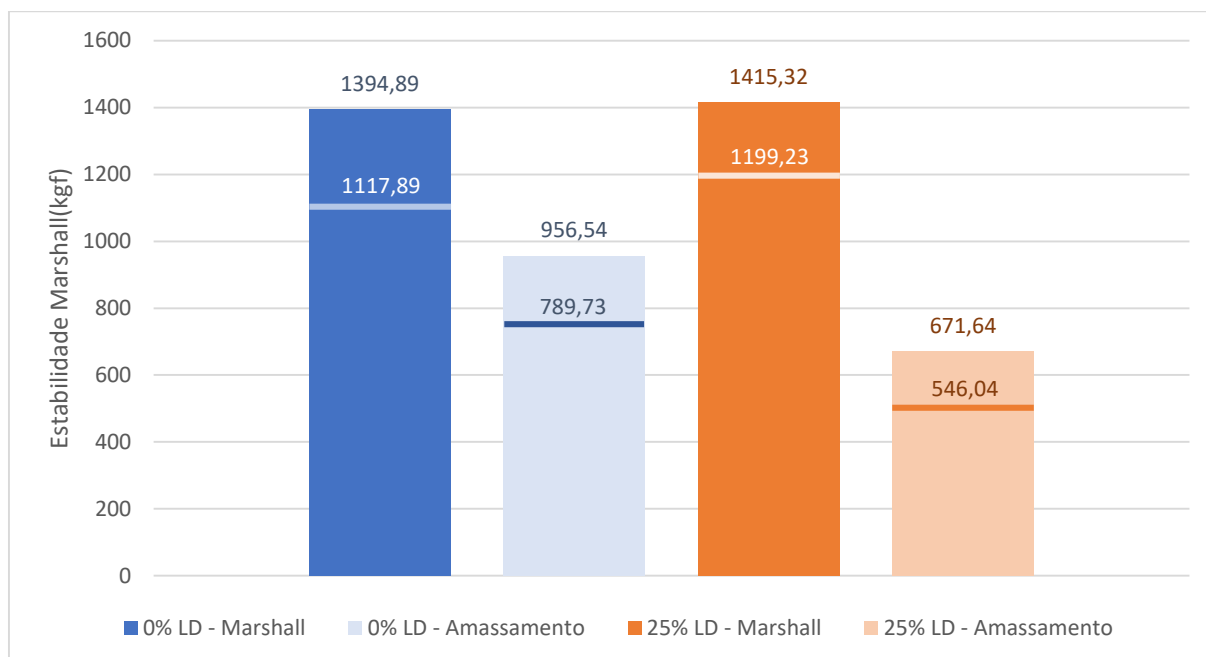
Tabela 23 - Resultados dos ensaios mecânicos

Mistura	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Resistência a Tração (MPa)	Compactação
0% LD	1394,89	5,37	1,80	Marshall
	1245,16	6,18	1,76	
	1117,89	5,25	1,72	
	817,21	5,92	1,51	Amassamento em prensa hidráulica
	789,73	4,96	1,09	
	956,54	5,92	1,18	
25% LD	1199,23	4,87	1,79	Marshall
	1286,51	5,45	1,62	
	1415,32	5,35	1,48	
	639,54	5,68	1,46	Amassamento em prensa hidráulica
	546,04	5,45	1,43	
	671,64	4,98	1,55	

Fonte: Autor.

Os valores de estabilidade Marshall obtidos para as misturas estudadas estão acima do mínimo exigido pela maioria dos padrões, tipicamente de 500 Kgf (Figura 53). Em relação às diferenças entre misturas com agregado siderúrgico em comparação com amostras contendo apenas agregados naturais (0% LD), foram encontrados valores ligeiramente superiores. Segundo Schumacher (2018), esses resultados podem estar correlacionados com os valores de angularidade mais elevados do agregado siderúrgico do que os obtidos para os agregados naturais. A maior angularidade resulta em melhor intertravamento dos agregados, melhorando a estabilidade da mistura. Além disso, as características mecânicas do agregado siderúrgico, com valores mais baixos de abrasão Los Angeles quando comparados aos agregados naturais, também contribuíram para um melhor desempenho da mistura.

Figura 53 – Valores máximos e mínimos de estabilidade para as misturas estudadas.



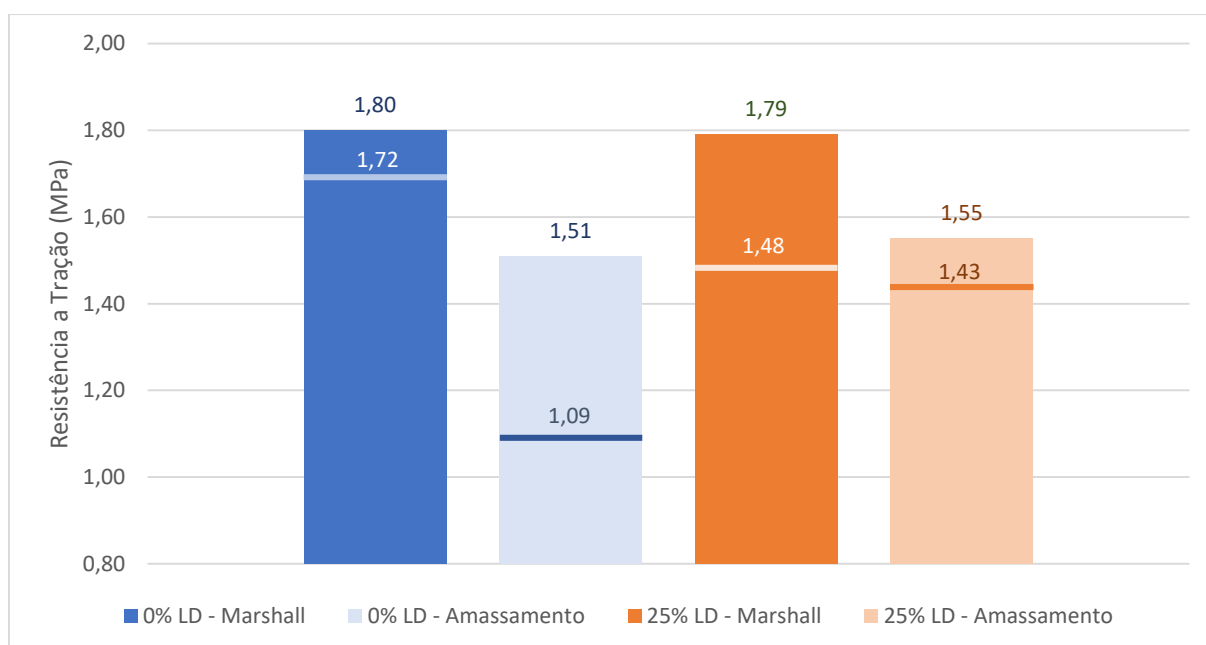
Fonte: Autor.

As misturas moldadas por amassamento em prensa hidráulica, conforme metodologia das PPCA, apresentaram resultados de estabilidade menores em comparação com os CPs moldados no compactador Marshall. Esse resultado indica que a energia de compactação aplicada no ensaio Marshall, o impacto gerado durante o processo e o fato da compactação ocorrer dos dois lados dos CPs contribuem significativamente para a redução do Volume de Vazios e no incremento dos resultados de estabilidade.

Em comparação com a dosagem Superpave, realizada por amassamento (giros), de acordo com Bernucci *et.al.* (2008) inclui conceitos de pontos de controle e zona de restrição quanto a granulometria da mistura dos agregados. As misturas asfálticas com graduação mais densas seriam uma escolha razoável, acarretando uma estabilidade superior através de maior contato entre as partículas e reduzido volume de vazios no agregado mineral. Porém, é necessária a existência de um volume de vazios tal que permita que um volume suficiente de ligante seja incorporado. Isto garante durabilidade e ainda permite algum volume de vazios na mistura para evitar exudação. No estudo em questão a granulometria foi baseada nas faixas e normativas do DNIT e o amassamento aplicado foi diferente do proposto pela metodologia Superpave.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral à 25 °C, a norma brasileira DNIT-ES 031/06 especifica um valor mínimo de 0,65 Mpa para o uso de misturas asfálticas (Figura 54). Assim, verifica-se que todas as misturas estudadas apresentaram RT acima do mínimo estipulado. As misturas moldadas pela metodologia Marshall apresentaram valores máximos de resistência a tração mais elevados em comparação com os CPs moldados por amassamento semelhante as PPCA. Quanto a incorporação de 25% de escória LD na mistura, não houveram incrementos significativos em relação à mistura com agregado 100% natural.

Figura 54 – Valores máximos e mínimos de resistência a tração para as misturas estudadas.



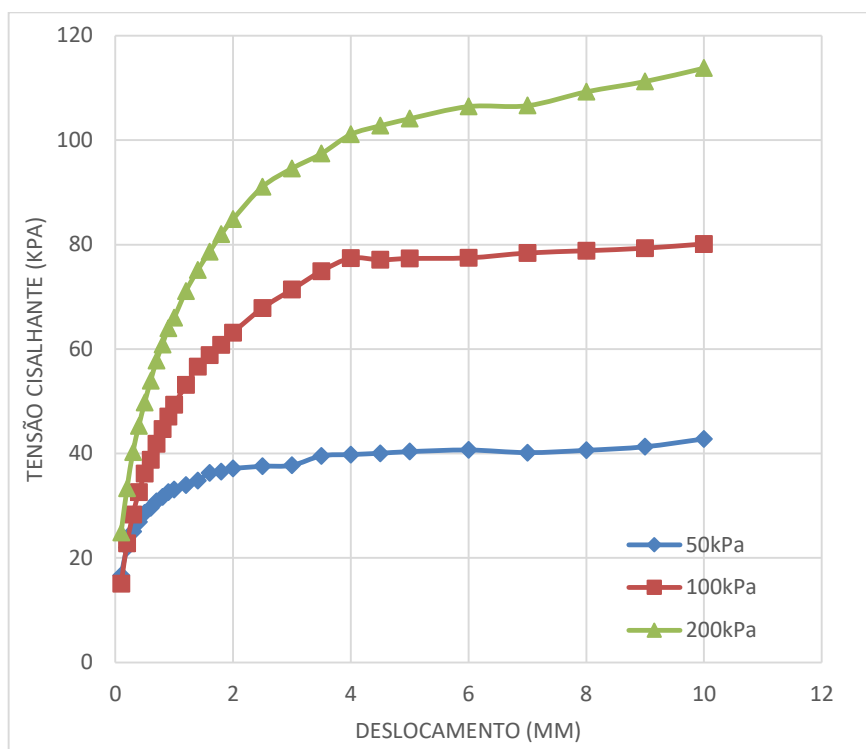
Fonte: Autor.

Da comparação dos valores de RT com outros trabalhos, é possível verificar que as misturas produzidas apresentaram boa resistência à tração. Por exemplo, analisando os resultados de Schumacher (2018), verifica-se que para as misturas com 100% de agregados naturais o valor médio de RT foi de 1,62 MPa e, para misturas com incorporação de 25% de escória LD, 1,58 MPa para diferentes níveis de expansão.

Para a verificação da resistência ao cisalhamento das misturas, foram avaliadas as interações entre a camada de base e a PPCA e as interações entre as PPCA provocadas pelo assentamento e intertravamento lateral.

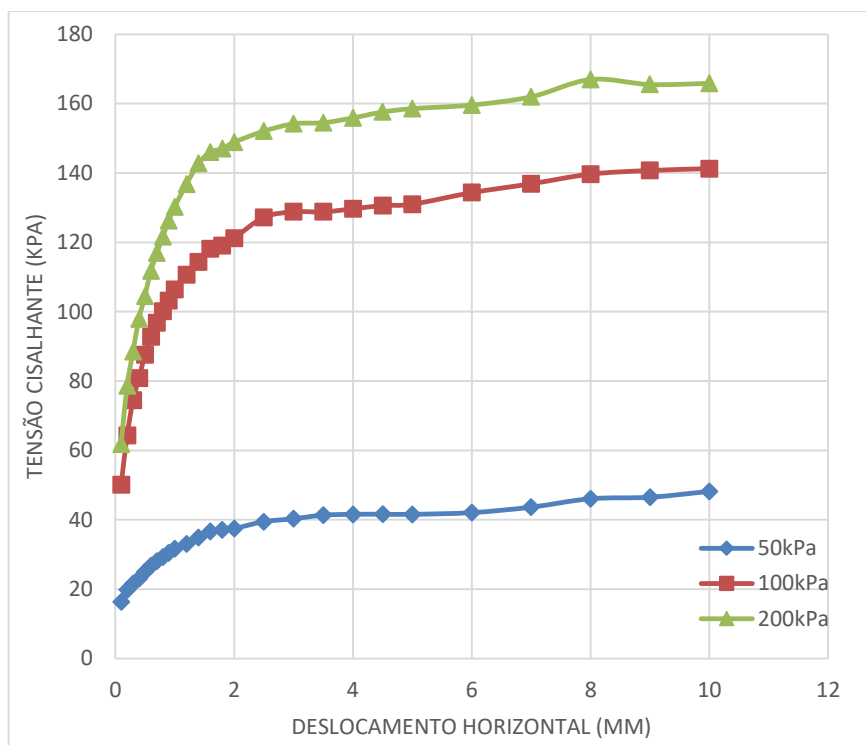
A Figura 55 apresenta os resultados do ensaio de cisalhamento para o contato PPCA com a camada de base do pavimento. Já a Figura 56, o contato bloco-bloco das PPCA, ambos com 0% de escória LD. Nele é possível observar um comportamento mais uniforme das curvas no contato PPCA-base e um menor incremento de tensão cisalhante no início do ensaio no contato PPCA-PPCA para uma carga axial de 50kPa.

Figura 55 – Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 0% de escória LD em contato com a camada de base do pavimento.



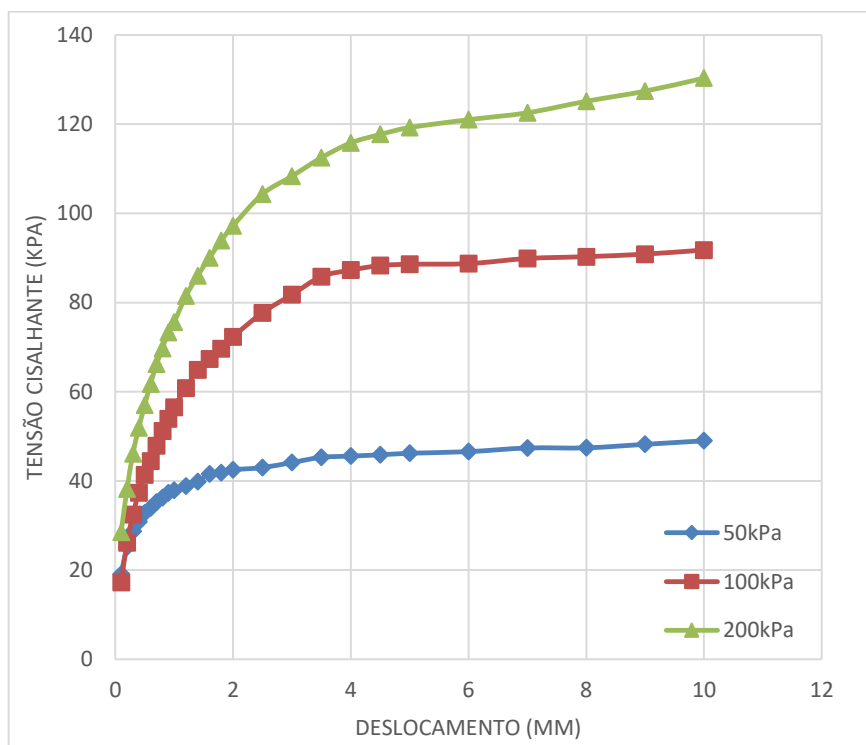
Fonte: Autor.

Figura 56 - Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 0% de escória LD em contato com outra PPCA.



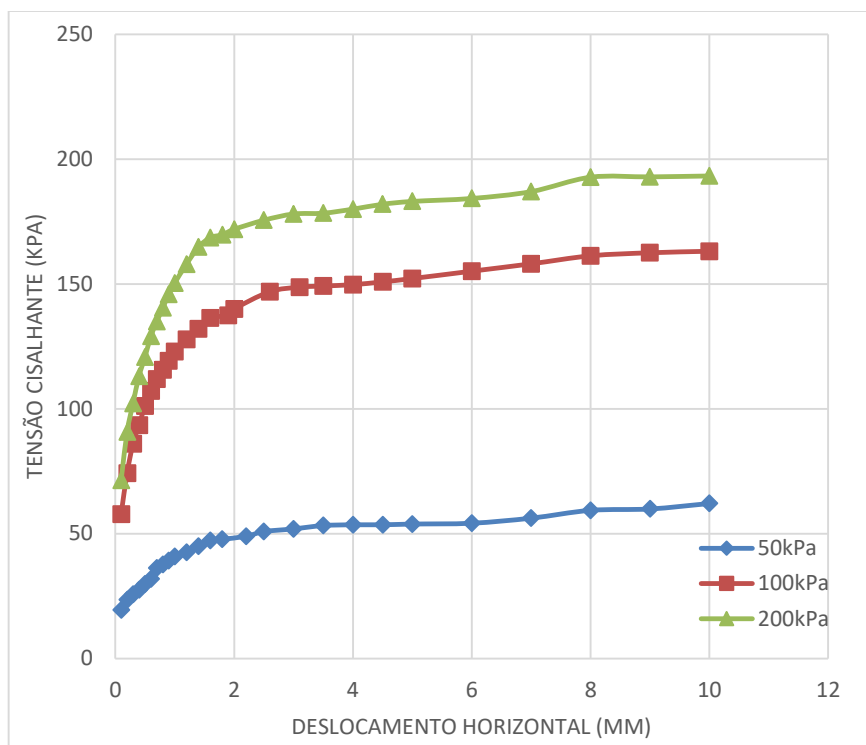
Fonte: Autor.

Figura 57 - Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 25% de escória LD em contato com a camada de base do pavimento.



Fonte: Autor.

Figura 58 - Resistência ao Cisalhamento de PPCA com 25% de escória LD em contato com outra PPCA.



Fonte: Autor.

As Figuras 57 e 58 apresentaram os resultados de resistência ao cisalhamento nas interações entre PPCA-base e PPCA-PPCA das PPCA, ambos com 25% de escória LD em sua composição. É observado um pequeno incremento na tensão cisalhante das misturas com escória LD. Este fato pode ser influenciado pela angulosidade dos grãos de escória (Tabela 24).

Tabela 24 - Deslocamentos e tensões de ruptura das amostras.

Mistura	Amostra (contato)	Deslocamento (mm)	Tensão Cisalhante (kPa)	Tensão Normal (kPa)
0% LD	PPCA-Base	3,50	39,54	50
		4,00	77,38	100
		4,00	101,10	200
	PPCA-PPCA	1,60	36,61	50
		2,50	127,19	100
		3,00	154,21	200
25% LD	PPCA-Base	4,00	45,57	50
		4,50	88,28	100
		4,50	117,70	200

		1,60	47,21	50
	PPCA-PPCA	2,50	141,09	100
		2,50	175,55	200

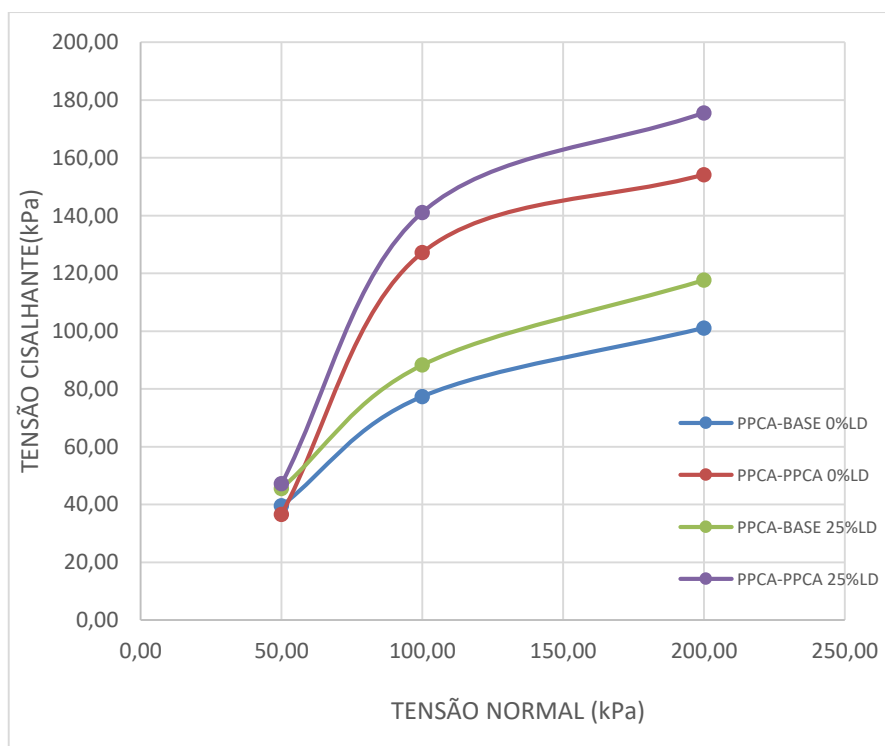
Fonte: Autor.

Observa-se que as tensões cisalhantes de ruptura foram maiores nas misturas com 25% de escória LD em relação às misturas de agregado natural.

Tajdini *et al.* (2014), avaliaram a resistência ao cisalhamento na interface mistura asfáltica e areia compactada, e obteve valores em torno de 49kPa e 51kPa para uma tensão normal teórica de 80kPa, nas condições de areia seca e saturada, respectivamente, e, 150kPa e 200kPa para uma tensão normal teórica de 280kPa nas condições de areia seca e saturada. Os autores afirmam que os parâmetros de resistência ao cisalhamento aumentam com o aumento da densidade e da tensão normal na interface e diminuem com o aumento do teor de umidade na interface.

Com base nos resultados da Tabela 21, foram plotadas as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb (Figura 59) para obtenção dos parâmetros de ângulo de atrito e coesão.

Figura 59 – Envoltórias de ruptura das superfícies de contato analisadas.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados obtidos do ensaio de cisalhamento direto.

Mistura	Amostra (contato)	Ângulo de atrito (ϕ)	Coesão (kPa)
0% LD	PPCA-BASE	21,092	27,68
	PPCA-PPCA	35,398	23,10
25% LD	PPCA-BASE	24,428	30,86
	PPCA-PPCA	38,047	29,98

Fonte: Autor.

Os resultados de resistência ao cisalhamento das PPCA se apresentaram maiores para as interações entre as PPCA com adição de 25% de escória LD. O comportamento das interações entre PPCA-BASE foi bem semelhante em relação a adição de 25% de escória LD e sem adição.

Os valores de coesão obtidos em média por Tajdini, *et al.* (2014) na interface são da ordem de 27,06kPa para areias secas e 24,02kPa para o contato de misturas asfálticas com areias saturadas.

Wang *et al.* (2008), avaliaram a resistência ao cisalhamento interno de misturas asfálticas para diferentes graduações e obtiveram valores entre 63,5kPa e 91,8kPa de coesão e 44,79° e 48,1° de ângulo de atrito. As misturas com graduação mais aberta apresentaram valores maiores de coesão e ângulo de atrito que as misturas com granulometria mais densa e contínua.

Yao *et al.* (2016) avaliaram a resistência ao cisalhamento na interface para asfaltos fixados a uma base de aço com epóxi e asfaltos modificados por polímeros nas temperaturas de 25°C e 60°C, aplicados em superfícies de pontes e obteve coesões em torno de 1,93MPa para misturas com epóxi e 0,36Mpa para misturas modificadas por polímero, ambas ensaiadas a 25°C.

Quando se trabalha analisando interfaces existentes, assim como desenvolvido por Prashanth, *et al.* (2016), uma alternativa é a comparação entre o ensaio de cisalhamento direto e o teste de arrancamento pull-out.

Levando em consideração que o limite do eixo padrão rodoviário brasileiro é um eixo simples de rodas duplas e que transmite ao pavimento uma carga total de 8,2 tf (DNIT, 2006), a carga por roda de 2,05tf e a área de contato do pneu com o solo é conhecida de acordo com pesquisas desenvolvidas por Nepomuceno (2019). Podemos verificar se a as PPCA atendem ao padrão de referência brasileiro da seguinte forma:

- A área de contato do pneu apresentada por Nepomuceno (2019) é comparada a área equivalente de contato da superfície das PPCA desenvolvidas.
- A área de contato equivalente nos dá a quantidade de PPCA por área de contato.
- A área da lateral dos blocos em uso é a área que resistirá a força cisalhante.

Portanto:

$$\tau_r = \frac{P'}{A_{pp}} \quad (8)$$

Onde:

Tr – Tensão cisalhante de uso;

P' – Carga do pneu;

Al – Área lateral das PPCA.

A área de contato do pneu com o pavimento encontrada por Nepomuceno (2019) é de cerca de 545,9 cm² que, dividido pela área da superfície de uma PPCA (200 cm²) nos mostra que essa área é equivalente a 2,73 PPCA. A tensão cisalhante é dada pela razão entre a carga aplicada do pneu e a área lateral de todas as PPCA aplicadas.

Sendo a espessura de uma PPCA de 6cm, e um perímetro de 94,2cm fornecido pela área de contato da roda a superfície do asfalto, temos uma área lateral de 565,2cm² (Al). Utilizando P' como 2050 kgf e Al de 565,2cm², obtemos a tensão cisalhante de 7,62 kgf/cm² (355,69kPa). Comparado com os resultados da tabela 21 o menor valor encontrado no ensaio de cisalhamento, 39,54 kPa nas PPCA com 0% de escória com

uma tensão normal de 50kPa, corresponde a 11,11% da tensão provocada pelo eixo padrão.

Importante ressaltar que diferentes configurações de eixos e cargas produzem deflexões diferenciadas, que reduzem a vida remanescente do pavimento de diversas maneiras. Os fatores de equivalência de carga por eixo são utilizados para fazer conversões das várias possibilidades de carga por eixo em números de eixo-padrão.

Em comparação com os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento de outros autores, a Tabela 26 apresenta os valores da carga de ruptura e deslocamento obtidos no ensaio de cisalhamento.

Tabela 26 Força normal de ruptura no contato entre as PPCA.

Mistura	Amostra (contato)	Força Normal de ruptura (kgf)	Deslocamento (mm)
0% LD	PPCA-PPCA	9,04	1,60
		32,17	2,50
		39,16	3,00
25% LD	PPCA-PPCA	11,75	1,60
		36,99	2,50
		44,40	2,50

Fonte: Autor.

Abdelgalil e Nor (2014a) obtiveram deslocamentos verticais no ensaio pull-out variando entre 3,75mm e 4,3mm em PPCA com juntas de assentamento de 0mm. Apesar dos resultados encontrados nesta pesquisa serem inferiores, é importante ressaltar que não há parâmetros de tensão confinante provocada no assentamento das PPCA de Abdelgalil e Nor (2014a), que altera substancialmente os deslocamentos durante o arrancamento.

Emery, *et al.* (2006) obtiveram para o ensaio pull-out para PPC convencionais a força de arrancamento da ordem de 306kfg e um deslocamento vertical da ordem de 0,7mm. Ishai *et al.* (2006) obtiveram para o ensaio de arrancamento de PPC em uma indústria de aeronaves uma força de arrancamento da ordem de 1500kgf e um deslocamento de 12mm. Os autores afirmam que, devido ao efeito de intertravamento da superfície do bloco de concreto, toda a área pavimentada ao redor do bloco central puxado (dentro de um raio de cerca de 1 metro) resiste ao bloco central. Isto fornece uma

evidência impressionante da capacidade de travamento e intertravamento dos pavimentos com blocos de concreto.

Foram realizados ensaios de flexão e compressão simples como efeitos comparativos as PPCA existentes e PPC.

A Tabela 27 apresenta os resultados de Flexão e de Compressão Simples para as PPCA de 35mm e 70mm de espessura.

Tabela 27 – Resultados de Resistência a Flexão e Compressão Simples das PPCA

Espessura da PPCA (mm)		Massa da PPCA (g)		P (N)	TRF (kPa)
35		1557,3		196,13	184,61
		1556,6		156,91	100,06
		1565,30		284,39	175,43
70		3106,6		853,18	136,66
		3079,9		1510,22	243,26
		3117,50		578,59	94,67
Compressão Simples (MPa)					
Amostra	h (mm)	P(kN)	Área (m ²)	fp (MPa)	fpk (MPa)
B7	35,69	63,74	0,005	13,46	12,64
B8	35,95	66,69			
B9	35,08	72,57			
B10	71,22	57,86		11,77	10,69
B11	70,52	65,70			
B12	69,71	53,94			

Fonte: Autor.

Zhao *et.al* (2018) apresentou resultados de P da ordem de 9,25-10,27kN sendo bem maiores que os encontrados nesse trabalho demonstrando como a metodologia de moldagem das PPCA influencia diretamente na resistência das peças. Os resultados de resistência a compressão estimada (fpk) foram menores que o valor de 35 MPa normatizado para as PPC de 35 MPa aplicado em vias de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar a viabilidade de aplicação de PPCA na pavimentação urbana através da avaliação do desempenho dos projetos de mistura asfáltica e incorporação de coproduto siderúrgico pelo processo de moldagem por amassamento em prensa hidráulica. Foi realizada a caracterização dos agregados naturais e siderúrgicos através de ensaios físicos e mecânicos. Após a caracterização individual, foram estudadas as misturas asfálticas moldadas pelo processo de compactação convencional (Marshall) e pela metodologia de moldagem das PPCA, com e sem adição de escória LD, sob vários tipos de solicitações: ensaios físicos e mecânicos. Os ensaios mecânicos foram: Estabilidade e Fluência Marshall, Resistência à Tração por compressão diametral e Cisalhamento Direto. Analisando os ensaios realizados foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Quanto aos parâmetros volumétricos das PPCA, o Volume de Vazios se apresenta cerca de 3,0% acima do limite permitido para as misturas asfálticas na faixa C do DNIT com e sem incorporação do agregado siderúrgico. Isso mostra a influência da energia aplicada pelos golpes na metodologia de compactação Marshall. Essas misturas com um Volume de Vazios elevado apresentam, em geral, menores resistências à fadiga quando ensaiados a tensão controlada.
- Os parâmetros mecânicos das PPCA apresentaram valores de Estabilidade aceitáveis para a normatização vigente com uma redução em relação as misturas moldadas por compactação Marshall. Isto deve-se pela diferença no Volume de Vazios que contribuiu na redução da resistência mecânica da PPCA. A Resistência à Tração apresentou valores compatíveis entre os métodos de moldagem apresentando, também, valores superiores aos mínimos normatizados.
- Quanto às características mecânicas e físicas do agregado siderúrgico, este apresentou resistência mecânica superior aos agregados naturais segundo a abrasão Los Angeles, o que confirma as propriedades superiores de resistência ao atrito da escória de aço, resultando em resistência à deformação

permanente, resistência à abrasão e durabilidade. As características mecânicas da escória de aço não foram sensíveis ao nível de expansão do material. No entanto, os valores de absorção foram maiores para as escórias LD do que para os agregados naturais. Isto levou a um aumento no consumo do ligante durante o projeto de mistura, sem substituir altos percentuais de agregados naturais por agregados de escória de aço.

- A resistência ao cisalhamento entre as PPCA apresentou um ligeiro incremento quando incorporado o coproduto siderúrgico mostrando como a forma e densidade dos agregados podem auxiliar no travamento das PPCA. A resistência ao arrancamento está diretamente ligada a tensão confinante aplicada na PPCA.
- Quanto ao uso de escória LD como agregado na produção de PPCA verificou-se que é possível a substituição de 25% do agregado natural elevando o consumo de ligante na produção da mistura para manter um Volume de Vazios mais próximo ao determinado. Isso acontece devido às propriedades de absorção da escória estudada.
- De modo geral os resultados experimentais e a análise realizada na presente pesquisa indicam que as PPCA podem ser utilizadas em pavimentação com ressalvas. Embora os parâmetros mecânicos atendam as especificações é importante ter em mente a possibilidade de deformação superficial no início da vida útil do pavimento, tendo em vista o maior Volume de Vazios. A possibilidade de apresentar um produto com as características compatíveis ao pavimento flexível asfáltico através de uma metodologia de aplicação inovadora, além da possibilidade de estocagem do CAUQ, gera expectativas promissoras no desenvolvimento da pavimentação brasileira.

5.1. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Mediante ao estudo realizado e seus respectivos resultados, para trabalhos futuros, sugere-se:

- Avaliar o desempenho mecânico das PPCA aplicadas no pavimento que foram estocadas por um longo período de tempo;

- Avaliar o desempenho a longo prazo das PPCA aplicadas no pavimento;
- Avaliar o procedimento de moldagem por amassamento em prensa hidráulica alterando a carga vertical aplicada nas PPCA facilitando a redução do Volume de Vazios;
- Avaliar a resistência ao cisalhamento de PPCA no contato com uma camada de areia compacta, analisando a possibilidade de substituição das camadas de suporte sob a PPCA;
- Avaliar a variação granulométrica das PPCA, estudando a viabilidade de uma graduação mais fina (PPCA-Fina) para aplicação em locais de tráfego menos intenso e em intervenções nas vias;
- Avaliar o comportamento mecânico de PPCA com graduações abertas mais próximas a um SMA, desenvolvendo PPCA drenantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL GALIL, Ahmed; NOR, Hasan. The Effect of Joint Width on Structural Performance of Asphalt Block Pavements. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, Reino Unido, 7(8). p. 1612-1617, 2014a
- ABDEL GALIL, Ahmed; NOR, Hasan. The Influence of Block Thickness on the Performance of Asphalt Paving Blocks. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, Reino Unido, 7(10). p. 2129-2134, 2014b
- AI, C; RAHMAN, A; SONG, J; GAO, X; LU, Y. Characterization of Interface Bonding in Asphalt Pavement Layers Based on Direct Shear Tests with Vertical Loading. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Washington, April 19, 2017
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO) **T 324**: Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. Washington, 2017.
- ARAUJO, R. M. **Ativação química e térmica de escória de aciaria elétrica**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Dissertação de mestrado, 2008.
- ASTH, H. G. **Desenvolvimento de escórias de refino secundário para o forno panela da v&m do brasil**. Minas Gerais: Universidade Federal De Minas Gerais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Dissertação de Mestrado, 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. **D3080 – 11**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, PA: ASTM International; 2011
- ASTM INTERNATIONAL. **D6931 – 12**: Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2012
- BAILLAIRGÉ, C.P.F. **Asphalt Block Pavement**. Canada. 1899.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1 ed. Rio de Janeiro Petrobrás, ABEDA, 2008.
- CAMPOS, T.M.P. and CARRILLO, C.W. (1995) **Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro**. Alonso & Delage eds, Unsaturated Soils.

Balkema Publishers. ISBN 90 5410 583 6. 1st. International Conference on Unsaturated Soils - Paris - Vol. I, pp.31-38.

CASTELO BRANCO, V. T. F., **Caracterização de Misturas Asfálticas Com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**, Dissertação de mestrado

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: Relatório gerencial** – Brasília: CNT: SENAT, 2018.

CRONEY, P. e D. CRONEY, 1998. **Design and Performance of Road Pavements**. 3rd Edn., McGraw-Hill, New York.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento**. 2003. 281p. (Dissertação de Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia- COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO DE POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL – DPRF (Brasil). **Balanço de atividades 2014**, Brasília: DPRF – BRASIL, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **DNER-ME 081**: Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

_____ **EM 262**: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994.

_____ **ME 035**: Agregados – determinação da Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

_____ **ME 043**: Misturas Betuminosas a quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **ME 053**: Misturas Betuminosas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____ **ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **ME 083**: Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

_____ **ME 084:** Agregado Miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **ME 085:** Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real I. Rio de Janeiro, 1994.

_____ **ME 138:** Misturas Betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.

_____ **ME 194:** Agregados – determinação da massa específica de agregados

_____ **ME-136:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 719.** Manual de Pavimentação. 3º edição. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ES 031:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico -Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006

_____ **PRO 008:** Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **PRO 011:** Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1979.

_____ **PRO 178:** Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

_____ **TER 005:** Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 2003.

EMERY, J., LAZAR, M; BURROWS, G.R. A New Paver System for Airfields. Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), technical-papers. (2006)

EPPS, J. A.; MONISMITH, C. L (1969). “**Influence of Mixture Variables on the Flexural Fatigue.**” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.38 pp 423-464.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. RD-97-148 - **User Guidelines for By product and Secondary Use Materials in Pavement Construction.** U.S.

Department of Transportation. Washington, DC.2018 disponível em:

<<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/ssa1.cfm>> acesso 19/03/2019.

FREITAS, H. B., - **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007

GARBER, N.J. e HOEL, L.A., 2009. **Traffic and Highway Engineering**. 4th Edn., United States: Cengage Learning, Australia.

GERSCOVICH, D. M. S. (2010). **Apostila Estruturas de Contenção, Empuxos de Terra**. Faculdade de Engenharia/UERJ. Departamento de Estruturas e Fundações.

GEYER, R.M.T, **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Tese de Doutorado, 2001.

GUIMARÃES, A. C. R. **Caracterização física e química de agregados de escória de aciaria visando emprego em pavimentos**. Cuiabá- MT:19ª RPU – Reunião De Pavimentação, 2013.

HANOVER ARCHITECTURAL PRODUCTS. **Products: Asphalt Block**. Pensilvânia. Disponível em: < <https://www.hanoverpavers.com/index.php/products/asphalt-block>>. Acesso em 10 mar. 2018.

IBS - INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Relatório de Sustentabilidade**. Página da internet: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 22/12/2018, Rio de janeiro, Brasil, 2018.

ISHAI, I; FIX, B; MASURI, N; 2006, **Pullout tests in concrete block pavements for Evaluating the resistance to aircraft Jet engine thrust**, 8th International Conference on Concrete Block Paving, November 6-8, San Francisco, California, USA

JUNIOR, L. A. B. P.; VIEIRA, E. A.; TENÓRIO, J. A. S.; PEIXOTO, R. A. F.; OLIVEIRA, J. R. **Caracterização da mistura de resíduos de granito e escória de aciaria**. OuroPreto: LDREM: R. Esc. Minas, 2011.

KNAPPET, J. e CRAIG, R. F. **Mecânica dos Solos**, 8ª ed. Editora LTC. 2014

- LI, Y. e LUO, G. I. 2006. **Design of block pavement**. City Bridge and Flood Control, (1) 1, 23-25.
- LIMA, N.P.; NASCIMENTO, J.F.; VAL FILHO V.P.C. E ALBERNAZ C.A.V., **Pavimentos de Alto Desempenho Estrutural Executados com Escória de Aciaria**. 2000. 10ª Reunião Anual de Pavimentação, Uberlândia, M.G.
- LIU, G., S.WU, M.V. DE VEN, J. Y.; MOLENAAR, A. 2010. **Influence of sodium and organo-montmorillonites on the properties of bitumen**. Appl. Clay Sci., 49(1): 69-73.
- LOURES, R. de C. B. de A. **Estudo de pré-misturado a frio contendo escória de aciaria**. Rio de Janeiro, 2017. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia. Curso de mestrado em engenharia de transportes. Dissertação de Mestrado, 2017.
- MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Escola politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Dissertação de Mestrado, 2000.
- MENESES, J. P. C. **Estudo experimental de parâmetros de dosagem e desempenho de concreto asfáltico poroso com adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, pós-graduação em engenharia civil. Dissertação de mestrado, 2017.
- MILLS-BEALE, J. e YOU, Z. 2010. **The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates**. Construct. Build. Materials, 24(3): 230-235.
- miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.
- MTPA - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL, **Anuário estatístico dos transportes 2010-2016**, Brasília, 2017.
- NÓBREGA, L. M., 2007, **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Utilizando Escória de Ferroliga de Manganês como Agregado**. Dissertação de M.Sc., UFBA, Salvador, BA, Brasil.
- NSA - National Slag Association Steel Slag. Wayne, Pennsylvania, 2013. Página da internet: <http://www.nationalslag.org/steelslag.htm>, visualizado em 19/004/2018.
- PARENTE, E. B.; BOAVISTA A. H.; SOARES, J. B. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção**

rodoviária na região metropolitana de fortaleza. Rio de Janeiro: XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, v.I, p. 215-222, 2003.

Pavimentação Rodoviária. 2013. 124p. (Dissertação de Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente.**

Universidade Federal de Ouro Preto. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, 2010.

PIMENTA, A. A. G, **Obtenção de parâmetros para estudo de dimensionamento de um muro de contenção com pneus e coproduto siderúrgico de aciaria.**

Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Dissertação de mestrado, 2019.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo Experimental de Compactação e Expansão de uma Escória de Aciaria LD para uso em Pavimentação.** Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia de Construção Civil Dissertação de Mestrado, 2005.

Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROBERTS, F.L., *et al.* (1996) **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction.** 2nd Edition, NAPA Education Foundation, Lanham.

ROCHA, F. L. L. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial.** Ouro Preto: Universidade

Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Dissertação de mestrado, 2011.

ROHDE, L. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos – Estudo Laboratorial.** 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

SANTOS, G.P.P. **Um Estudo Sobre a Utilização da Escória de Ferroníquel em**

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos nas características do material e no desempenho de misturas asfálticas.** Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, pós-graduação em engenharia civil. Dissertação de mestrado, 2018.

SHACKEL, Brian, 1990. **Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavements**. First Edition and Reprinted 1991. Elsevier. New York and London.

SILVA, E. A. da, 1994, **Uso da Escória de Aciaria em Pavimentação Viária**. In: 28º Reunião Anual de Pavimentação, v. 1, pp. 261-283, Belo Horizonte, MG, agosto.

SILVA, E.A. e R.L. MENDONÇA, 2001a, **Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento**. Revista Engenharia Ciência e Tecnologia, v. 4, n2, p. 7-20.

SOUZA, M. G. **Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de pós-Graduação em Geotecnia. Dissertação de Mestrado, 2007.

TAHA, M.R., S. HARDWIYONO, N.I.M. YUSOFF, M.R. HAININ, J. Wu and K.A.M. Nayan, 2013. **Study of the effect of temperature changes on the elastic modulus of flexible pavement layers**. Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., 5(5): 1661-1667.

TAJDINI, M.; MAHINROOSTA, R.; TAHERKHANI, H. **An investigation on the mechanical properties of granular materials in interface with asphaltic concrete**. Construction and Building Materials 62 (2014) 85–95

TAVARES, D. S., **Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico**. Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE - Rio de Janeiro, 2012.

THOMAZ, E. C. S. **Notas de aula. Escória de alto forno. Parte 1– Fabricação**, 2012.

TSAI, B.; COLERI, E.; HARVEY, J. T.; MONISMITH, C. L. (2016). **Evaluation of AASHTO T 324 Hamburg-Wheel Track Device test**. Construction and Building Materials. 114. 248-260.

VAZ, G. D. **Quantificação das perdas de ferro metálico em escórias de forno elétrico a arco**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, pós-graduação em engenharia de materiais e de processos químicos metalúrgicos Dissertação de mestrado, 2001.

WANG, H. e ZHAO, J. 2011. **Finite element computation and analysis for mechanical characteristics of precast block pavement structure**. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 6 6p. 16-20

- WANG, H. M. *et al.* 2012. **Experimental research on bearing capacity characteristics of pavement of prefabricated concrete blocks.** Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2 6p. 24-30
- WANG, H.; LIU, X.; HAO, P. (2008). **Evaluating the Shear Resistance of Hot Mix Asphalt by the Direct Shear Test.** Journal of Testing and Evaluation. 36. 485-491. 10.1520/JTE101732.
- YAO, B.; LI, F.; WANG, X.; CHENG, G. **Evaluation of the shear characteristics of steel–asphalt interface by a direct shear test method** International Journal of Adhesion & Adhesives. 68 (2016) 70–79.
- ZHANG, H.; WU, J.; FU, X.; SUI, B.; LV, L. (2018) **Comparative study on mechanical characteristics of precast HMA block versus concrete block.** International Journal of Pavement Engineering. 10p.
- ZHU, Y.; TAN, J. Z.; YUE, A. J. 2011. **Testing research mechanics properties of AC-13C.** Highway Engineering. 36 (2). 57-63.
- ZUMRAWI, M.; KHALILL, F. O. A. (2017). **Experimental Study of Steel Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture.** American Journal of Construction and Building Materials. 2. 26-32.