

PLANO DE TRABALHO

Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT

Capítulo XX do Edital 02, Lote 06, item 10 do PER

Rodovia BR 116 – Trecho São Paulo - Curitiba

PROJETO 04

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO SIMULADOR DE TRÁFEGO DE LABORATÓRIO PARA
PREVISÃO DE DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**



RELATÓRIO FINAL

Fevereiro – 2014

SUMÁRIO

1.	CONCESSIONÁRIA.....	10
2.	DESCRIÇÃO DO PROJETO	10
2.1.	TÍTULO DO PROJETO	10
2.2.	OBJETIVOS.....	10
3.	JUSTIFICATIVA.....	11
4.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	13
4.1.	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	16
4.2.	ATIVIDADES.....	17
5.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
5.1.	MISTURAS ASFÁLTICAS	19
5.2.	PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO.....	19
5.3.	COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	20
5.3.1.	Compactador Marshall e dosagem	21
5.3.2.	Compactador por cisalhamento giratório e dosagem	23
5.3.3.	Compactação por rolagem	26
5.4.	METODOLOGIA EMPREGADA NO DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO COMPACTADOR – SIMULADOR	28
5.5.	DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	30
5.6.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA E MÓDULO DINÂMICO	33
5.7.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E COMPACTAÇÃO.....	41
6.	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS USADAS NA PESQUISA	42
6.1.	MATERIAIS	42
6.2.	SELEÇÃO E DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	45
6.2.1.	Mistura asfáltica SPV 12,5 mm – Dosagem Marshall	46
6.2.2.	Mistura asfáltica SPV 12,5 mm – Dosagem Superpave 6”	48
6.2.3.	Mistura asfáltica SPV 19 mm – Dosagem Marshall	50
6.2.4.	Mistura asfáltica SPV 19 mm – Dosagem Superpave 6”	52
6.2.5.	Avaliação mecânica das misturas SPV 12,5 e 19 mm – Ensaios de RT e MR	54
6.2.6.	Deformação permanente das misturas SPV 12,5 mm e 19 mm	66
7.	ANÁLISE DAS MISTURAS POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	70
8.	EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS E AFERIÇÃO	80

8.1.	MISTURADORA.....	83
8.2.	MESA COMPACTADORA E SIMULADOR DE TRÁFEGO	84
8.2.1.	Mesa compactadora	84
8.2.2.	Simulador de tráfego	102
8.3.	PRENSA DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	111
8.3.1.	Avaliação do equipamento de módulo de resiliência	115
8.3.2.	Montagem do equipamento de módulo de resiliência de misturas asfálticas do CDT - Arteris	115
8.3.3.	Verificação e aferição do equipamento de módulo de resiliência	118
9.	CONCLUSÕES GERAIS.....	134
10.	ENTIDADE OU EQUIPE EXECUTORA	135
11.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
	ANEXO 1 – RESULTADOS DE PDI	139
	ANEXO 2 – PROCEDIMENTO DO PDI	149
	ANEXO 3 – MISTURADORA.....	187
	ANEXO 4 – MESA COMPACTADORA (PROTÓTIPO)	189
	ANEXO 5 – MESA COMPACTADORA (PROJETO EXECUTIVO)	226
	ANEXO 6 – SIMULADOR DE TRÁFEGO (MOLDE).....	237

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização do ligante asfáltico modificado	43
Tabela 2 – Caracterização dos agregados	43
Tabela 3 – Resistência à tração - corpos de prova moldados nos teores de projeto – SPV 12,5mm ...	56
Tabela 4 – Resultados de RT de corpos de prova Marshall – SPV 19mm	57
Tabela 5 – Resultados de RT à 25°C de CPs extraídos das amostras do Superpave 6” – SPV 19mm...	59
Tabela 6 – Módulo de resiliência nos teores de projeto – SPV 12,5mm	62
Tabela 7 – Módulo de resiliência nos teores de projeto SPV 19 mm 6” broqueados	64
Tabela 8 – Módulo de resiliência nos teores de projeto SPV 19 mm Marshall	64
Tabela 9 – Tabela com identificação dos itens de interesse do projeto com detalhamento da mesa compactadora	91
Tabela 10 – Pressões de contato a várias profundidades de penetração adaptado de Geller (1984)	100
Tabela 11 – Premissas de ensaio para HWTD e APA segundo Moura (2010)	105
Tabela 12 – Resultados da análise para $\alpha = 1\%$	133
Tabela 13 – Valores obtidos de vetor magnitude	140
Tabela 14 – Valores obtidos de vetor magnitude	142
Tabela 15 – Valores obtidos de vetor magnitude	144
Tabela 16 – Valores obtidos de vetor magnitude (Imagens da placa CDT-Arteris)	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Misturador tipo Pug Mill	20
Figura 2 – Compactador Marshall	22
Figura 3 – Soquete de seção plena e corpo de prova	22
Figura 4 – Compactador Superpave (Fonte: Bernucci et al, 2008) e o equipamento do CDT	23
Figura 5 – Compactadora PCG instalado no LTP-EPUSP	24
Figura 6 – Corpo de prova PCG (à esquerda) e Marshall (à direita) (Fonte: Motta, 2010)	25
Figura 7 – Rolo compactador de pneu	26
Figura 8 – Rolo compactador de chapa metálica	26
Figura 9 – Compactador tipo LCPC instalado no LTP-EPUSP	27
Figura 10 – Vista superior do molde para os corpos de prova a serem realizados na compactadora .	29
Figura 11 – Vista em perspectiva do molde	29
Figura 12 – Representação esquemática do equipamento compactador	30
Figura 13 – Simulador de tráfego tipo LCPC.....	31
Figura 14 – Equipamento APA (Fonte: www.pavementinteractive.org)	31
Figura 15 – Roda de Hamburgo.....	32
Figura 16 – Ensaio de módulo de resiliência e detalhe de ensaio	34
Figura 17 – Representação esquemática do carregamento e estado biaxial de tensões	36
Figura 18 – Desloc. resilientes (recuperáveis) e desloc. plásticos (permanentes).....	37
Figura 19 - Corpo de prova em ensaio de Módulo Dinâmico	39
Figura 20 - Senoides de carregamento e deformação	39
Figura 21 - Distribuição Granulométrica SPV 12,5 mm.....	41
Figura 22 - Distribuição Granulométrica SPV 19 mm	42
Figura 23 - Preparação da brita.....	45
Figura 24 – Preparação do pedrisco.....	45
Figura 25 – Preparação do pó de pedra	46
Figura 26 – Volume de vazios.....	47
Figura 27 – Massa Específica Aparente.....	47
Figura 28 – Vazios do Agregado Mineral.....	48
Figura 29 – Vazios Cheio com Asfalto	48
Figura 30 – Volume de Vazios	49
Figura 31 – Densidade Aparente.....	49
Figura 32 – Vazios do Agregado Mineral.....	50

Figura 33 – Vazios Cheios de Asfalto.....	50
Figura 34 – Massa Especifica Aparente.....	51
Figura 35 – Vazios de Agregado Mineral.....	51
Figura 36 – Volume de Vazios	52
Figura 37 – Vazios Cheios de Asfalto.....	52
Figura 38 – Densidade Aparente.....	53
Figura 39 – Vazios do Agregado Mineral.....	53
Figura 40 – Volume de Vazios	54
Figura 41 – Vazios Cheios de Asfalto.....	54
Figura 42 – Prensa MTS executando ensaio de RT	55
Figura 43 – Detalhe do corpo de prova durante o ensaio de RT	55
Figura 44 – RT - CPs moldados nos teores de projeto – SPV 12,5 mm	57
Figura 45 – RT vs Teor de Ligante (%) – SPV 19mm	60
Figura 46 – RT vs Volume de Vazios (%) – SPV 19mm.....	61
Figura 47 – Ensaio de Módulo de Resiliência	62
Figura 48 – Módulo de Resiliência nos teores de projeto – SPV 12,5mm	63
Figura 49 – Módulo de Resiliência vs Teor de Ligante – SPV 19mm.....	65
Figura 50 – Módulo de Resiliência vs Volume de Vazios – SPV 19mm	66
Figura 51 – (a) homogeneização dos agregados e (b) recipiente com o ligante asfáltico	66
Figura 52 – Colocação da mistura no compactador.....	67
Figura 53 – Detalhe da mistura durante a compactação	67
Figura 54 – Par de placas com teor de 4,6%	68
Figura 55 – Par de placas no teor de 5,8%	68
Figura 56 – Deformação permanente - SPV 12,5mm nos teores de projeto.....	69
Figura 57 – Deformação permanente - SPV 19 mm nos teores de projeto.....	69
Figura 58 – Fluxograma - etapas da técnica de análise (Adaptado de Massad e Button, 2007)	71
Figura 59 – Esquema de corte transversais em placas de misturas asfálticas.....	72
Figura 60 – Placa cortada em perspectiva	73
Figura 61 – Placa de mistura asfáltica compactada e cortada em 10 amostras	73
Figura 62 – Etapa I do PDI	75
Figura 63 – Etapa II do PDI	76
Figura 64 – Etapa III do PDI	77
Figura 65 – Representação das áreas de interesse em cada face de corte das placas.....	78
Figura 66 – Orientação angular de uma partícula.....	80

Figura 67 – Granulometria dos materiais para estudo	81
Figura 68 – Distribuição granulométrica do projeto de mistura.....	82
Figura 69 – Linha de densidade máxima para o projeto de mistura.....	82
Figura 70 – Teores de projeto para misturas com variação de CAP	83
Figura 71 – Detalhe da misturadora e usinagem da mistura	84
Figura 72 – Carrinho em detalhe.....	85
Figura 73 – Disposição das peças em vista lateral	85
Figura 74 – Compactador em perspectiva	86
Figura 75 – Foto do protótipo de CS-CDT em fase de montagem	87
Figura 76 – Equipamento reestruturado para compactação por rolagem	88
Figura 77 – Sistema de suporte e direção do molde (a) e braço de alavanca (b)	89
Figura 78 – Aspecto da mistura asfáltica compactada no equipamento reestruturado	89
Figura 79 – Mesa Compactadora em detalhe (A – roda de aço; B – contra-peso; C – motor; e D - molde de placas	90
Figura 80 – Detalhe de encaixe da roda de aço no molde	93
Figura 81 – Braço de alavanca.....	94
Figura 82 – Detalhe de ajuste do braço de alavanca	94
Figura 83 – Entalhe para ajuste de altura em detalhe vermelho.....	95
Figura 84 – Encaixe de desmonte de paredes do molde	96
Figura 85 – Parede lateral do molde aberta	96
Figura 86 – Molde com todas as paredes abertas	96
Figura 87 – Encaixe rápido	97
Figura 88 – Molde encaixado no carrinho.....	97
Figura 89 – Rodas em ambos os lados do trilho.....	98
Figura 90 – Conjunto de rodas inferior e superior ao trilho	98
Figura 91 – Compactador: (i) Aferição da massa, (ii) Aferição da área de contato	99
Figura 92 – Esquema da área de contato e profundidade de penetração do rolo liso estático	100
Figura 93 – Detalhe da mistura compactada	101
Figura 94 – Curva para definição do número de passadas para atingir 4,0% de vazios do projeto Marshall.....	102
Figura 95 – Representação esquemática do suporte de amostra para simulação de tráfego, com circulação de água em temperatura constante	104
Figura 96 – Rolos lisos para compactação da mistura e simulação da deformação permanente	106

Figura 97 – Detalhe da mistura em condicionamento e da curva para definição do tempo de estabilização da placa a 60°C em estufa	107
Figura 98 – Situação do molde com água para simulação da deformação permanente.....	107
Figura 99 – Detalhe do gabarito utilizado em ensaio para medida da deformação acumulada	108
Figura 100 – Detalhe da deformação gerada no ensaio e do traçado de resultados da deformação permanente após 16.000 passadas.....	109
Figura 101 – Granulometria das misturas utilizadas para aferição simulador CDT e simulador LCPC	109
Figura 102 – (i) Afundamento pelo equipamento CDT e (ii) afundamento percentual pelo equipamento do LTP - Francês.....	110
Figura 103 – Solicitação esquemática de um corpo de prova Marshall de mistura asfáltica sob compressão diametral e deslocamento elástico horizontal	112
Figura 104 – Duração dos tempos de carregamento e repouso.....	113
Figura 105 – Aparelhagem para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas	114
Figura 106 – Equipamento pneumático do LTP-EPUSP.....	115
Figura 107 – Fixação do atuador na base móvel.....	116
Figura 108 – Montagem do painel de comando	116
Figura 109 – Sistema de ligação do ar comprimido e válvula solenoide	117
Figura 110 – (i) Registro do LVDT e (ii) Registro da célula de carga.....	118
Figura 111 – Equipamento instalado no CDT	118
Figura 112 – Instrumentação usada na MTS.....	120
Figura 113 – (i) Ensaio nas prensas do CDT e (ii) do LTP	120
Figura 114 – Resultados obtidos no tempo de 1 s	121
Figura 115 – (i) CAP 30/45 e (ii) SBS 60/85	122
Figura 116 – Etapas do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	123
Figura 117 – Etapas do ensaio de módulo de resiliência	124
Figura 118 – Subdivisões do pulso de deslocamento	125
Figura 119 – Deslocamento resiliente instantâneo	125
Figura 120 – Deslocamento resiliente total	126
Figura 121 – Resultados de MR através do deslocamento total – CAP 30/45	127
Figura 122 – Resultados de MR através do deslocamento instantâneo – CAP 30/45.....	127
Figura 123 – Resultados de MR através do deslocamento total – SBS 60/85	128
Figura 124 – Resultados de MR através do deslocamento instantâneo – SBS 60/85.....	129
Figura 125 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento total) – CAP 30/45	130

Figura 126 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento instantâneo) – CAP 30/45.....	131
Figura 127 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento total) – SBS 60/85	132
Figura 128 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento instantâneo) – SBS 60/85	132
Figura 129 – Distribuição de partículas para placa de 4%, quanto a posição, dentro de cada seção da placa analisada	141
Figura 130 – Divisões em uma seção para avaliar a homogeneidade de cada seção de uma placa ..	143
Figura 131 – Distribuição de partículas para placa de 5%, quanto a posição, dentro de cada seção da placa analisada	143
Figura 132 – Distribuição de partículas para placa de 6%, quanto a posição, dentro de cada seção da placa analisada	144
Figura 133 – Anisotropia por pares de imagem para todas as placas.....	146
Figura 134 – PDI da placa compactada no CDT.....	147
Figura 135 – Resultado de quatro imagens analisadas de placa produzida no CDT-Arteris.....	148

1. CONCESSIONÁRIA

Autopista Régis Bittencourt

2. DESCRIÇÃO DO PROJETO

2.1. TÍTULO DO PROJETO

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO SIMULADOR DE TRÁFEGO DE LABORATÓRIO PARA PREVISÃO DE DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

2.2. OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo central desta pesquisa é desenvolver um equipamento para compactação de placas de misturas asfálticas e simulação de tráfego em laboratório. A intenção é de poder compactar amostras de material asfáltico de forma similar ao processo de compactação em campo (rolagem); e submeter as amostras a esforços similares aos verificados em pista com a passagem dos pneus dos veículos, que causam as deformações permanentes. A partir da simulação de tráfego em laboratório e da definição das propriedades mecânicas das misturas, objetiva-se definir limites aceitáveis de deformabilidade para misturas asfálticas destinadas às camadas de revestimento.

Objetivos específicos

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizados ensaios de referência nos equipamentos franceses de compactação e simulação de tráfego LCPC, no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT) da ARTERIS norteou a definição das misturas a serem avaliadas, com base nas misturas frequentemente utilizadas na rodovia Régis Bittencourt como camada de revestimento. As misturas foram avaliadas em três etapas distintas: (i) a compactação das amostras por rolagem, (ii) a simulação de tráfego nas amostras compactadas e (iii) a definição do módulo de resiliência de amostras compactadas por rolagem.

Para tanto, teve-se como objetivos específicos:

- Definir misturas asfálticas de interesse e suas propriedades volumétricas e mecânicas para aplicação como camada de revestimento, para avaliação e comparação com relação ao potencial de resistência à deformação permanente;
- Projetar e desenvolver o equipamento compactador e simulador de tráfego;
- Compactar diferentes misturas asfálticas e realizar verificações de densificação e estrutura interna das amostras através do processamento digital de imagens (PDI);
- Submeter à simulação de tráfego as misturas asfálticas moldadas em laboratório, no equipamento projetado nesta pesquisa e no equipamento LPC;
- Realização de ensaios complementares de caracterização mecânica, incluindo a determinação do módulo de resiliência como parâmetro indicador de projeto.

3. JUSTIFICATIVA

O processo de dosagem Marshall, amplamente utilizado no Brasil, tem sido extensivamente questionado por não contemplar considerações sobre os processos de danos envolvidos com a falência de misturas asfálticas em vida de serviço, assim como tem sido criticado por não fornecer informações necessárias para o desenvolvimento de projetos de misturas asfálticas duráveis. Como resultado, muitos pavimentos apresentam defeitos precoces quando em serviço, sendo parte destes insucessos atribuídos a deficiências de projeto e também a aceitação de misturas por parâmetros falhos e insuficientes.

Os defeitos verificados frequentemente nos pavimentos e que afetam significativamente as condições estruturais, funcionais e de segurança do usuário, bem como afetam a vida de serviço da estrutura são as deformações e os trincamentos. As deformações nas camadas de revestimento podem ter origem estrutural, atribuídas à baixa capacidade de suporte de subleito, ou podem ter origem em deficiências nas próprias misturas asfálticas. As deficiências das misturas asfálticas podem ter diferentes causas,

iniciando no processo de dosagem, incapaz de indicar com segurança os parâmetros relativos aos mecanismos de dano da mistura em vida de serviço. Fatores ineficientes durante a produção e execução das misturas também são importantes agentes causadores de misturas de baixa qualidade.

O processo de dosagem Marshall apresenta uma série de limitações, especialmente no que tange o comportamento mecânico das misturas dosadas. A inserção de ensaios para previsão de desempenho representa um significativo avanço no conhecimento sobre as propriedades das misturas asfálticas. Dentre eles destacamos os ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração, fadiga e resistência à deformação permanente.

A determinação do módulo de resiliência configura um importante indicador de comportamento, que tem sido negligenciado em muitos casos, especialmente para a adoção em projetos de dimensionamento de estruturas; observam-se diversos projetos com incoerências nos valores adotados para diferentes misturas. Existe atualmente uma vasta gama de tipos de misturas asfálticas, sendo que as diversas variações implicam necessariamente em diferenças nos comportamentos e parâmetros de cada mistura, de modo que não é adequado adotar valores modulares similares para misturas diferentes, além dos expressivos efeitos de se adotar valores meramente estimados. A determinação do módulo de resiliência é ainda um indicador que pode ser utilizado como controle de qualidade da mistura executada, de modo que a mistura não apenas atenda aos parâmetros volumétricos associados à dosagem Marshall, mas também atenda a critérios de comportamento mecânico previstos em projeto.

A verificação da resistência à tração tem sido mais difundida, especialmente por conta de correlações sugeridas entre a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de resiliência por compressão diametral. Contudo, estas correlações devem ser mais bem investigadas, pois podem variar pra diferentes tipos de misturas asfálticas, a variações de teores de projeto e tipos de ligantes asfálticos utilizados.

A investigação da resistência ao dano das misturas é outro fator crucial na caracterização das misturas asfálticas, sendo que o trincamento e a deformação permanente são os principais tipos de danos que acometem os pavimentos. A fadiga precoce tem sido constantemente identificada em pavimentos severamente trincados, tanto quanto se observam deformações plásticas que comprometem a dirigibilidade e segurança do usuário. A dosagem adequada de misturas asfálticas não deve se restringir apenas aos parâmetros volumétricos, mas se estender às implicações nos parâmetros de danos.

É de conhecimento geral, que o aumento dos teores de ligante melhora significativamente as características de resistência à fadiga enquanto reduz significativamente a resistência à deformação permanente. O contrário também acontece, ou seja, a redução nos teores de ligante diminui a resistência à fadiga, levando a trincamentos precoces ao mesmo tempo em que aumenta a resistência à deformação permanente. O processo de dosagem deve ponderar a relação de um teor ótimo que seja suficiente para garantir que nenhum dano se sobressaia.

O método de dosagem Marshall em geral fornece teores de ligante superiores aos obtidos pelo método de dosagem americano Superpave, que se baseia na compactação de amostras por adensamento com uso do compactador giratório; teores mais elevados podem levar a problemas de deformação permanente. Estudos mais aprofundados sobre os teores obtidos por meio da dosagem Marshall devem ser realizados, em especial, sobre os efeitos destes teores nos mecanismos de danos.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Esta pesquisa previu o projeto e o desenvolvimento de um equipamento capaz de compactar corpos de prova de concretos asfálticos em forma de placas e de um equipamento que simule a repetição de carga de tráfego por meio de roda, para em laboratório verificar danos nas misturas asfálticas, principalmente com relação à deformação permanente acumulada e danos por umidade sob ação também de cargas repetidas. O conjunto de equipamentos, nomeado Compactador - Simulador do Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CS-CDT), foi produzido em duas etapas.

O equipamento de compactação foi baseado no funcionamento do equipamento francês do LCPC para compactação e no equipamento APA (*Asphalt Pavement Analyzer*) de compactação. Para o equipamento de trilhas de rodas, teve-se por objetivo simular o tráfego em misturas seja baseado no equipamento francês tipo LCPC ou no equipamento alemão *Hamburg Wheel Tracking Device* – HWTD, que provoca deformação permanente em trilha de roda e também a desagregação de misturas asfálticas por dano de umidade induzida. As amostras devem ser moldadas nos mesmos moldes utilizados nos equipamentos franceses, permitindo que se alternem os ensaios entre os equipamentos do LCPC (instalado na USP) e o equipamento a ser desenvolvido pelo CDT (ARTERIS), para comparação de resultados.

Na primeira fase de desenvolvimento do conjunto CS-CDT, o equipamento teve a estrutura primária definida.

Foram moldadas diferentes misturas no compactador LCPC e no conjunto CS-CDT para comparação. As placas moldadas em laboratório foram submetidas a ensaios para verificação de densificação e medidas de volume de vazios. As placas foram ainda submetidas a análises por meio do processamento digital por imagem, com o objetivo de se verificar a estrutura interna das misturas a partir de cada equipamento. Nesta fase, implantou-se um sistema de comparação de misturas asfálticas compactadas no LCPC e no CS-CDT para determinação de similaridades de microestrutura da matriz de agregados, eventual existência de segregação, homogeneidade da mistura, peso específico aparente, distribuição de vazios, entre outras características de estado.

Objetivou-se obter no novo equipamento, uma mistura bem compactada e homogênea para ser testada à ação de cargas repetidas e potencial de formação de trilhas de rodas e de desagregação por dano por umidade induzida.

As misturas asfálticas foram produzidas com auxílio de um equipamento misturador de simples operação, que permitiu homogeneização eficiente similar ao processo de usinagem

realizado em usinas. O equipamento foi desenvolvido no início da pesquisa, de modo que todas as misturas produzidas no CDT - Arteris, foram ensaiadas a partir deste equipamento.

Na segunda fase da pesquisa foram desenvolvidos os itens necessários à simulação do acúmulo de deformação permanente de amostras de misturas asfáltica, compactada por meio do CS-CDT e do equipamento francês para compactação. O equipamento foi composto para ter capacidade de aplicar carga em frequência repetida. O conjunto de equipamentos de compactação e simulação de tráfego constitui-se em uma inovação. Embora o processo de desenvolvimento de tal equipamento seja complexo, obteve-se um conjunto de equipamentos com custo de produção mais baixo do que os equipamentos existentes no mercado.

O conjunto de equipamentos CS-CDT produz resultados que devem ser comparados e hierarquizados em função dos equipamentos franceses de compactação e simulação, de forma que exista uma equivalência entre os resultados, independentemente do tipo de mistura ensaiada. A calibração periódica do CS-CDT deve ser realizada por meio de dispositivos no próprio equipamento tais como pressão de contato, velocidade de aplicação de carga e controle de taxa de carregamento.

Outro parâmetro a ser avaliado foi o módulo de resiliência, parâmetro fundamental para o dimensionamento de estruturas de pavimentos. O módulo foi obtido por meio de um equipamento desenvolvido no CDT, com a colaboração do LTP-PTR-EPUSP, para aplicação de carga repetida diametral em amostras com 100 mm de diâmetro e 63,7 mm de altura; o equipamento ainda permite a aplicação de carga axial em corpos de prova na proporção de 1:2 (diâmetro:altura). O equipamento pneumático de ensaio de módulo de resiliência desenvolvido teve seus resultados comparados diretamente com equipamento similar existente no LTP - EPUSP. Desta forma foram desenvolvidos nesta pesquisa quatro equipamentos: (i) mesa compactadora, (ii) simulador de tráfego, (iii) ensaio para módulo de resiliência, e (iv) misturador de laboratório, de modo que foram obtidos parâmetros de comportamento em relação aos danos das misturas em serviço, e parâmetros de resiliência para aplicação em projetos e como controle de qualidade das misturas asfálticas.

4.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Os ensaios realizados, cujos resultados foram analisados, estão definidos em especificações da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e AFNOR-CEN (*Association Française de Normalisation - Comité Européen de Normalisation*), e em procedimentos a serem desenvolvidos, tendo em vista a falta de algumas especificações para testes específicos.

4.2. ATIVIDADES

Esta pesquisa foi concebida para ser realizada conforme as etapas, a saber:

- Desenvolvimento de equipamento misturador para produção de misturas asfálticas, de modo que a preparação em laboratório seja similar à produção de misturas asfálticas em usinas de grande porte, aproximando a relação campo/ laboratório;
- Definição dos tipos de misturas de interesse para uso como camada de revestimento, incluindo misturas que sejam utilizadas na Autopista Régis Bittencourt com frequência, permitindo comparações entre os comportamentos verificados em laboratório e em campo; foram definidas misturas de uso recorrente no Brasil, com comportamento extensamente estudado e conhecido;
- Projeto e desenvolvimento de equipamento compactador (fase 1) e simulador de tráfego (fase 2) de laboratório, denominado “Compactador – Simulador do Centro de Desenvolvimento Tecnológico – CS-CDT”. O equipamento agrega duas funções, contudo, estas foram desenvolvidas em duas etapas distintas, devido às necessidades de adaptação do equipamento ao processo de compactação ou ao processo de simulação, tais como aplicação de carga, velocidade de percurso da roda, tipo de roda para cada ensaio, tipo de condicionamento térmico da mistura para cada ensaio, dentre outros fatores que se apresentaram necessários, durante o projeto, montagem e teste do equipamento;
- Execução dos projetos de mistura pelo processo de dosagem Marshall, uma vez que este processo tem sido ainda amplamente usado pelos projetistas e no país;
- Realização de ensaios de compactação no equipamento CS-CDT, e no equipamento de compactação LCPC, para comparação direta entre as placas obtidas por cada equipamento. As placas moldadas no equipamento CS-CDT deveriam em princípio trabalharem com as mesmas dimensões das placas moldadas no equipamento francês, de modo que as placas pudessem ser

produzidas em qualquer um dos equipamentos, garantindo as mesmas propriedades;

- Verificação da estrutura interna em relação à distribuição dos agregados e de vazios nas placas compactadas, por meio de processamento digital de imagens (PDI) e verificação de densificação de misturas compactadas por cada equipamento. Considerando-se que as propriedades volumétricas das misturas compactadas, podem variar em função do tipo de roda (bem como área de contato e carga) objetivou-se garantir compactação efetiva, sem que o CS-CDT tenha necessariamente o mesmo tipo de roda que compõe o equipamento francês;
- Desenvolvimento de equipamento pneumático para ensaio de módulo de resiliência por aplicação de carga axial e diametral; o desenvolvimento deste equipamento foi realizado principalmente para apoiar os projetos estruturais da concessionária e de outras rodovias do grupo;
- Realização de ensaios de simulação de tráfego no equipamento CS-CDT e no equipamento francês LCPC, alternando-se amostras compactadas por ambos os equipamentos;
- Análise dos dados de ensaios de comportamento mecânico;
- Relatório Final.

Neste Relatório Final são apresentados todos os itens que contribuíram para que os objetivos do estudo fossem atingidos. Fazendo parte do mesmo: i) a apresentação da misturadora tipo bateadeira para homogeneização de misturas asfálticas desenvolvidas durante o projeto e aplicada nos estudos; ii) a definição do procedimento de compactação de misturas asfálticas com o compactador/simulador do Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CS-CDT); iii) o procedimento para realização de ensaios tipo deformação permanente com posterior checagem e ranqueamento de respostas obtidas entre várias misturas no simulador de tráfego; e iv) a montagem e aferição do equipamento de módulo de resiliência do CDT-Arteris.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas usinadas a quente consistem em uma combinação de agregados uniformemente misturados e recobertos com ligante asfáltico (Asphalt Institute, 2007). Segundo Bernucci et al, (2008), misturas asfálticas a quente constituem-se em uma composição de agregados minerais, de vários tamanhos com ligante asfáltico, podendo incluir algum tipo de aditivo, sendo produzida em usina própria, de forma adequadamente proporcionada para que garanta trabalhabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico. A mistura asfáltica é utilizada comumente como camada de revestimento do pavimento, destinada a receber a carga direta imposta pelos veículos e ação climática. A mistura asfáltica deve ser, tanto quanto possível, impermeável e resistir aos esforços de contato pneu – pavimento.

A produção de mistura asfáltica a quente se dá em usinas asfálticas com a secagem e aquecimento do agregado mineral (remoção da umidade e temperatura elevada para permitir o envolvimento do ligante asfáltico). A composição é determinada em projeto, tendo em vista a distribuição granulométrica dos agregados, adicionando-se ligante asfáltico em estado líquido, obtido por meio de aquecimento, na proporção definida em projeto de dosagem. As misturas asfálticas podem apresentar uma série de variáveis relativas à sua formulação, permitindo adequação aos diferentes tipos de solicitações.

5.2. PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO

A homogeneização é uma etapa importante na produção de massa asfáltica, pois nesta etapa deve haver energia suficiente para garantir que todos os agregados sejam adequadamente recobertos pelo ligante asfáltico, de modo a formar filme asfáltico em espessura correta e sem falhas de cobertura. Durante a usinagem ocorre maior exposição do filme asfáltico ao oxigênio, o que implica num maior envelhecimento do ligante. Quanto mais eficiente for o processo de homogeneização, menor deve ser o envelhecimento. Frequentemente, a produção em laboratório se dá de modo simplificado, com misturação em recipiente aberto.

A produção de misturas asfálticas em usinas pode ser realizada em tambor misturador tipo Pug Mill, como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1 – Misturador tipo Pug Mill

5.3. COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O ligante asfáltico é trabalhável em temperaturas elevadas; assim, a mistura asfáltica usinada a quente deve ser compactada em pista ou em laboratório sem perda expressiva de temperatura, o que acarretaria em perda da trabalhabilidade. A compactação tem por objetivo densificar a mistura, assim reduzindo o volume de vazios e promovendo estabilidade à mistura asfáltica. Com a compactação, é possível que haja intertravamento das partículas de agregado, assim promovendo estabilidade e resistência à deformação, concomitantemente, reduzindo a permeabilidade da mistura e melhorando sua durabilidade (Asphalt Institute, 2007).

A dosagem de misturas asfálticas tem por objetivo auxiliar na escolha do teor ótimo de ligante necessário para uma determinada distribuição granulométrica, sendo esse teor variável com: o tipo de ligante, a granulometria, a temperatura e o método de compactação. Nesta pesquisa, adotou-se para avaliação de distribuições granulométricas e projetos de dosagem para escolha de uma mistura asfáltica de referência, os métodos de compactação Marshall e o Superpave. É importante ressaltar que a dosagem realizada por diferentes métodos resultam geralmente em teores de projeto diferentes, devido principalmente à forma de compactação dos corpos de prova na fase do projeto da mistura.

Diferentes processos de dosagem de misturas podem ser verificados atualmente, cada qual com vantagens e desvantagens, objetivando subsidiar a produção em escala para pavimentação de rodovias. A compactação proporciona uma superfície suave e desempenada, e aumenta a vida útil dos materiais asfálticos (Bernucci et al, 2008). Serão discutidos nos próximos itens, três processos de compactação que ilustram a evolução na indústria da pavimentação asfáltica, sendo (i) compactação por impacto - Marshall, (ii) compactação por cisalhamento giratório, e (iii) compactação por rolagem.

5.3.1. Compactador Marshall e dosagem

O método de dosagem Marshall foi desenvolvido por Bruce Marshall em conjunto com o United States of Corps of Engineers e o Departamento de Estradas do Mississippi, pré-segunda guerra, aproximadamente em 1930 (Asphalt Institute, 2007). O método consiste em determinar a quantidade ótima de ligante asfáltico, a partir de resultados de laboratório, onde são testados corpos de prova preparados com agregados na granulometria de projeto e com teores de ligante previamente definidos. Os testes em corpos de prova com vários teores de ligante diferentes levam à variação de propriedades, dependentes do teor de ligante usado, e a análise destes resultados leva ao cálculo do teor de ligante que propicie comportamento adequado, com relação ao volume de vazios, massa específica aparente da mistura, vazios no agregado mineral, relação betume/vazios e estabilidade.

O procedimento de moldagem dos corpos de prova constitui-se em colocar a mistura asfáltica adequadamente misturada e aquecida, em um molde cilíndrico previamente aquecido no equipamento compactador. Um soquete de seção plena cai sobre a mistura contida no molde de uma altura de 45,72 centímetros, sendo aplicado um determinado número de golpes em cada face do corpo de prova. O equipamento está apresentado na Figura 2 e o soquete com o corpo de prova na Figura 3. Objetiva-se produzir corpos de prova de $63,5 \pm 1,3$ mm de altura por 102mm de diâmetro no processo de compactação Marshall.



Figura 2 – Compactador Marshall



Figura 3 – Base do soquete de seção plena (à esquerda) e base circular do corpo de prova de mistura asfáltica compactada com 100mm de diâmetro (à direita)

Atualmente este método, é o mais empregado no Brasil para dosagem de misturas asfálticas, seguindo as orientações do DNIT (DNER 043/1995) e ABNT/NBR 12891:1993. No entanto, o método apresenta uma série de deficiências. Motta (1998) apresenta algumas críticas relativas ao método Marshall, das quais se destacam a pouca representatividade do método de compactação em relação ao campo e ainda a grande influência na determinação do teor de projeto derivada de fatores ligados à preparação dos corpos de prova. Como dito anteriormente, o processo de compactação não permite grande movimentação dos agregados no corpo de prova e pode causar quebra de agregados no processo de compactação. A seção plena influencia significativamente na compactação, pois o ligante em

estado líquido é incompressível, assim impossibilitando a compactação e densificação próximas das densidades verificadas em campo.

5.3.2. Compactador por cisalhamento giratório e dosagem

Em busca de melhor forma de representar a compactação de campo e desenvolver um método de dosagem mais apropriado, desenvolveram-se equipamentos de compactação por amassamento (cisalhamento giratório). A origem deste equipamento é americana nos anos 50. Nos EUA foi retomada a compactação por cisalhamento nos anos 90 e desenvolvida a tecnologia Superpave (Figura 4), e na França a Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório – PCG (Figura 5), foi desenvolvida nos anos 70 a partir da americana original.

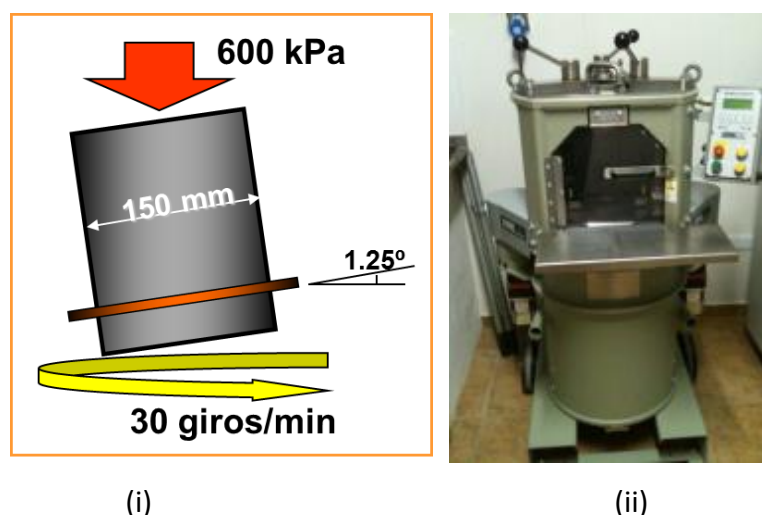


Figura 4 – Compactador Superpave norte-americano (i) princípios de funcionamento da densificação das misturas asfálticas dentro de um cilindro girado em torno de seu eixo por equipamento giratório (Fonte: Bernucci et al, 2008) e (ii) o equipamento instalado no CDT-ARTERIS



(i)



... (ii)

Figura 5 – (i) vista geral do Compactador PCG (giratório francês) instalado no LTP-EPUSP e (ii) detalhe do tamanho do cilindro metálico para a compactação das misturas asfálticas com 150mm de diâmetro

As vantagens propiciadas pela compactação por cisalhamento giratório são de que os riscos de quebra de agregado são minorados, obtendo maior densificação e melhor intertravamento entre partículas de agregados. A trabalhabilidade da mistura é melhor aproveitada neste tipo de equipamento quando comparado ao Marshall, sendo possível atingir maior grau de compactação e menor volume de vazios, tendo em vista que a incompressibilidade do ligante líquido não exerce influência considerável. O compactador giratório produz corpos de prova de maiores dimensões do que o Marshall, conforme se observa na comparação apresentada na Figura 6.



Figura 6 – Corpo de prova PCG francês (à esquerda) e Marshall (à direita) (Fonte: Motta, 2010)

No Brasil, recentemente foi disponibilizada a norma NBR 15897:2010, intitulada Misturas asfálticas a quente - Preparação de corpos-de-prova com o computador giratório. Esta Norma trata da preparação de corpos-de-prova cilíndricos de misturas asfálticas a quente produzidas em usina ou em laboratório, usando o compactador giratório Superpave.

Na Europa, a norma da compactação pelo giratório PCG é a EN 12697-31:2004 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Specimen preparation gyratory compactor.

Nos Estados Unidos, o programa Superpave se apoia na pesquisa SHRP A-379 (1994) e na norma da ASTM D6925 - 09 Standard Test Method for Preparation and Determination of

the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.

5.3.3. Compactação por rolagem

Dentre todas as formas de compactação apresentadas, a compactação por rolagem é a que mais se aproxima da compactação em campo, pois esta é realizada com rolos compactadores de pneu (Figura 7) e/ou de chapa metálica (Figura 8), podendo ser estático ou vibratório.



Figura 7 – Rolo compactador de pneu



Figura 8 – Rolo compactador de chapa metálica

A compactação por rolagem pode ser realizada em laboratório por equipamentos como o desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* – LCPC, dentre outros que

existem no mercado. O compactador por rolagem é o que mais se assemelha aos equipamentos compactadores de campo, como se observa na Figura 9 (equipamento francês utilizado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP).



Figura 9 – Compactador tipo LCPC instalado no LTP-EPUSP

A compactação se dá por amassamento, com a mistura contida no molde de modo a confiná-la em todas as direções permitindo a compressão, estruturando os agregados e reduzindo o volume de vazios. A metodologia de compactação segue a norma europeia EN 12697-33 (Mélange bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque), na qual é definido o número de passagens do pneu e seu carregamento. Outra vantagem deste método é que com ele é possível avaliar características de superfície do revestimento, tendo em vista que o corpo de prova apresenta características muito semelhantes com a textura obtida em campo.

O corpo de prova, após moldado, pode ser utilizado para determinar volume de vazios ou podem-se extrair corpos de prova cilíndricos, permitindo a realização de uma série de ensaios de comportamento mecânico; a placa de mistura asfáltica obtida neste processo de compactação pode ser submetida ao ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego de laboratório, ou ainda ser cortada nas dimensões necessárias para o ensaio de fadiga em viga bi-apoiada e solicitação em 2 pontos, ou ainda extração de corpos de prova prismáticos para ensaio de módulo complexo francês.

5.4. METODOLOGIA EMPREGADA NO DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

COMPACTADOR – SIMULADOR

O Compactador – Simulador do Centro de Desenvolvimento Tecnológico – CS-CDT objetiva agregar duas funções, (i) compactação de misturas asfálticas, e (ii) simulação de tráfego sobre o corpo de prova. A primeira etapa consiste no projeto e desenvolvimento do equipamento para compactação. A segunda etapa consiste no desenvolvimento da parte de correspondente à simulação de tráfego com a finalidade de se definir o comportamento das misturas em relação ao potencial de deformação permanente em trilha de roda.

O compactador do CDT foi desenvolvido com o objetivo de propiciar resultados comparáveis com o compactador do LCPC do LTP - EPUSP (Figura 9). “No conjunto de equipamentos franceses do LCPC, a mistura asfáltica é primeiramente compactada através de amassamento por roda de pneu com cargas e pressão de inflação reguláveis, na temperatura de projeto” (Bernucci et al, 2008). Este equipamento realiza a compactação da mistura, em acordo com a norma europeia EN 12697-33 (Mélange bitumineux: Méthodes d’essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 33: Confection d’éprouvettes au compacteur de plaque), da mesma forma que é realizada em campo por rolos compactadores, por amassamento. Diferentemente da compactação Marshall ou da compactação por cisalhamento giratório, o compactador por rolagem produz corpos de prova com maior fidelidade aos de campo.

Objetiva-se moldar no CS-CDT, corpos de provas de mesma dimensão daqueles moldados no equipamento LCPC, como mostrado na Figura 10, onde o molde de compactação do corpo de prova é representado em vista superior, na Figura 11 em perspectiva. Embora o molde tenha 200 mm a mais do que o molde do equipamento francês, pretende-se descartar as extremidades de modo que a amostra tenha 500 mm de comprimento ao final da produção.

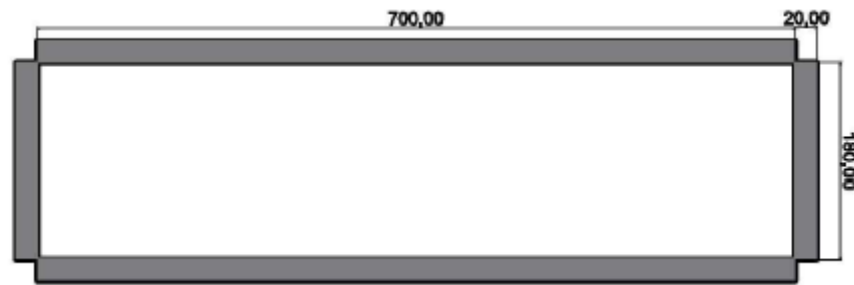


Figura 10 – Vista superior do molde para os corpos de prova a serem realizados na compactadora

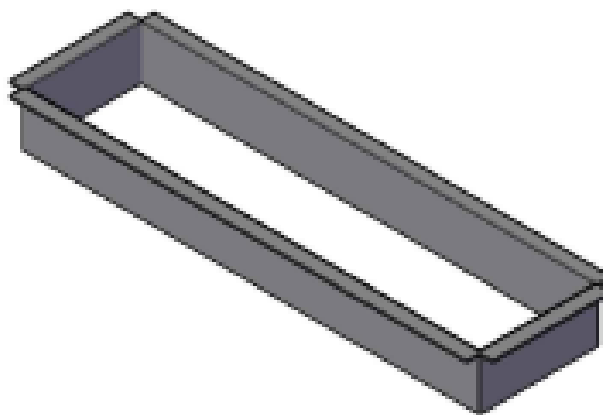


Figura 11 – Vista em perspectiva do molde

Os moldes dos corpos de prova foram projetados nestas dimensões para que seja possível compactar a mesma mistura na mesa compactadora do LCPC no LTP - EPUSP, e no equipamento a ser desenvolvido no CDT. Com isso será possível comparar o grau de compactação, volume de vazios, e intercambiar os corpos de prova entre os laboratórios.

O primeiro protótipo do compactador CS-CDT é apresentado na Figura 12, em representação esquemática; pode-se verificar que o mesmo considera: 1 - motor com controle de torque e velocidade; 2 - roda semelhante à utilizada no equipamento do LCPC, com a possibilidade de intercambiar com a roda do simulador no futuro; 3 - trilhos e mesa de sustentação para o molde; 4 - molde de compactação, ligado ao motor assim ele estará em movimento sobre os trilhos; 5 - sistema de aplicação de carga por peso morto.

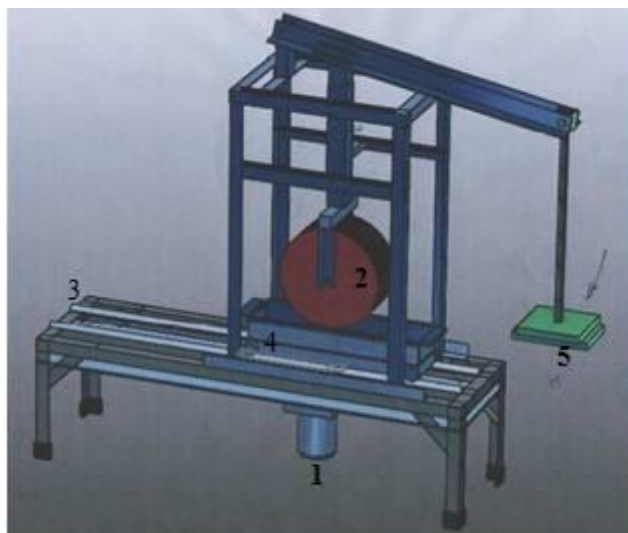


Figura 12 – Representação esquemática do equipamento compactador

Nesta etapa procurou-se desenvolver no equipamento as funções relativas à compactação, contudo o protótipo foi produzido com vistas a receber os complementos necessários para realizar as funções relativas à simulação de tráfego.

5.5. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A deformação permanente em trilha de roda é um dos problemas mais sérios de falha no desempenho de pavimentos asfálticos. Ela é definida como o acúmulo de pequenas quantidades de deformação não recuperável, resultantes da aplicação das cargas dos veículos (Moura , 2010).

Para avaliar em laboratório o desempenho da mistura face à deformação permanente, podem ser realizados ensaios fundamentais com carregamento repetido ou compressão uniaxial não confinada (creep estático e creep dinâmico) ou ainda ensaios de simulação de tráfego (Bernucci et al, 2008). Existem diversos equipamento de simulação de tráfego, podendo ser de laboratório ou de campo. O simulador de tráfego tipo-LCPC encontra-se instalado no LTP-EPUSP, conforme Figura 13.

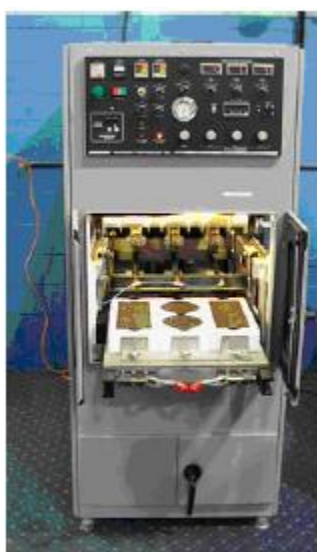


(i)

(ii)

Figura 13 – Simulador de tráfego tipo LCPC: (i) vista geral, e (ii) medição dos afundamentos em trilha de roda de mistura asfáltica durante teste

Ainda existem equipamentos similares como o Compactador Simulador APA (Figura 14), desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia da Geórgia, nos EUA, e o equipamento chamado de roda de Hamburgo (Figura 15).



(i)(Fonte: www.pavementinteractive.org)



(ii)

Figura 14 – Equipamento APA (i) vista geral do equipamento, e (ii) detalhe dos corpos-de-prova de mistura asfáltica testados

O Compactador simulador APA (Asphalt Pavement Analyzer) pode utilizar corpos de prova cilíndricos extraídos de pista ou produzidos pelo compactador giratório (Superpave ou PCG). O equipamento utiliza também corpos de prova compactados por vibração, porém sua fidelidade ao corpo de prova de compactação por rolagem (campo ou laboratório) não é muito grande devido ao método de densificação. O equipamento conta com uma câmara para controle térmico, assim como o equipamento francês.



Figura 15 – Roda de Hamburgo

(Fonte: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/labs/mixtures/hamburg.cfm>)

A Roda de Hamburgo é semelhante ao simulador da APA, porém o corpo de prova é imerso em água quente e submetido à simulação de tráfego realizada com uma roda metálica, avaliando assim a deformação permanente e a susceptibilidade à água.

A deformação em todos estes é medida com auxílio de relógio comparador, onde se mede previamente ao ensaio o estado original do corpo de prova, e então ao decorrer dos ciclos de passagem da roda, é medido o quanto o centro afundou em relação ao princípio do ensaio.

Tendo como base o princípio de funcionamento dos equipamentos acima citados, buscar-se-á desenvolver neste projeto um simulador que utilize corpos de prova na forma de placas (tipo LCPC).

A proposta foi desenvolver um equipamento que propicie a melhor forma de compactação (rolagem) em placas retangulares (sendo então semelhante ao do LCPC) e no mesmo possa simular (semelhante à proposta do APA). Porém a simulação será realizada com roda de pneu em tamanho igual à do equipamento francês. A diferença de funcionamento será que o molde que contém a amostra fará a movimentação de ida e vinda, ao contrário dos demais equipamentos, em que a roda se movimenta sobre o corpo de prova sem movimentação.

5.6. MÓDULO DE RESILIÊNCIA E MÓDULO DINÂMICO

5.6.1. Módulo de Resiliência

De acordo com Bernucci et al (2008), “um bom projeto de pavimento é aquele que combina os materiais e as espessuras das camadas conforme a rigidez de cada uma dessas camadas, de modo a propiciar uma resposta estrutural do conjunto condizente com as solicitações do tráfego.” Assim é percebido que deve-se conceber o pavimento como um todo visto que a resposta estrutural será do conjunto. Segundo Hu *et al* (2008), “As características de rigidez são críticas, para qualquer projeto de pavimentos e para prever seu desempenho.”

Denotada a importância deste parâmetro, se faz necessário encontrar meios de mensurá-lo e avaliá-lo. Para tanto foram desenvolvidos diversos ensaios, dentre os quais os mais usuais atualmente são o Módulo de Resiliência e o Módulo Dinâmico.

Na década de 1930, Francis Hveem foi precursor, de estudos que buscavam relacionar as deformações recuperáveis com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. “Ele também adotou o termo resiliência, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações” (Bernucci *et al*, 2008).

O módulo de um material é resultante da deformação acometida ao mesmo a partir de uma carga determinada, seja ela cisalhante, dinâmica ou resiliente. O módulo de

elasticidade é determinado aplicando carregamentos crescentes em um ritmo especificado e medindo a deformação resultante (Asphalt Institute, 2007).

O ensaio de módulo de resiliência (MR) é realizado com um carregamento repetido com tensão indireta em corpos de prova de tamanho do corpo de prova Marshall, como pode ser visto na Figura 16. Não obstante, o MR pode ser realizado com diferentes corpos de prova, quanto ao tamanho e ao material, podendo ser materiais como solos ou mesmo materiais reciclados. O ensaio apresenta como resultado para misturas asfálticas o MR e o Coeficiente de Poisson.



Figura 16 – Ensaio de módulo de resiliência e detalhe de corpo-de-prova durante o ensaio

O ensaio é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Esta carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o descolamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura. (Bernucci et al, 2008).

Ainda de acordo com Bernucci et al (2008), o módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente pode variar em função de alguns fatores como o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas do corpo de prova, a energia de compactação utilizada na moldagem, a temperatura de compactação, a temperatura de ensaio, dentre outros.

O módulo de resiliência é um parâmetro fundamental de comportamento mecânico de materiais no projeto de pavimentos, sendo determinante na definição das camadas que compõem a estrutura do pavimento. No Brasil, alguns valores médios são sugeridos para misturas frequentemente utilizadas, mas existe uma carência significativa na confirmação destes valores, o que pode conduzir a equívocos importantes nos projetos.

O equipamento para ensaio de módulo de resiliência pode ser pneumático, hidráulico ou mecânico. Equipamentos pneumáticos tem funcionamento mais simples, porém, apresentam restrição de carregamento, velocidade e frequência de aplicação de carga em relação aos equipamentos de funcionamento hidráulico, contudo os equipamentos hidráulicos apresentam um processo de montagem relativamente mais complexo.

O ensaio é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Esta carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o descolamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura. (Bernucci *et al.*, 2008).

A forma do carregamento é apresentada esquematicamente na Figura 17, que gera um estado biaxial de tensões, que é governado pela Equação 01.

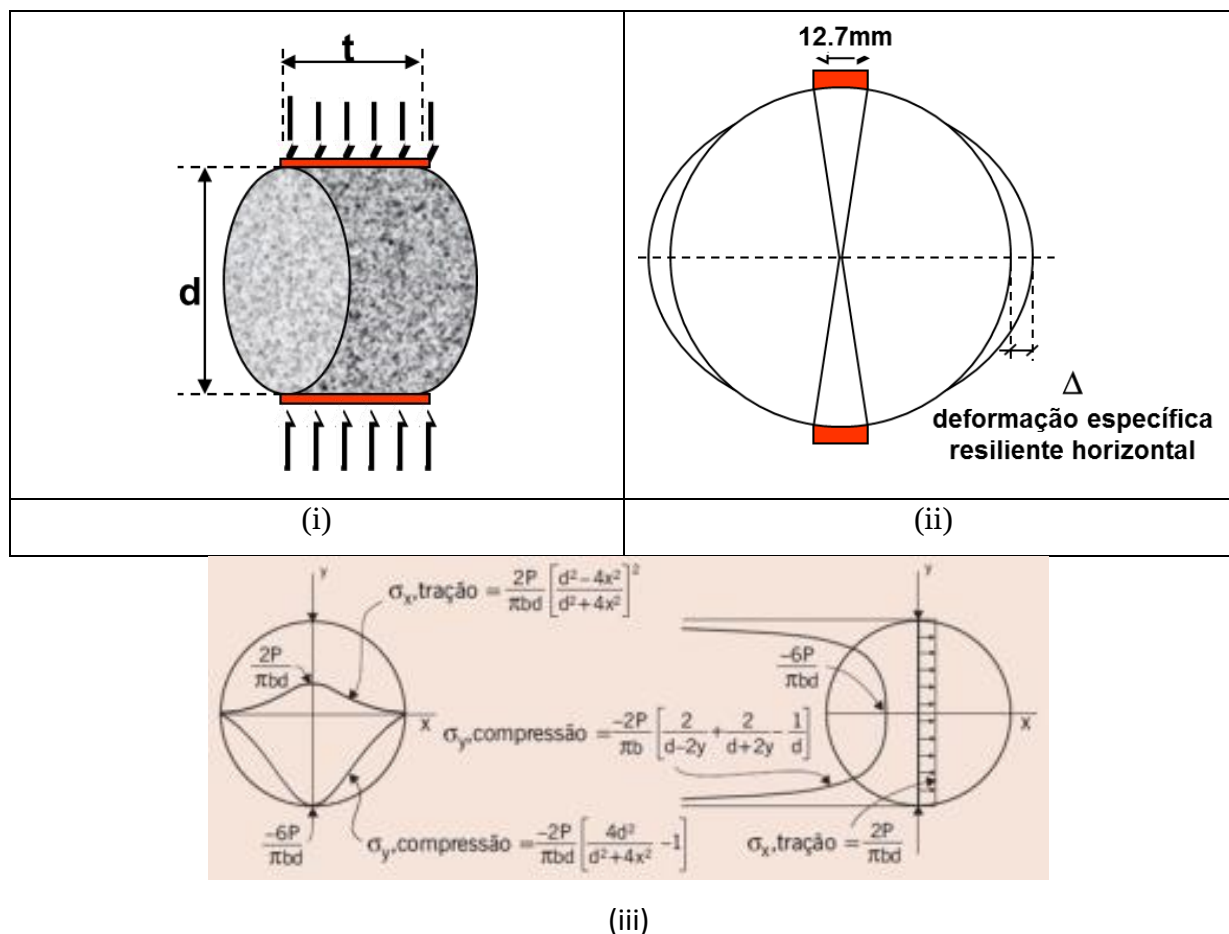


Figura 17 – Ensaio do Módulo de resiliência: (i) representação do tipo de carregamento dos corpos-de-prova de misturas asfálticas, (ii) representação da variação diametral do corpo-de-prova com o carregamento de compressão com aumento do diâmetro horizontal por tração, (iii) Representação esquemática do carregamento e estado biaxial de tensões
 (Fonte: Bernucci et al., 2008)

Equação 01:

$$\epsilon_x = \frac{1}{MR} (\sigma_x - \mu \sigma_y)$$

Onde :

ϵ_x = deformação de tração no diâmetro horizontal;

σ_x = tensão horizontal;

σ_y = tensão vertical;

μ = coeficiente de Poisson;

MR = módulo de resiliência.

O coeficiente de Poisson pode ser considerado independente do tipo de carregamento, variando com a temperatura. O valor usualmente varia entorno de 0,35 para baixas temperaturas e 0,50 para altas temperaturas (Von Quintus *et al.*, 1991). No Brasil é comum se assumir o valor de 0,30, conforme apresentado por Bernucci *et al.* (2008).

Quando realizado o ensaio são aplicadas cargas cíclicas com períodos de repouso, como apresentado na Figura 18, porem é importante notar que apenas os deslocamentos recuperáveis (resilientes) são considerados, visto que mesmo em baixas tensões são perceptíveis os deslocamentos plásticos. Os quais não devem ser considerados no calculo, para isso se faz um desconto nos deslocamentos lidos através de duas tangentes que passam pelas partes retilíneas do registro destes parâmetros. Na intercessão das duas tangentes é medida a parcela elástica a ser usado no cálculo de modulo de resiliência.

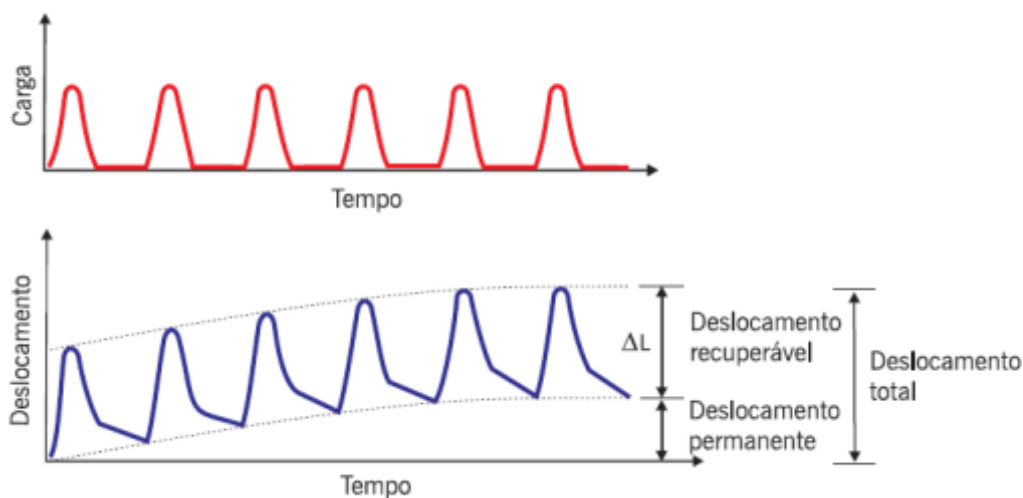


Figura 18 – Desloc. resilientes (recuperáveis) e desloc. plásticos (permanentes)

5.6.2. Módulo dinâmico

O módulo dinâmico analogamente ao resiliente é uma medida da qualidade do revestimento asfáltico quanto às características estruturais. De acordo com Garcia, G., Thompson, M. (2007), a característica mais importante de misturas asfálticas quentes para respostas estruturais de um pavimento flexível é o módulo do material (asfalto).

Complementarmente, de acordo com o relatório da NCHRP (Witczak, M.,2005), “Para materiais viscoelásticos, tal como os ligantes asfálticos, a relação tensão-deformação sob carregamento senoidal continuo é definida pelo seu módulo complexo dinâmico(E^*).”

O módulo complexo é definido como a razão de uma amplitude de um carregamento senoidal(em qualquer dado tempo e frequência) e a amplitude de da deformação senoidal (no mesmo tempo e frequência). De acordo com a Equação 02.

Equação 02:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)}$$

Onde:

σ_0 = Pico máximo de tensão;

ε_0 = Pico máximo de deformação;

ϕ = Ângulo de fase(Graus);

ω = Velocidade angular;

t = Tempo em segundos.

O módulo dinâmico por sua vez é o valor absoluto do modulo complexo, como na Equação 03.

Equação 03:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

O ensaio de módulo dinâmico é realizado com carregamentos senoidais verticais sobre o espécime, medindo a deformação também verticalmente. Outra característica do módulo dinâmico é que o ensaio é realizado em diferentes temperaturas e diferentes frequências, como mostrado na Figura 19.

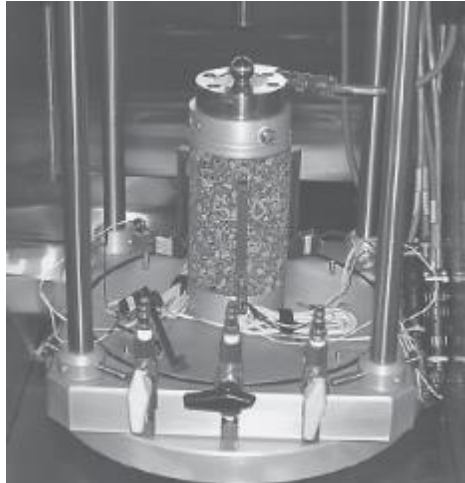


Figura 19 – Corpo de prova em ensaio de Módulo Dinâmico

(Fonte: Loulizi et al., 2006)

O módulo dinâmico de misturas asfálticas é obtido através de um padrão de carregamento senoidal uniaxial, como visto na Figura 20.

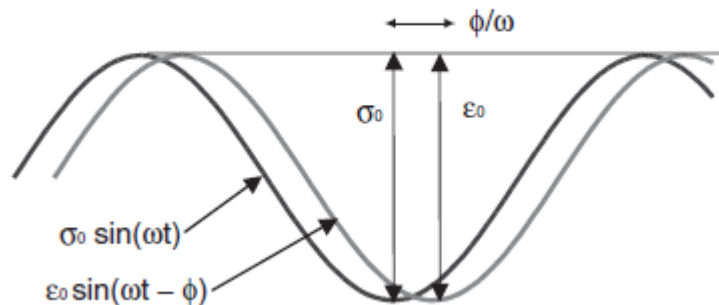


Figura 20 - Senoides de carregamento e deformação e a representação da defasagem entre os picos de carga e deslocamento

Uma peculiaridade que se apresenta como vantagem do módulo dinâmico é a possibilidade de realizá-lo em diferentes temperaturas e em diferentes frequências. Tal característica do ensaio propicia a criação de curvas mestras (*Master Curves*). Estas Curvas Mestras permitem que o módulo seja representado em um maior espectro de condições, assim podendo simular carregamentos de variados valores de frequência e temperatura. Visto que o asfalto é termo suscetível, pode-se avaliar com maior precisão as mudanças no módulo causadas por variação da temperatura.

5.7. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E COMPACTAÇÃO

Dentre os principais objetivos desta pesquisa está a avaliação de parâmetros de desempenho de misturas asfálticas por meio de equipamentos específicos de determinação de comportamento mecânico, desenvolvidos neste estudo. Para atingir estes propósitos, duas misturas foram avaliadas em laboratório, com vistas aos trabalhos desenvolvidos em campo, pela Autopista Régis Bittencourt.

A produção de misturas asfálticas permite a adoção de diversas variáveis a fim se obter material de qualidade e adequado para cada aplicação; dentre estas variáveis destacam-se a distribuição granulométrica e o tipo de ligante asfáltico utilizado.

Para avaliação do processo de compactação, a distribuição granulométrica é um parâmetro especialmente relevante, já que a configuração de vazios dentro da mistura é, em grande parte, função da granulometria da mistura. Tendo isto em vista, foram definidas duas distribuições granulométricas distintas, com Diâmetro Nominal Máximo (DNM) de 12,5 mm (Figura 21) e a outra de 19 mm (Figura 22), que permitam observar variações na estrutura interna das misturas compactadas.

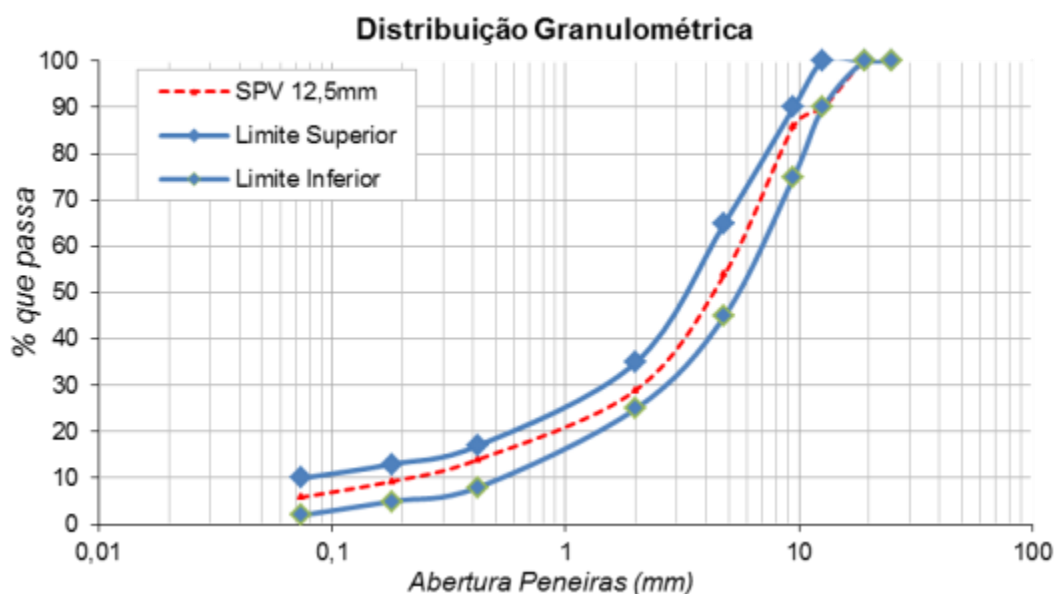


Figura 21 – Distribuição Granulométrica SPV 12,5 mm

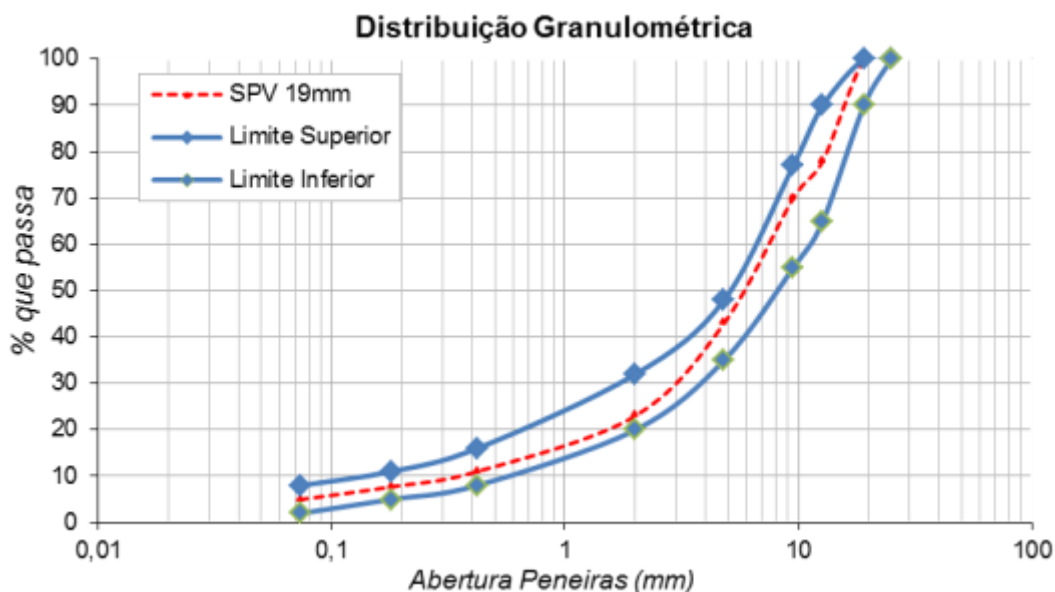


Figura 22 – Distribuição Granulométrica SPV 19 mm

O ligante asfáltico que deve ser utilizado na mistura foi um Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) modificado por 4% de polímero tipo SBS; tendo em vista o maior retorno elástico deste tipo de ligante, objetivou-se verificar com clareza, as medidas de módulo de resiliência.

A dosagem destas duas misturas, (i) SPV 12,5 mm com CAP modificado por SBS e (ii) SPV 19 mm com CAP modificado por SBS, foi realizada pelo método Marshall e pelo método SUPERPAVE. A variação no processo de dosagem pode conduzir a teores de projeto distintos; todos os quatro teores obtidos foram inicialmente avaliados em relação às propriedades volumétricas e mecânicas das misturas, para a definição mais acertada de um único teor de projeto para cada mistura.

6. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS USADAS NA PESQUISA

6.1. MATERIAIS

Nesse projeto de pesquisa foram utilizados três agregados e um ligante asfáltico modificado para a composição das misturas asfálticas. Na Tabela 1 são apresentadas

algumas características do ligante asfáltico, e na Tabela 2 algumas características padrão dos agregados (brita, pedrisco e pó de pedra).

Tabela 1 – Caracterização do ligante asfáltico modificado

Ensaio	Unidade	Método	CAP MODIFICADO 60/85	Especificação
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	NBR 6576	39	Min 45
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	64	Min 55
Recuperação Elástica por Torção	%	ARTERIS T 329	60	Min 60
Viscosidade - cP a 135°C (SP-21 - 10rpm)	cP	NBR 15184	2330	Máx 3000
Viscosidade - cP a 150°C (SP-21 - 30rpm)	cP	NBR 15184	975	Máx 2000
Viscosidade - cP a 177°C (SP-21 - 60rpm)	cP	NBR 15184	285	Máx 280
Massa Específica	g/cm ³	NBR 6296	1,011	-
RTFOT a 163°C , 85 minutos				
Variação em Massa	%	NBR 15235	0,1	Máx 1
Variação do Ponto de Amolecimento	°C	ANP R 19	9	Máx 5
Penetração Retida	%	ANP R 19	48	Mín 60
Variação na Recuperação Elástica	%	ANP R 19	21,9	Máx 5
Faixa de Temperatura para Mistura (°C)	184 a 189			
Faixa de Temperatura para Compactação (°C)	175 a 179			

Tabela 2 – Caracterização dos agregados

BRITA 1				
% de Grãos com Relação > (1 : 3)	ARTERIS D 4791		18,9	Máximo 20
% de Grãos com Relação > (1 : 5)	ARTERIS D 4791		3,0	Máximo 5
Desgaste Los Angeles	ABNT NBR-6465	%	15,6	Máximo 40
Absorção de água	ARTERIS T 85	%	0,2	Máximo 1,5
Massa Específica Real Seca	ARTERIS T 85	g/cm ³	2,766	-
Massa Específica Aparente SSS	ARTERIS T 85	g/cm ³	2,750	-
Massa Unitária Solta	DNIT - ME 152	g/cm ³	1,441	-
Massa Unitária Compactado Seco	DNIT - ME 153	g/cm ³	1,532	-
PEDRISCO				
% de Grãos com Relação > (1 : 3)	ARTERIS D 4791		24,0	Máximo 20
% de Grãos com Relação > (1 : 5)	ARTERIS D 4791		6,4	Máximo 5
Desgaste Los Angeles	ABNT NBR-6465	%	18,9	Máximo 40
Absorção de água	ARTERIS T 85	%	0,4	Máximo 1,5
Massa Específica Real Seca	ARTERIS T 85	g/cm ³	2,773	-
Massa Específica Aparente SSS	ARTERIS T 85	g/cm ³	2,740	-
Massa Unitária Solta	DNIT - ME 152	g/cm ³	1,392	-
Massa Unitária Compactado Seco	DNIT - ME 153	g/cm ³	1,483	-
PÓ DE PEDRA				
Azul de Metileno	ARTERIS TP 57	mg/g	1,8	Máximo 5
Angulosidade	ARTERIS T 304	%	48,5	Mínimo 45

Equivalente de Areia	ABNT NBR-12052	%	55,0	Mínimo 65
Absorção de Água	ARTERIS T 84	%	0,4	Máximo 1,5
Massa Específica Real Seca	ARTERIS T 84	g/cm ³	2,775	-
Massa Específica Aparente SSS	ARTERIS T 84	g/cm ³	2,741	-
Massa Unitária Solta	DNIT - ME 152	g/cm ³	1,580	-
Massa Unitária Compactado Seco	DNIT - ME 153	g/cm ³	1,791	-

6.2. SELEÇÃO E DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para preparação das misturas asfálticas foram definidas duas distribuições granulométricas, sendo uma com Diâmetro Nominal Máximo (DNM) de 12,5 mm e a outra de DNM de 19 mm, a fim de observar as possíveis variações na estrutura interna das misturas compactadas.

A preparação do material granular utilizado para fabricação dos corpos de prova foi feita através de secagem, homogeneização e quarteamento, para que então as misturas pudessem ser usinadas e compactadas. As Figuras 23, 24 e 25, apresentam, respectivamente, o processo de preparação (secagem, homogeneização e quarteamento) da brita, do pedrisco e do pó de pedra.



Figura 23 – Preparação da brita



Figura 24 – Preparação do pedrisco



Figura 25 – Preparação do pó de pedra

6.2.1. Mistura asfáltica SPV 12,5 mm – Dosagem Marshall

A dosagem pelo método Marshall, já descrita anteriormente, baseia-se na compactação por golpes de um soquete de seção plena sobre a amostra asfáltica, sendo que nesta pesquisa foram adotados 75 golpes por face da amostra, representando localidades de tráfego pesado. A partir da amostra compactada são determinados os parâmetros volumétricos e através do volume de vazios (4,0% para camada de rolamento) é definido o teor de projeto da mistura. As figuras 26 a 29 apresentam os parâmetros de dosagem obtidos com esse método para a distribuição granulométrica de 12,5mm.

Com a determinação dos parâmetros busca-se o teor de ligante que leve a um volume de vazios próximo a 4% (Figura 26), sendo para essa mistura o teor de ligante de 5,8%. As linhas em vermelho nas figuras abaixo ilustram os valores dos demais parâmetros para o teor de ligante referente aos 4,0% de vazios.

A massa específica aparente da mistura compactada é outro parâmetro importante, visto que este irá guiar a quantidade de mistura asfáltica a ser colocada dentro do molde na mesa compactadora para preparação das placas.

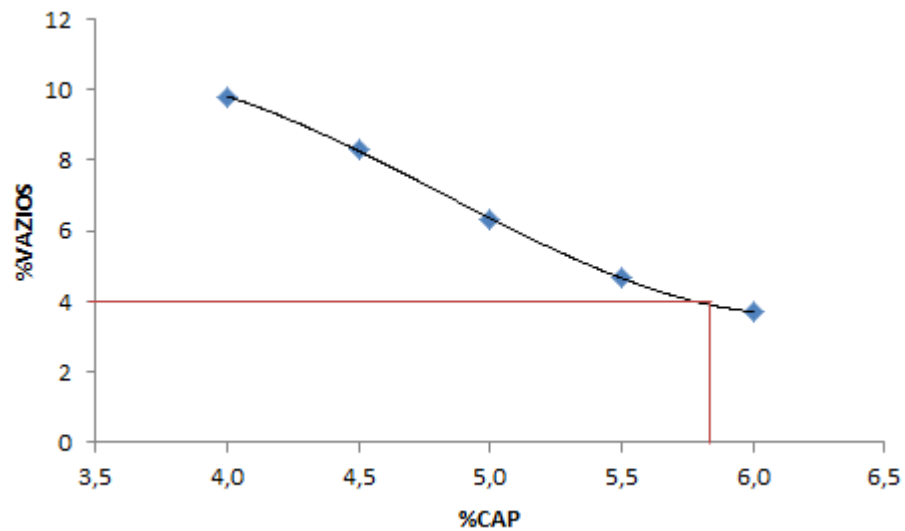


Figura 26 – Volume de vazios

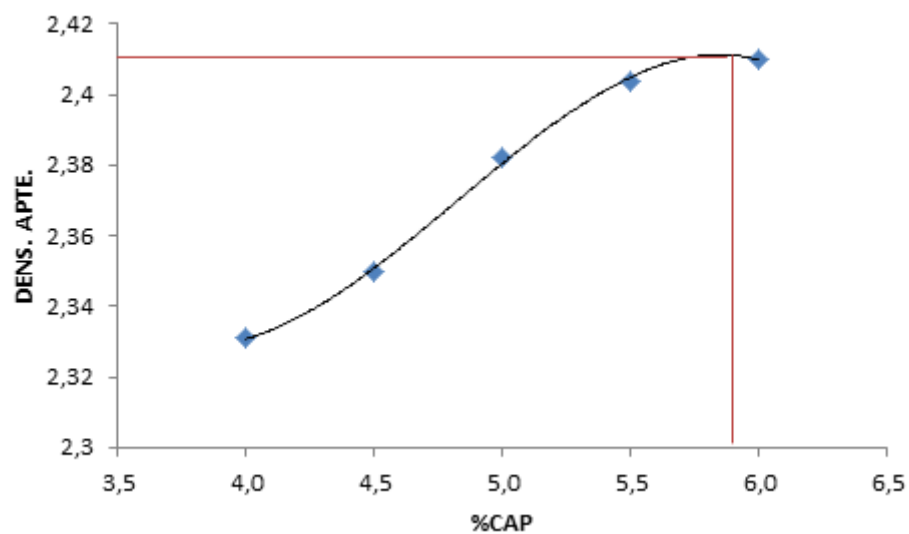


Figura 27 – Massa Específica Aparente

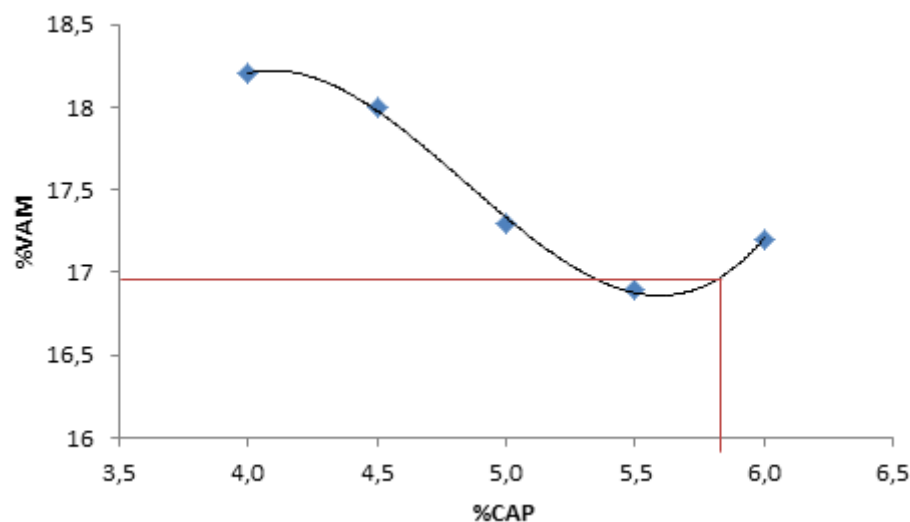


Figura 28 – Vazios do Agregado Mineral

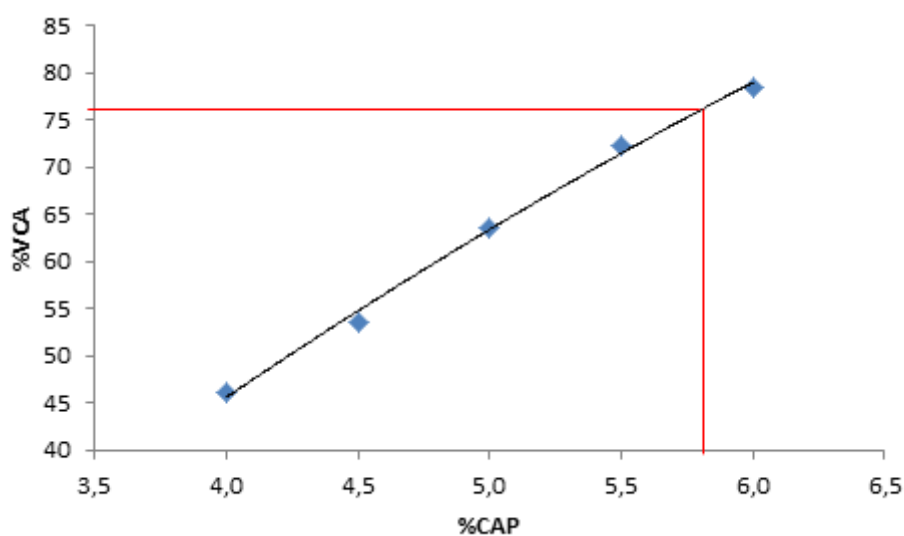


Figura 29 – Vazios Cheio com Asfalto

6.2.2. Mistura asfáltica SPV 12,5 mm – Dosagem Superpave 6"

Assim como o método de dosagem Marshall, uma abordagem sobre o método de dosagem Superpave já foi apresentada. Os parâmetros volumétricos obtidos para a dosagem Superpave, com molde de 6", da mistura SPV 12,5mm encontram-se apresentados nas Figuras 30 a 33. Selecionou-se o volume de vazios de 4% (Figura 30) para a seleção do teor de projeto, que ficou em 4,6% de ligante.

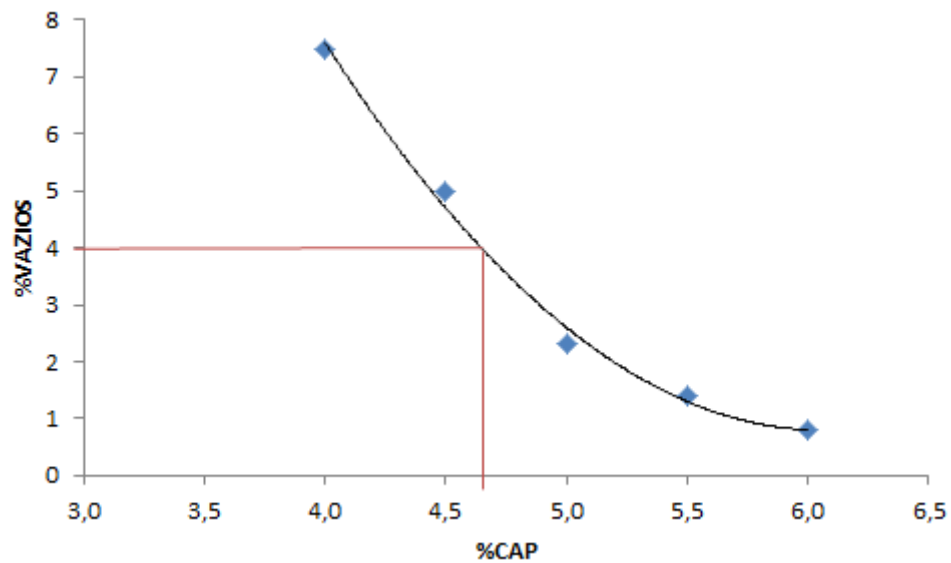


Figura 30 – Volume de Vazios

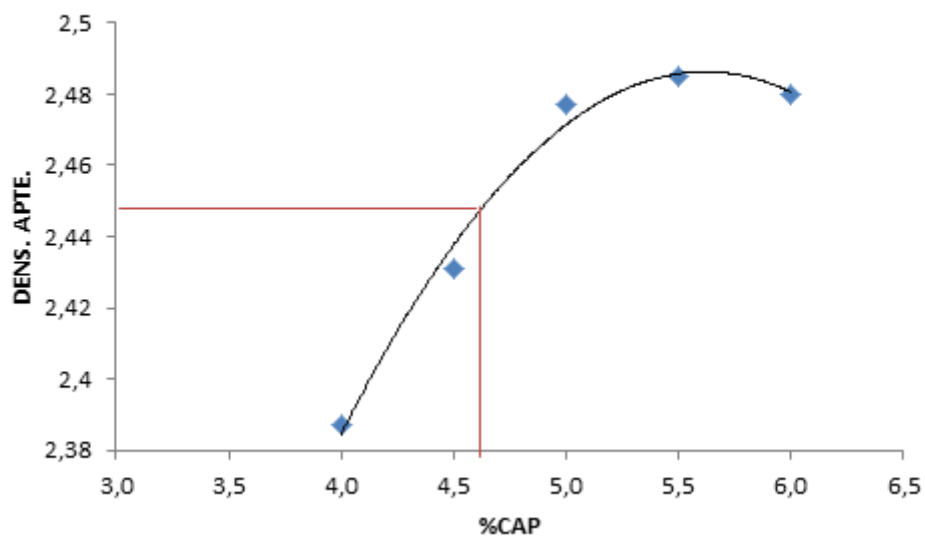


Figura 31 – Densidade Aparente

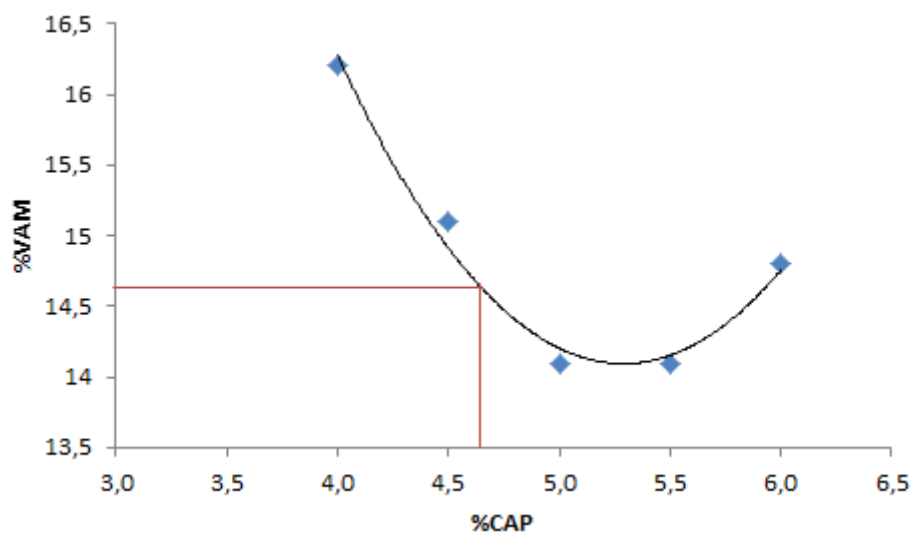


Figura 32 – Vazios do Agregado Mineral

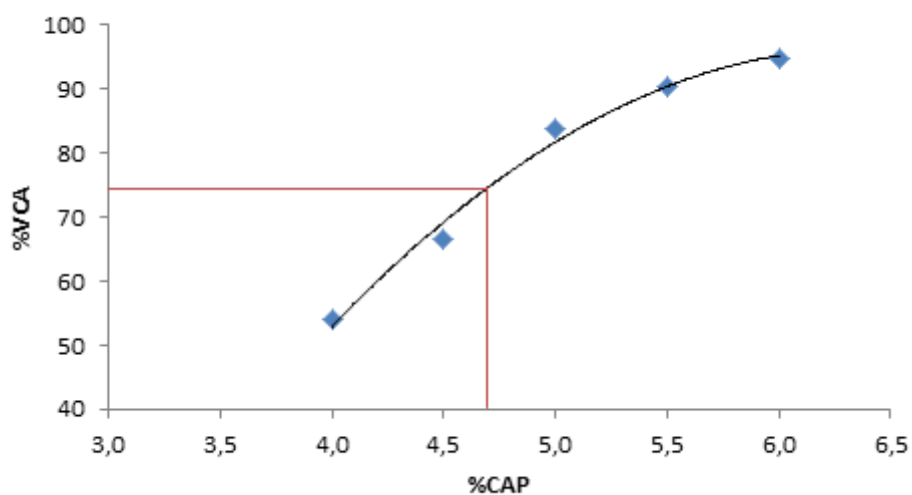


Figura 33 – Vazios Cheios de Asfalto

6.2.3. Mistura asfáltica SPV 19 mm – Dosagem Marshall

A dosagem Marshall também foi realizada para a mistura SPV 19 mm. Os parâmetros obtidos são apresentados nas Figuras 34 a 37, obtendo um teor de projeto de 5,7% (mantendo-se o volume de vazios próximo a 4,0%).

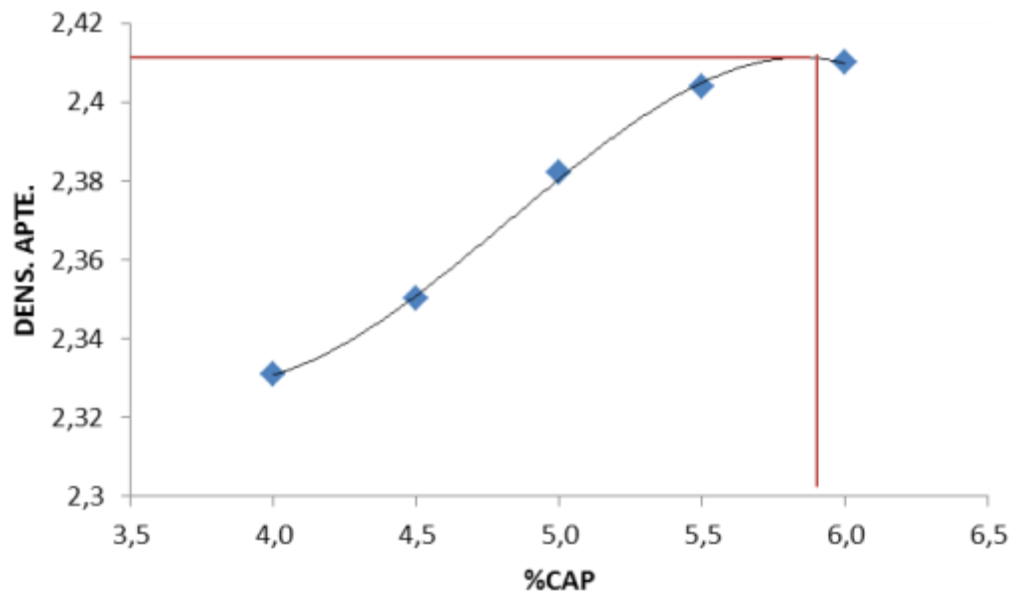


Figura 34 – Massa Específica Aparente

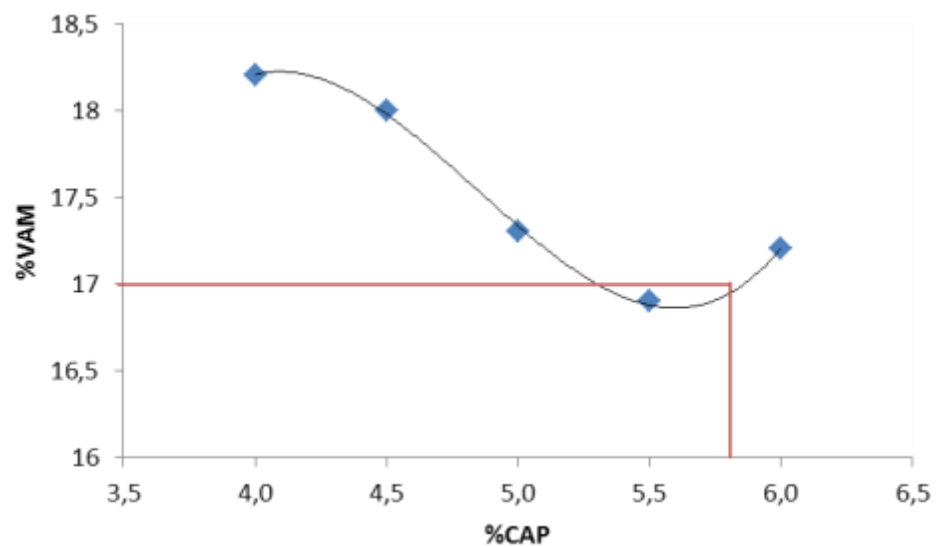


Figura 35 – Vazios de Agregado Mineral

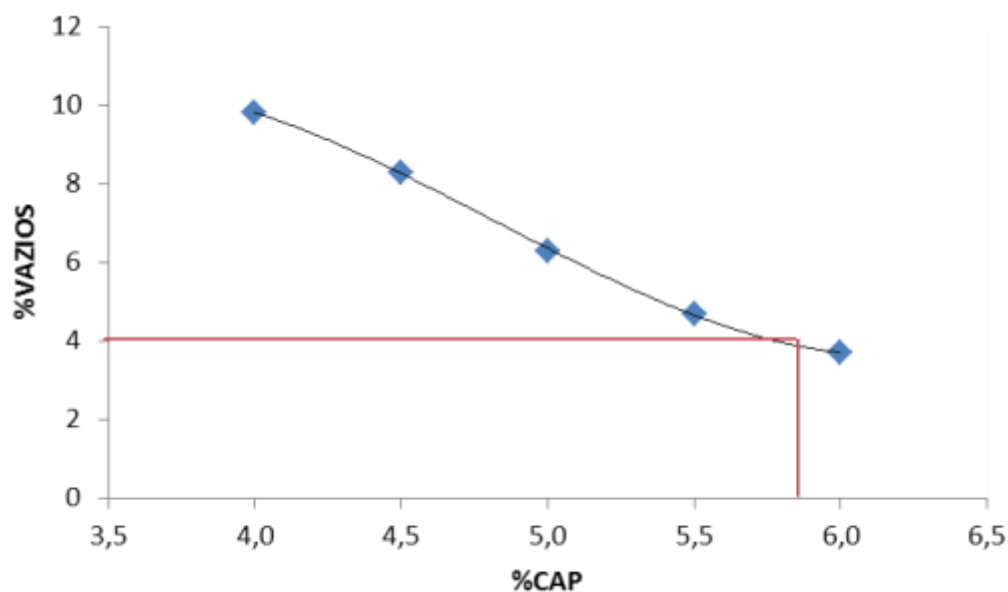


Figura 36 – Volume de Vazios

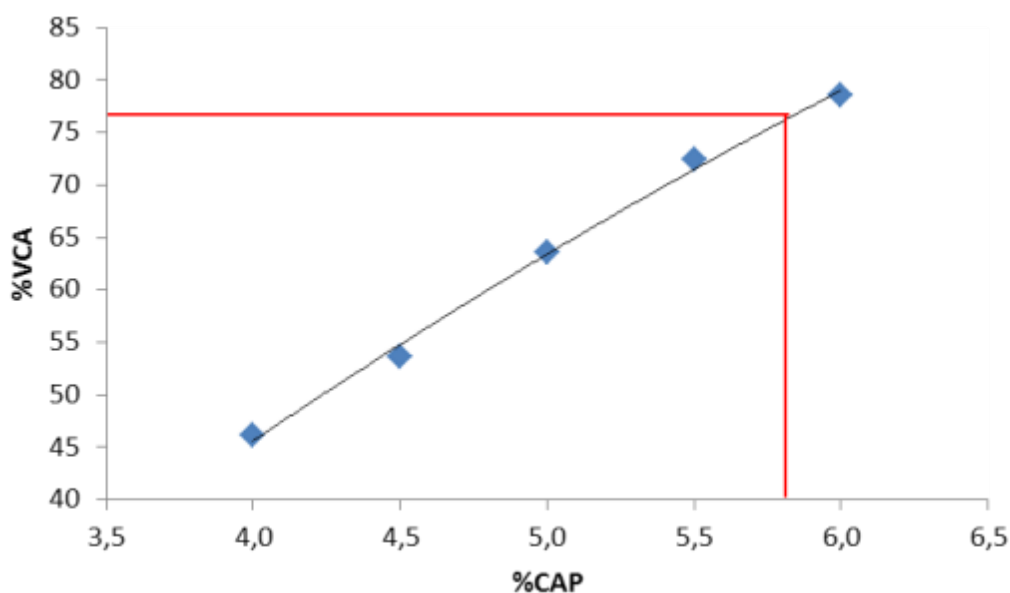


Figura 37 – Vazios Cheios de Asfalto

6.2.4. Mistura asfáltica SPV 19 mm – Dosagem Superpave 6"

Os parâmetros obtidos durante a dosagem Superpave 6" para a distribuição granulométrica de 19mm são apresentados nas Figuras 38 a 41. Para um volume de vazios de 4,0%, obteve-se um teor de projeto de 4,5% de ligante.

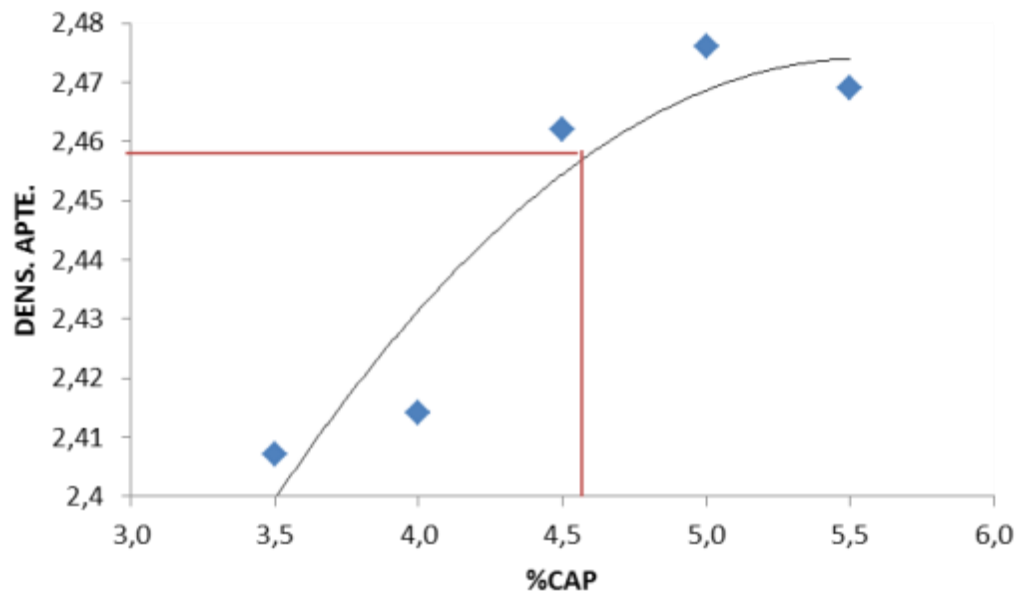


Figura 38 – Densidade Aparente

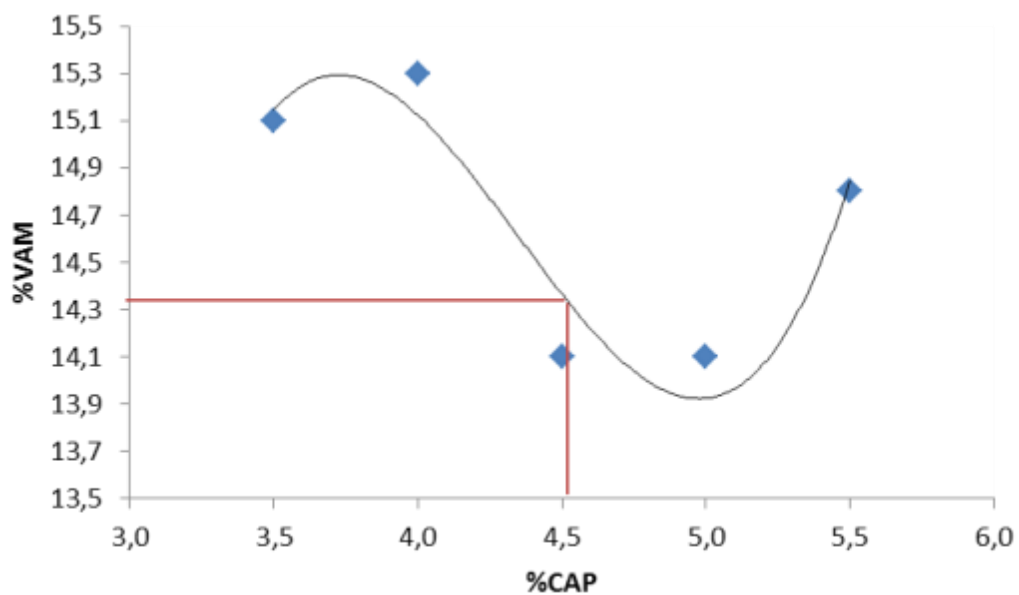


Figura 39 – Vazios do Agregado Mineral

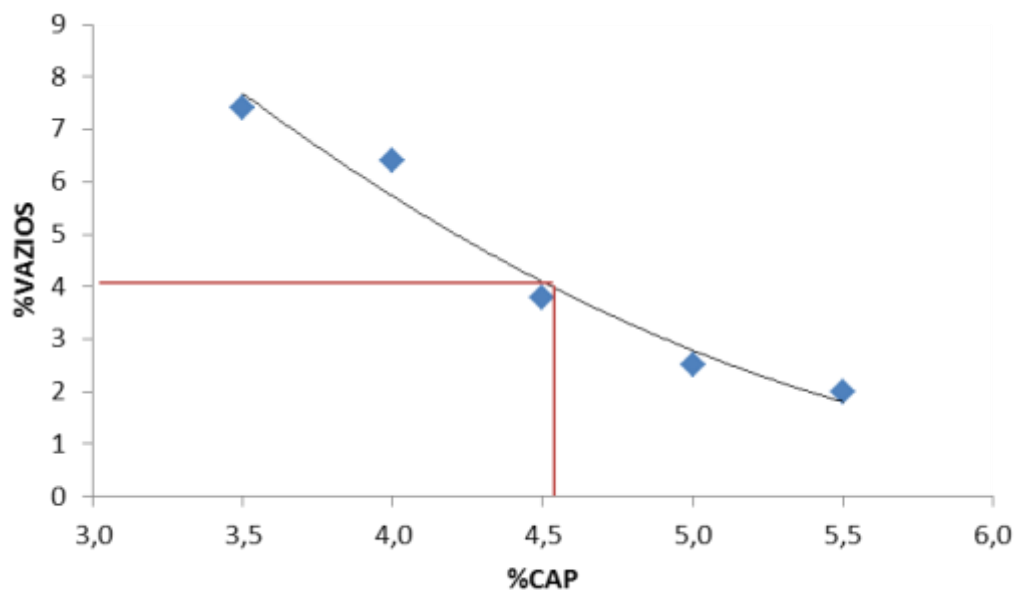


Figura 40 – Volume de Vazios

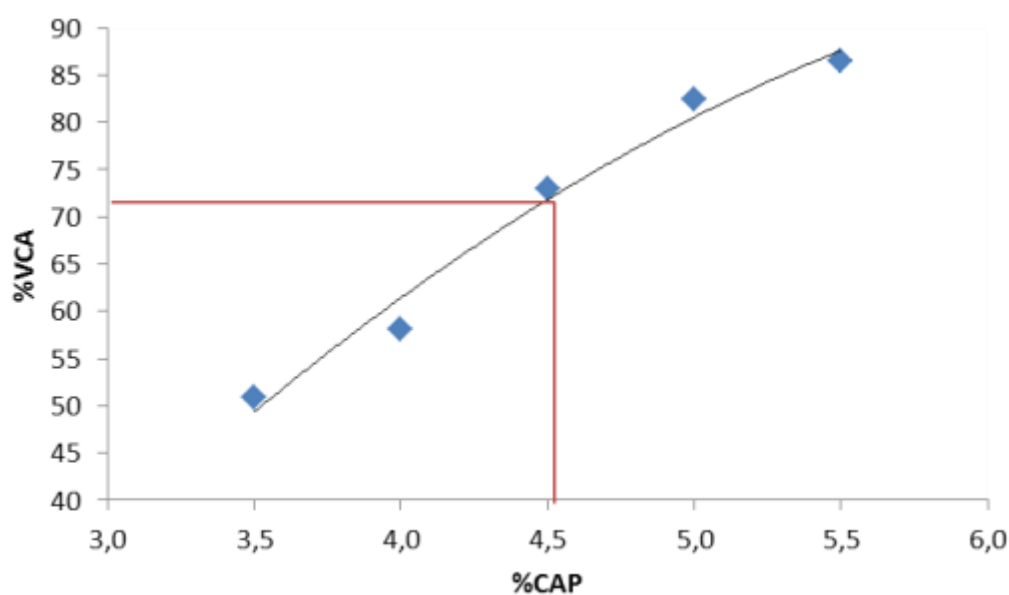


Figura 41 – Vazios Cheios de Asfalto

6.2.5. Avaliação mecânica das misturas SPV 12,5 e 19 mm – Ensaios de RT e MR

Ensaio de Resistência à Tração Indireta – RT

A caracterização das propriedades mecânicas das misturas é essencial para que o teor de projeto escolhido seja avaliado não apenas por características volumétricas. Foram

realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência, em corpos de prova moldados nos teores de projeto, conforme normas do DNIT, ABNT e ASTM.

Os ensaios de Resistência à Tração Indireta – RT a 25°C, foram realizados para os corpos de prova de cada dosagem, pelo método Marshall e pelo método Superpave, e também para o teor de projeto de ambos os métodos para as granulometrias de 12,5mm e 19mm. A Figura 42 apresenta a prensa MTS do LTP - EPUSP utilizada na realização do ensaio e a Figura 43 mostra o corpo de prova em detalhe durante a execução do mesmo.



Figura 42 – Prensa MTS executando ensaio de RT



Figura 43 – Detalhe do corpo de prova durante o ensaio de RT

A Tabela 3 e a Figura 44 apresentam os resultados da granulometria SPV 12,5mm, observa-se que os resultados dos corpos de prova no teor de projeto pela dosagem Superpave foram superiores aos resultados do teor de projeto pela dosagem Marshall. Esse fato deve-se não apenas à variação no teor de ligante, mas também à diferença na estrutura interna (volume de vazios) das amostras ensaiadas. Os CPs Superpave, inicialmente com 150 mm de diâmetro a aproximadamente 120 mm de altura, foram broqueados e serrados para os ensaios de MR e RT, de forma que apenas a parte central, ou miolo, do CP (com 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura) fosse para os ensaios. Enquanto o CP inteiro apresenta volume de vazios da ordem de 4,0%, a parte central tem aproximadamente 2,0%.

Tabela 3 – Resistência à tração - corpos de prova moldados nos teores de projeto – SPV 12,5mm

	CP	RT(MPa)	Média (MPa)
5,8% (Marshall)	119	1,752	1,82
	120	1,726	
	121	1,837	
	122	1,797	
	123	1,787	
	124	1,995	
4,6% (Superpave)	145	2,701	2,62
	146	-	
	147	2,479	
	148	2,682	

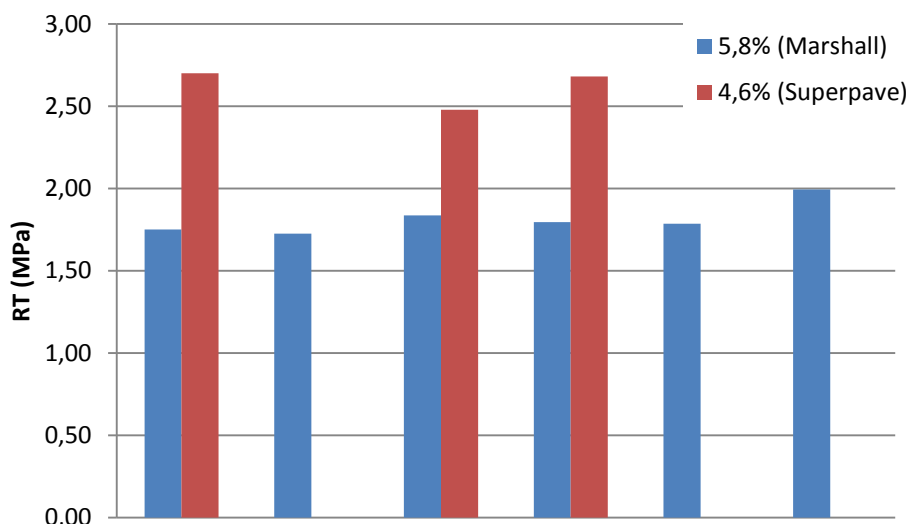


Figura 44 – RT - CPs moldados nos teores de projeto – SPV 12,5 mm

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados da granulometria SPV 19mm, bem como os volumes de vazios de cada amostra testada para corpos de prova moldados no compactador Marshall e amostras moldadas no compactador giratório Superpave de 6" (extraídas da parte central para os testes), respectivamente.

Tabela 4 – Resultados de RT de corpos de prova Marshall – SPV 19mm

Teor de ligante (%)	Nº corpo de prova	Volume de vazios médio (%)	Média de VV (%)	Desvio Padrão VV (%)	RT (MPa)	Média de RT (MPa)	Desvio padrão (MPa)
3,50	41	9,9	9,3	0,56	1,36	1,45	0,10
3,50	42	9,2			1,42		
3,50	43	8,8			1,56		
4,00	44	7,8	7,8	0,00	1,68	1,72	0,05
4,00	45	7,8			1,75		
4,50	47	6,3	6,7	0,49	1,72	1,71	0,02
4,50	48	7,0			1,69		
5,00	51	5,7	5,7	0,07	1,84	1,94	0,13
5,00	52	5,6			2,03		

5,50	53	4,9	4,3	0,53	1,79	1,89	0,09
5,50	54	3,9			1,94		
5,50	55	4,1			1,94		
6,00	62	3,6	3,2	0,40	1,62	1,61	0,03
6,00	63	2,8			1,63		
6,00	64	3,2			1,58		

Tabela 5 – Resultados de RT à 25°C de CPs extraídos das amostras do Superpave 6” – SPV 19mm

Teor de ligante (%)	N° corpo de prova	Volume de vazios (%)	Média de VV (%)	Desvio Padrão VV (%)	RT (MPa)	Média De RT (MPa)	Desvio padrão (MPa)
3,5	41	7,2	7,5	0,35	1,96	2,08	0,16
3,5	42	7,7			2,19		
4,0	43	6,5	6,7	0,21	2,12	2,12	0,00
4,0	44	6,8			2,12		
4,5	166	4,1	4,7	0,49	2,02	2,11	0,08
4,5	169	5,0			2,13		
4,5	170	4,9			2,17		
5,0	171	2,7	3,4	0,99	2,15	2,01	0,20
5,0	48	4,1			1,87		
5,5	49	2,6	2,4	0,28	1,94	1,97	0,04
5,5	50	2,2			1,99		

A Figura 45 mostra as curvas obtidas de RT em função do teor de ligante na mistura SPV 19mm. Observa-se que tanto com baixo teor como para teores muito elevados, a RT diminui. Com falta de ligante (pobre em teor), o volume de vazios interfere no resultado, fazendo diminuir a resistência. Para teores elevados, a 25°C, a fluência interfere, havendo excesso de lubrificação nos contatos, levando a resistências menores, com a presença de “esmagamento” dos corpos-de-prova e de deformação permanente importante. Em testes a temperaturas menores, esta redução não ocorre para teores elevados.

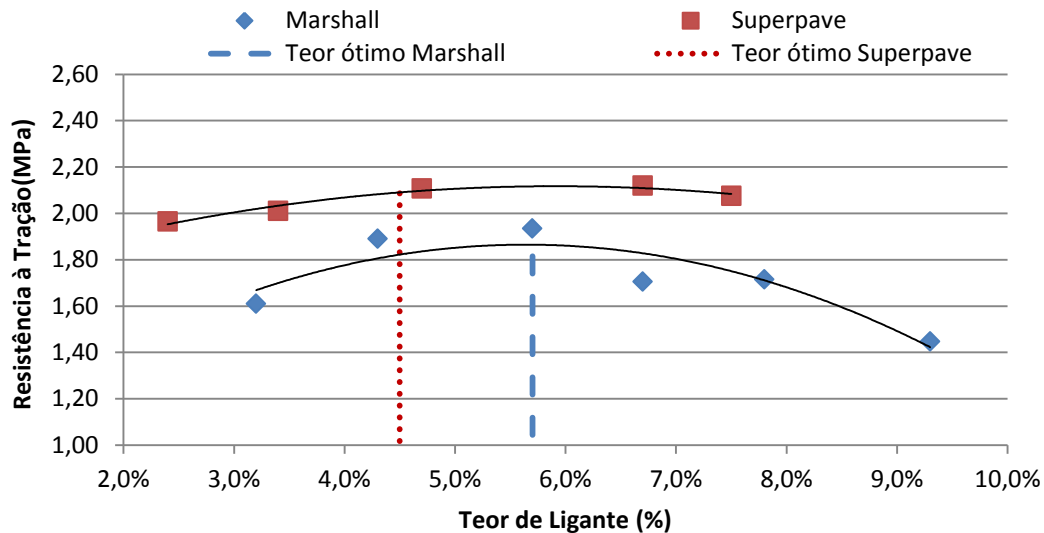


Figura 45 – RT vs Teor de Ligante (%) – SPV 19mm

Observa-se nas Tabelas 4 e 5 que os resultados dos corpos de prova da dosagem Marshall tiveram desempenho inferior àqueles da dosagem Superpave 6", mas isto se deve ao fato dos corpos de prova destes últimos terem sido broqueados, levando a um volume de vazios mais baixo em média, para os mesmos teores – Figura 46 (com teores de ligante no rótulo de dados). Além disso, a estrutura dos agregados é bastante distinta dos corpos-de-prova compactados por impacto (Marshall) que aqueles por amassamento (Superpave).

Para ilustração, enquanto o corpo de prova inteiro do Superpave apresenta volume de vazios da ordem de 4%, a parte central tem aproximadamente apenas 2%. A parcela de envoltória do corpo de prova extraído, ou seja a parte que ficou em contato com a base e com o topo do equipamento giratório e as partes que ficaram em contato com as paredes do cilindro possuem volume de vazios muito superior à parte central. Este resultado de gradientes de vazios, de maior na parte externa para menor na parte interna, são normalmente encontrados em corpos-de-prova desta natureza de compactação.

O compactador por rolagem é um equipamento recomendado pela equipe A-003A do Projeto SHRP, uma vez que este tipo de compactação geralmente produz corpos de prova cujos valores de deformação permanente encontram-se intermediários entre aqueles obtidos em corpos-de-prova pelo compactador giratório e pelo compactador de impacto

(Marshall); além disso, os resultados de deformação permanente estão dentro do mesmo *range* que obtido sem revestimentos compactados em pista (Sousa *et al*, 1993).

Os americanos têm adotado a estratégia de extração do corpo-de-prova moldado no compactador giratório (CP de 150mm) para então proceder aos ensaios de propriedades mecânicas: fixando o teor de projeto e extraíndo da parte central um CP de dimensões semelhantes ao do Marshall (diâmetro de 100mm e altura de 63,5mm). Há uma mesma hierarquia em valores de resistência e de módulo de resiliência, variando com os teores, caso se faça com os corpos de prova extraídos ou integrais, porém há uma defasagem entre os resultados.

A diferença principal reside que nos corpos-de-prova extraídos da parte central, há melhor homogeneidade e maior densificação. Os corpos-de-prova integrais compactados no equipamento giratório apresentam anisotropia. A forma mais apurada de determinação de propriedades mecânicas é fazer os testes com corpos-de-prova extraídos de campo, muito embora também haja um gradiente de grau de compactação, porém muito pequeno, podendo ser tomado por isotrópico.

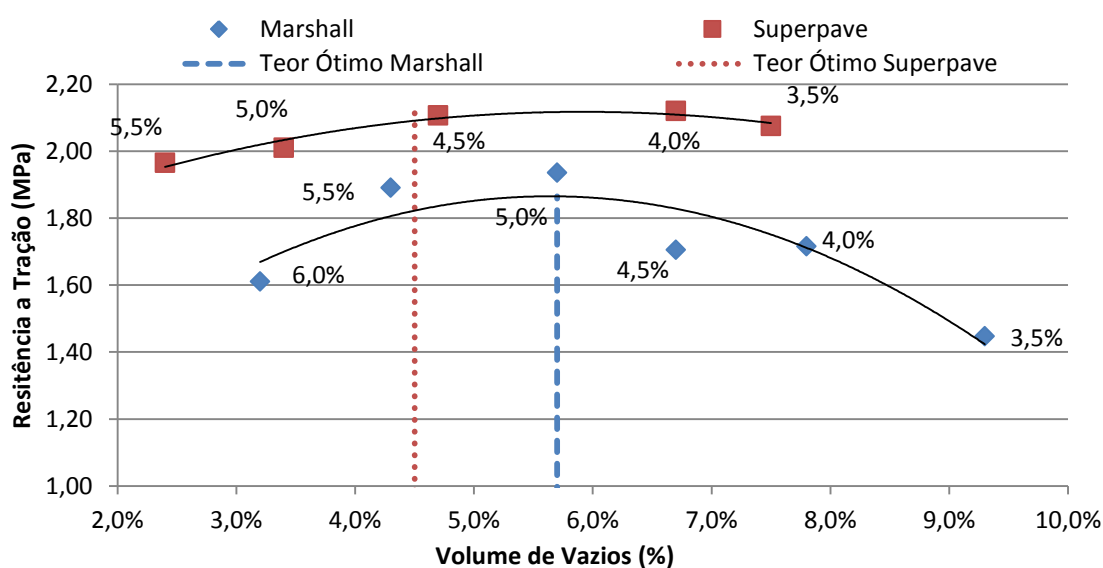


Figura 46 – RT vs Volume de Vazios (%) – SPV 19mm

Ensaio de Módulo de Resiliência – MR

O ensaio de Módulo de Resiliência – MR, também foi realizado na prensa MTS do LTP - EPUSP, a mesma utilizada no ensaio de RT, porém com outra configuração (Figura 47), conforme normas do DNIT, ABNT e ASTM.



Figura 47 – Ensaio de Módulo de Resiliência

Na Tabela 6 e Figura 48 são apresentados os resultados de Módulo de Resiliência (MR) nos teores de projeto da mistura asfáltica com distribuição granulométrica SPV 12,5mm.

Tabela 6 – Módulo de resiliência nos teores de projeto – SPV 12,5mm

	CP	MR (MPa)	Média (Mpa)
5,8% (Marshall)	119	3,87	3,92
	120	3,76	
	121	4,18	
	122	3,58	
	123	4,03	
	124	4,10	
4,6% (Superpave)	145	7,04	6,30
	146	6,25	
	147	5,53	
	148	6,39	

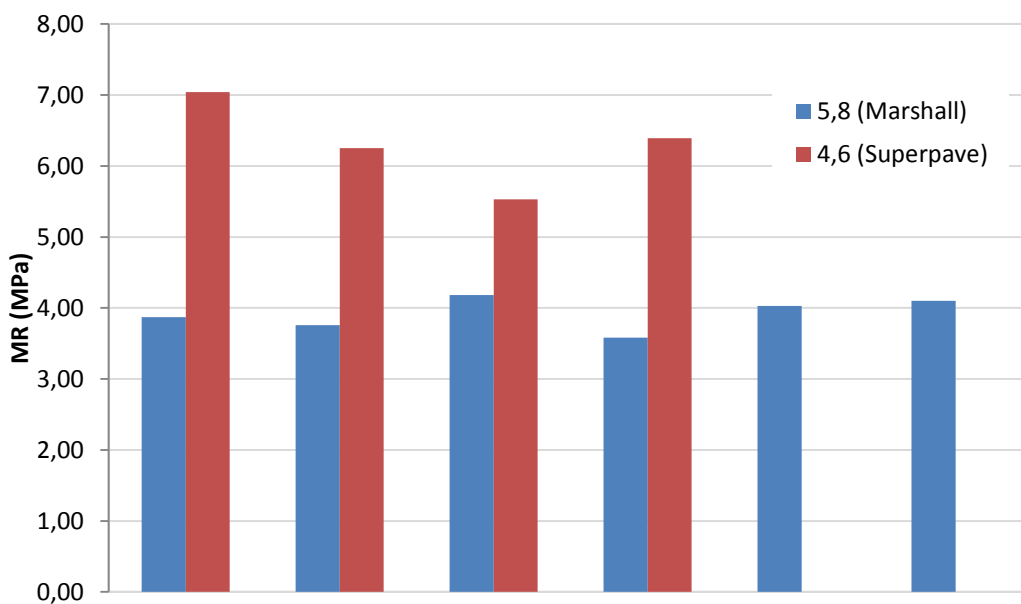


Figura 48 – Módulo de Resiliência nos teores de projeto – SPV 12,5mm

Podemos verificar que o comportamento das misturas com teor de projeto de 4,6% apresentaram valores mais elevados de MR, da mesma forma que ocorreu para o ensaio de RT, devido à diferença na estrutura interna dos dois grupos de amostras.

O centro de amostra cilíndricas moldadas em laboratório apresenta uma tendência de ter volume de vazios inferior às bordas. Esta diferença de vazios acarreta em uma maior compactação no centro da amostra. Como os corpos de prova Superpave foram broqueados para enquadrar nas dimensões de ensaio, esses apresentam um VV inferior aos 4% de projeto, levando ao aumento dos valores dos parâmetros de resistência à tração e módulo de resiliência.

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados de MR da mistura asfáltica com distribuição granulométrica SPV 19 mm, tanto para dosagem Marshall, quanto para dosagem Superpave.

Tabela 7 – Módulo de resiliência nos teores de projeto SPV 19 mm 6" broqueados

Teor de ligante (%)	Nº corpo de prova	Volume de vazios (%)	Média de VV (%)	Desvio Padrão VV (%)	MR (MPa)	Média	Desvio padrão
3,5	41	7,2	7,5	0,35	4329	5055	1026
3,5	42	7,7			5780		
4,0	43	6,5	6,7	0,21	6972	5760	1714
4,0	44	6,8			4548		
4,5	166	4,1	4,7	0,41	5756	5730	308
4,5	168	4,8			5392		
4,5	170	5,0			5639		
4,5	46	4,9			6131		
5,0	171	2,7	2,7	-	5725	5725	-
5,5	49	2,2	2,2	-	5120	5504	-

Tabela 8 – Módulo de resiliência nos teores de projeto SPV 19 mm Marshall

Teor de ligante (%)	Nº corpo de prova	Volume de vazios médio (%)	Média de VV (%)	Desvio Padrão VV (%)	MR (MPa)	Média MR (Mpa)	Desvio padrão MR
3,5	41	9,9	9,3	0,56	3.376	3.556	218,28
3,5	42	9,2			3.494		
3,5	43	8,8			3.799		
4,0	44	7,8	7,8	0,00	3.602	3.810	385,08
4,0	45	7,8			3.573		
4,0	46	7,8			4.254		
4,5	47	6,3	6,8	0,44	4.254	4.033	266,40
4,5	48	7,0			3.737		
4,5	49	7,1			4.107		
5,0	51	5,7	5,7	0,07	4.452	4.280	243,95
5,0	52	5,6			4.107		
5,5	53	4,9	4,3	0,53	3.932	4.005	267,51
5,5	54	3,9			4.301		
5,5	55	4,1			3.781		
6,0	62	3,6	3,2	0,40	3.761	4.008	474,77
6,0	63	2,8			4.555		

6,0	64	3,2			3.707		
-----	----	-----	--	--	-------	--	--

Da mesma forma que foi comentado anteriormente no ensaio de RT, devido ao fato de os corpos de prova Superpave terem sido broqueados, há uma tendência de desempenho inferior no caso dos corpos de prova daqueles compactados pelo método Marshall também no ensaio de módulo de resiliência.

As Figuras 49 e 50 mostram os resultados de Módulo de Resiliência em função do teor de ligante e do volume de vazios, respectivamente. Observe-se que há tendência de haver um valor máximo nos estados próximos aos teores de projeto, para ambas as condições de compactação. Na Figura 50 os valores no rótulo de dados são do teor de ligante de cada amostra.

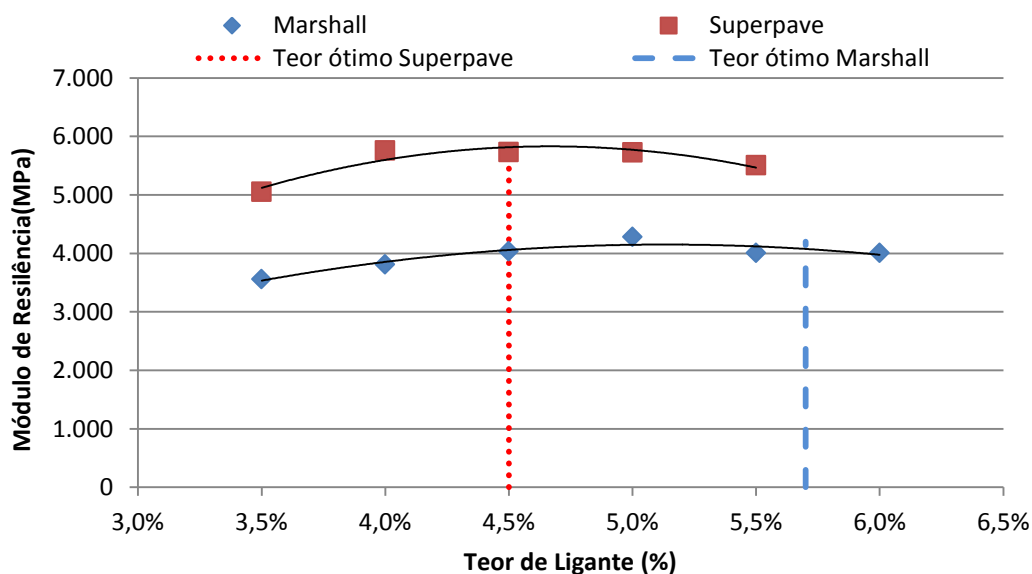


Figura 49 – Módulo de Resiliência vs Teor de Ligante – SPV 19mm

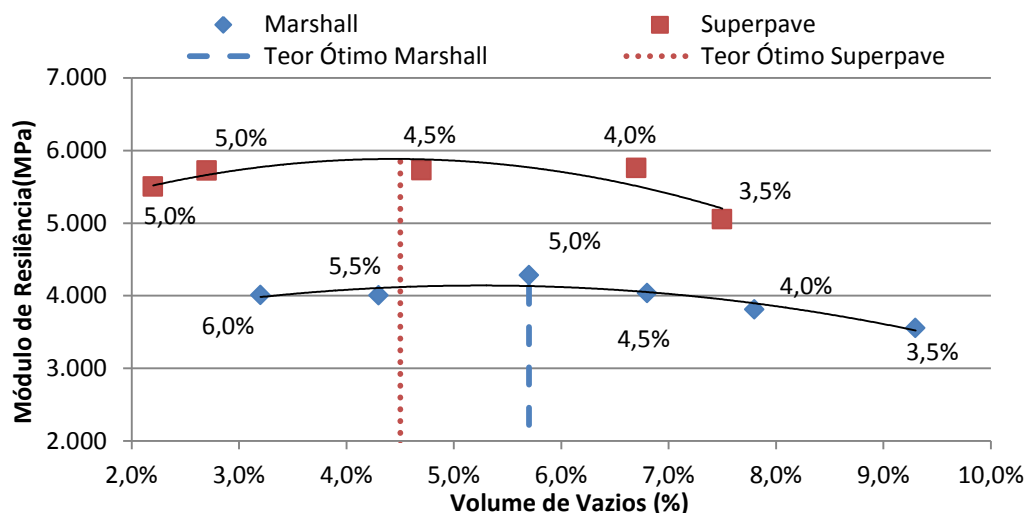


Figura 50 – Módulo de Resiliência vs Volume de Vazios – SPV 19mm

6.2.6. Deformação permanente das misturas SPV 12,5 mm e 19 mm

A deformação permanente é um ensaio que utiliza corpos de prova de dimensões retangulares e forma de compactação semelhante à de campo. Os agregados foram homogeneizados, já aquecidos à temperatura de projeto (Figura 51 – a), na misturadora do tipo pugmill do LTP-PTR-EPUSP, então foi adicionado o ligante asfáltico (Figura 51 – b) para preparação da mistura.



(a)



(b)

Figura 51 – (a) homogeneização dos agregados e (b) recipiente com o ligante asfáltico

Após usinagem e estabilização da temperatura das misturas, compactou-se um par de placas no teor de projeto estabelecido pelo Método Marshall, e outro par no teor de projeto

estabelecido pelo Método Superpave, para posterior simulação. As Figuras 52 e 53 mostram as etapas de preparação das placas.



Figura 52 – Colocação da mistura no compactador



Figura 53 – Detalhe da mistura durante a compactação

Após compactadas, as placas de 10 cm de espessura foram para o condicionamento, onde ficaram por 48hs até serem submetidas ao ensaio de deformação permanente. As placas foram aquecidas à 60°C e submetidas a 30000 ciclos de carregamento. As Figuras 54 e 55 mostram o par de placas com o teor de 4,6% e 5,8% da mistura SPV 12,5mm, respectivamente.



Figura 54 – Par de placas com teor de 4,6%



Figura 55 – Par de placas no teor de 5,8%

Os percentuais de deformação permanente médios dos dois pares de placa em cada um dos teores são apresentados na Figura 56. Observa-se que ambas apresentaram valores inferiores ao limite de 5,0% proposto pela especificação francesa em 30.000 ciclos para misturas asfálticas densas. Dessa forma, tanto o teor de projeto da dosagem Marshall, como o da dosagem Superpave, para a mistura SPV 12,5mm tiveram bom desempenho.

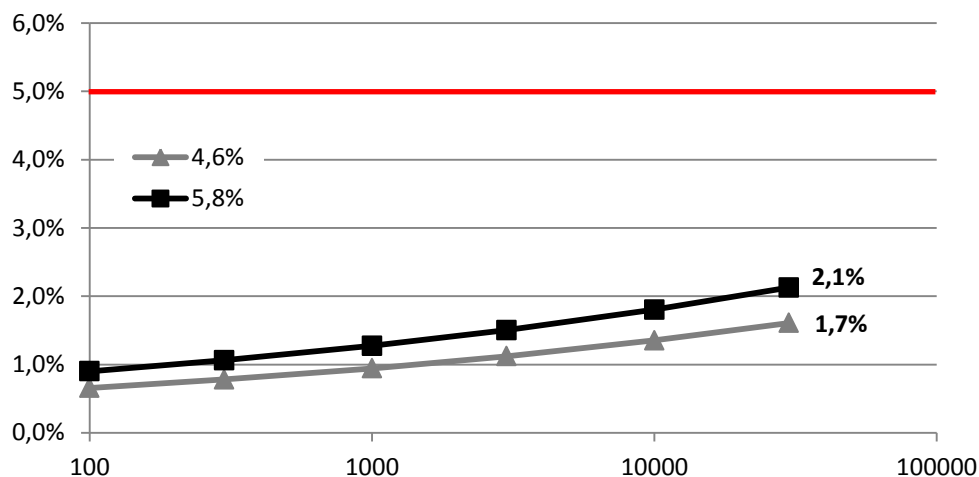


Figura 56 – Deformação permanente - SPV 12,5mm nos teores de projeto

Para a mistura SPV 19mm os percentuais de deformação permanente médios dos dois pares de placa para cada um dos teores (Marshall e Superpave) são apresentados na Figura 57. Observa-se novamente que os resultados em ambos teores apresentaram valores inferiores ao limite de 5,0% proposto pela especificação francesa em 30.000 ciclos.

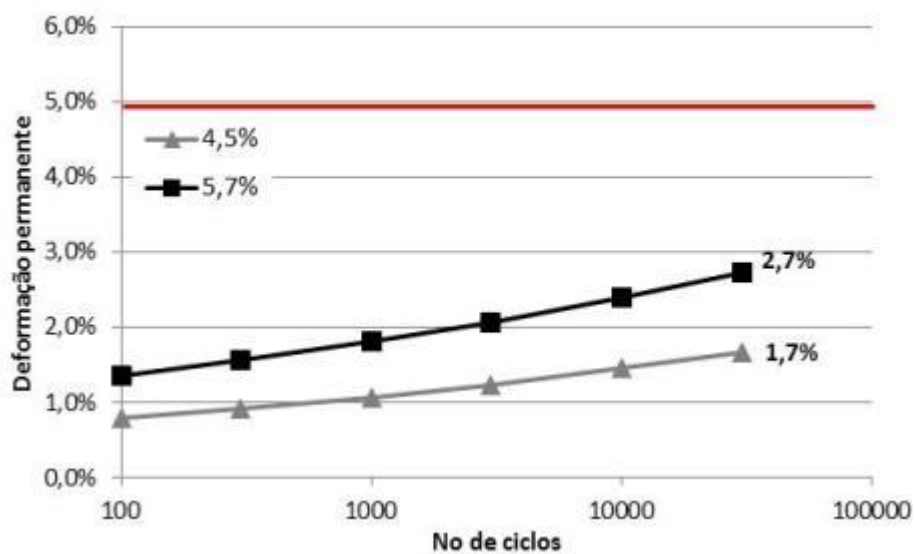


Figura 57 – Deformação permanente - SPV 19 mm nos teores de projeto

7. ANÁLISE DAS MISTURAS POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento digital de imagens (PDI) é uma técnica empregada em diversas áreas, talvez a medicina diagnóstica esteja entre as áreas que a utilizam que se encontra mais avançada. A medicina utiliza o processamento digital de imagens para avaliar lesões e doenças em diversas áreas do corpo humano (raio X, tomografia computadorizada, ultrassonografia, etc).

De um modo geral, a processamento digital de imagem consiste em: (i) capturar a imagem de um objeto por meio de uma câmera fotográfica, ou outros meios como raios X e Ultrassom, (ii) importa-la para um computador, que através de softwares a processa e analisa por meio de algoritmos matemáticos. Os softwares usados nessas análises tem a função de realçar as diferenças nas nuances de cores e identificar contornos do interesse do pesquisador.

Os programas podem ainda, com a identificação do contorno dos objetos, classifica-los por dimensão, forma, e ainda sua orientação e distribuição dentro da imagem. Esta técnica tem sido estudada e empregada na área da pavimentação por diversos pesquisadores como mostra a Figura 58, onde Massad e Button (2007) apresentam um fluxograma com os passos básicos para o processamento digital de imagens.

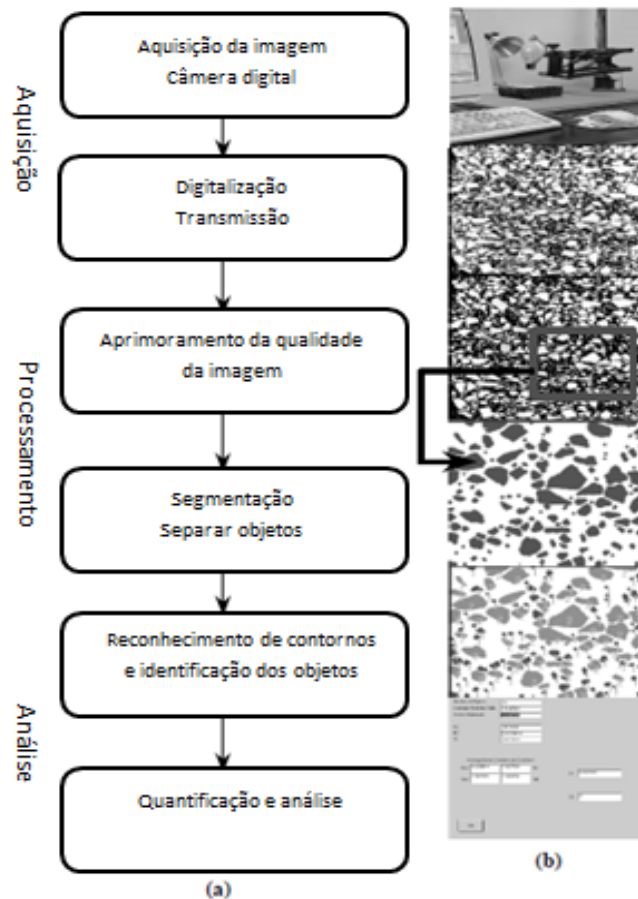


Figura 58 – Fluxograma - etapas da técnica de análise (Adaptado de Massad e Button, 2007)

O objetivo proposto pela pesquisa é buscar uma técnica e software que propicie análises confiáveis da distribuição e orientação de agregados no interior da amostra. Com isso poderão ser avaliados os diferentes equipamentos de compactação. A técnica poderá ainda ser utilizada para avaliar as placas antes e após o ensaio no simulador de tráfego, a fim de melhor compreender como se deu a deformação na placa.

Inicialmente, foram avaliados os softwares existentes de uso gratuito (ImageJ e ImageTool) e softwares pagos (Matlab, Mathematica), a fim de escolher um que seja prático e confiável. A mesma foi realizada com imagens adquiridas por câmeras digitais da biblioteca de placas do LTP, a fim de comparar os resultados obtidos através dos diferentes softwares (avaliando o grau de precisão e as possíveis deficiências).

O programa escolhido para utilização foi o ImageJ. Este é um software livre, de código aberto, amplamente utilizado na área da saúde, para análise detalhada de imagens bi e tridimensionais na área médica, podendo realizar inclusive análise de imagens microscópicas.

Nesta pesquisa escolheu-se utilizar o FIJI, uma versão de mais fácil acesso e manipulação, além de ser mais completa que o ImageJ. Esta versão tem mais ferramentas de análise e é mais robusta. Nos estudos iniciais de imagem, adotou-se a mistura SPV 12,5 com ligante asfáltico modificado com polímero SBS de classificação 60/85.

Para realizar o PDI, é necessário que as placas de misturas asfálticas usinadas em laboratório sejam cortadas, subdividindo-a em amostras para poder avaliar a homogeneidade da distribuição de agregados. Os cortes nas placas com 500 mm de comprimento e 180 mm de largura estão mostrados no esquema da Figura 59, onde pode ser vista uma placa compactada, vista superior, e Figura 60 onde mostra a placa cortada em perspectiva.

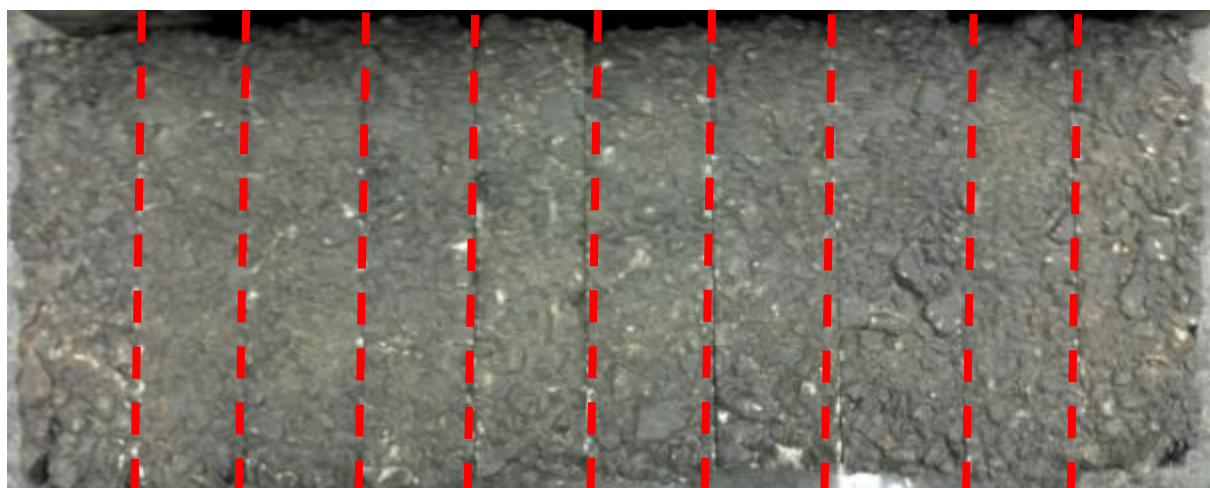


Figura 59 – Esquema de corte transversais em placas de misturas asfálticas



Figura 60 – Placa cortada em perspectiva

Deste modo, os 9 cortes da placa permitem a análise do PDI em 10 amostras geradas, que correspondem a 18 faces, com a largura de 180mm e a espessura de 100mm, para processamento, sendo duas faces por amostra gerada, exceto nas extremidades, uma vez que a placa encontra-se nas extremidades encostada no molde metálico e esta não é considerada. A placa cortada em 10 amostras é mostrada na Figura 61.

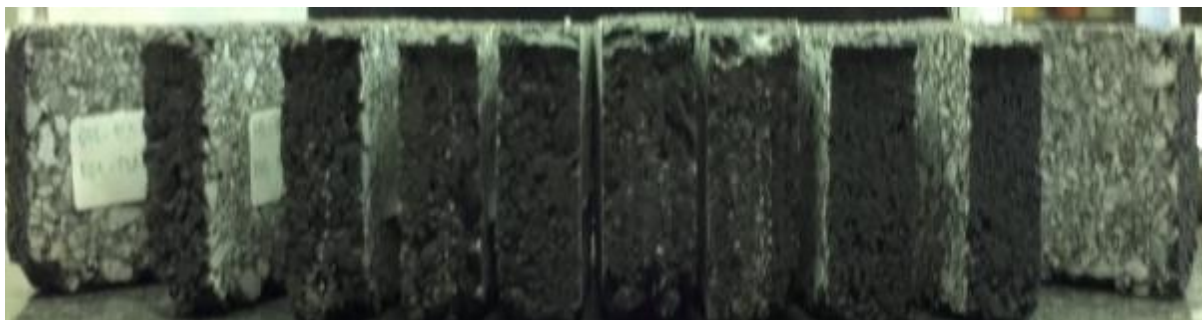
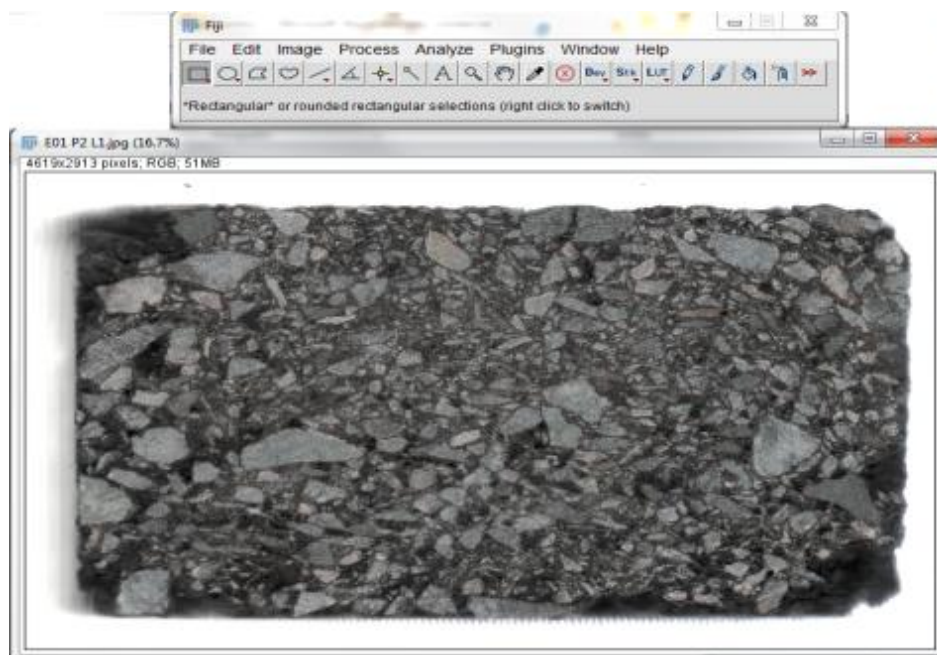


Figura 61 – Placa de mistura asfáltica compactada e cortada em 10 amostras

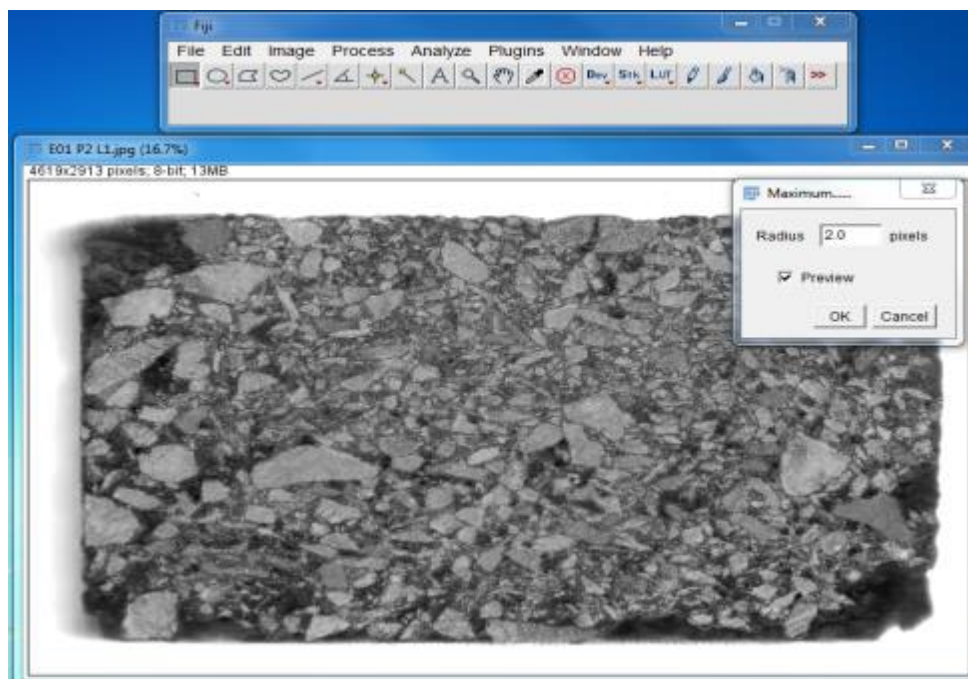
A partir dos cortes efetuados, todas as faces geradas são varridas em um scanner de mesa com resolução de 600 dpi, resultando em 18 imagens por placa (uma para cada face). Estas imagens são então salvas e processadas no *FIJI/ImageJ*. A vantagem de utilizar um scanner, ao invés de uma câmera fotográfica, é que o primeiro sempre terá a mesma escala, independentemente da imagem, pois a resolução é dada por “pontos por polegada” (Dots Per Inch - dpi). Assim, elimina-se a necessidade de se acrescentar uma escala, bem como o

erro que o operador pode cometer ao utilizar uma câmera fotográfica sem atentar para a distância focal. Para realizar uma análise satisfatória das imagens é necessário que sejam seguidas as etapas I, II e III (Figuras 62 a 64).



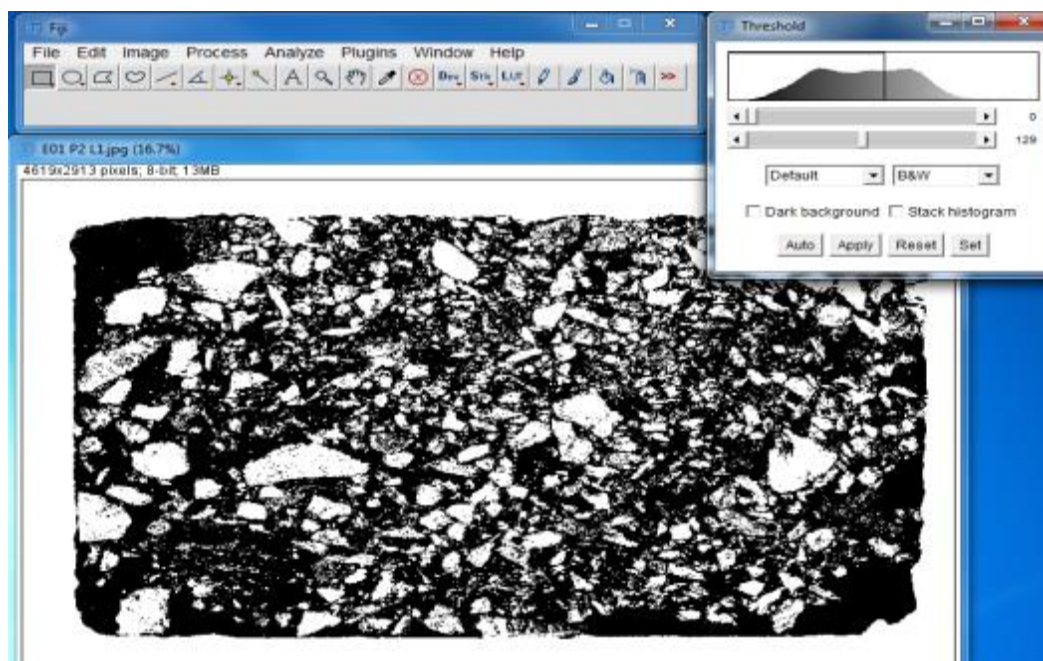
Interface do ImageJ

Imagem capturada com scanner, sem tratamento, imagem em RGB

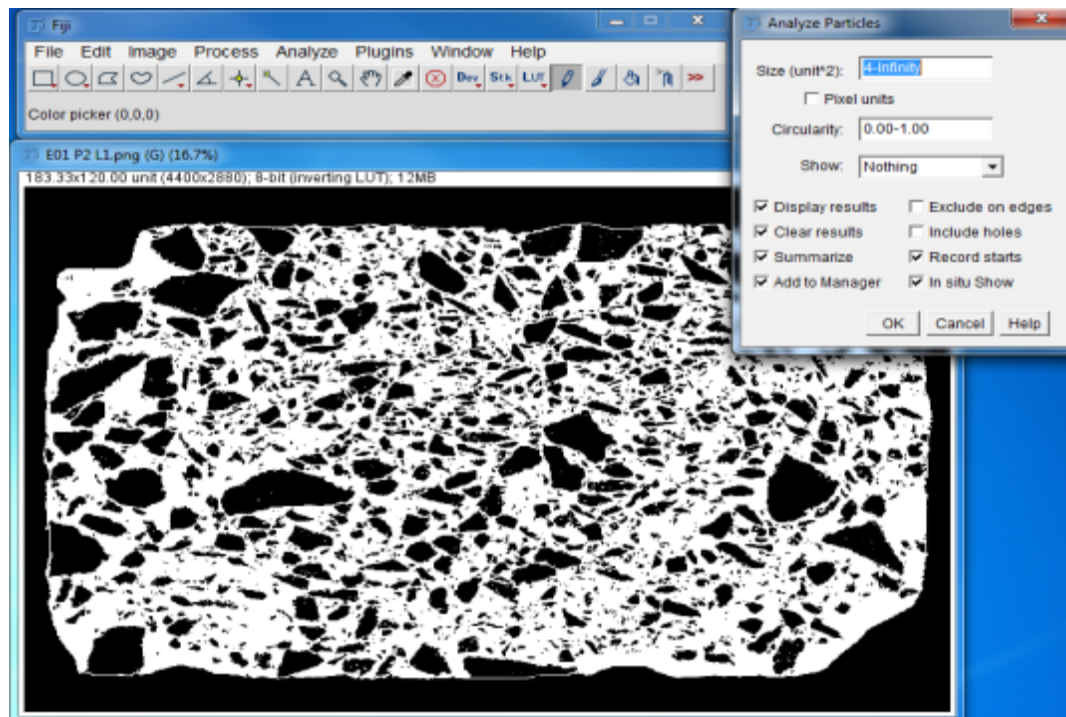


Filtagens necessárias para realce de diferenças em imagem 8 bit

Figura 62 – Etapa I do PDI

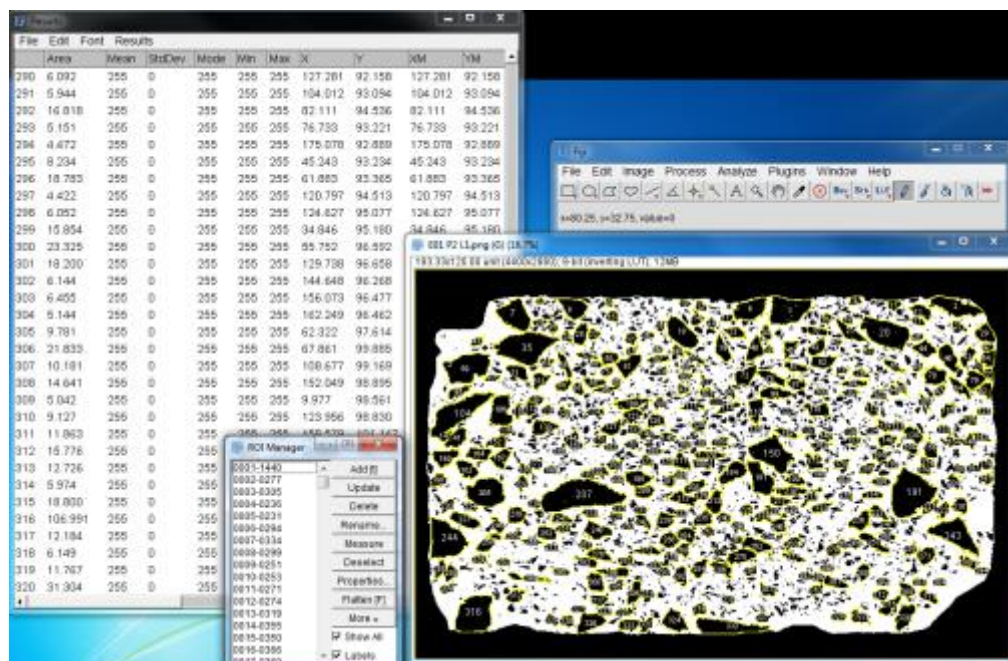


Aplicação do *threshold* (conversão em imagem binária)

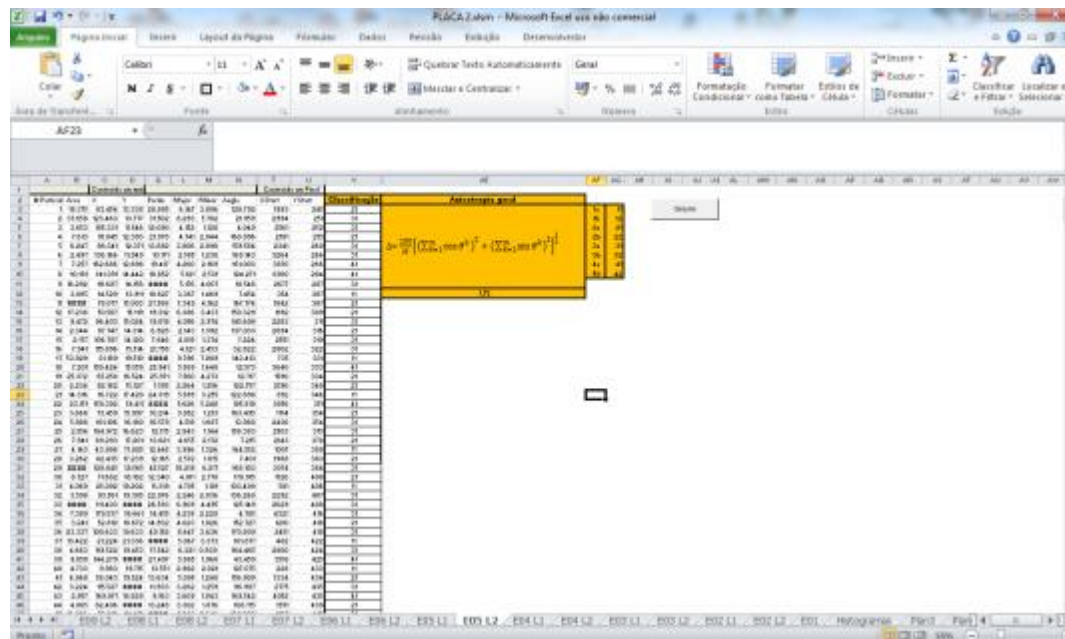


Ferramenta de análise de partículas dentro de escala

Figura 63 – Etapa II do PDI



Interface de resultados
 Dados medidos e exportáveis em Excel/
 Imagem com contagem de partículas em contorno amarelo



Interface desenvolvida com macros para Excel

Figura 64 – Etapa III do PDI

Como se pode observar, é necessário converter a imagem RGB colorida (*Red, Green, Blue*) para 8 bits (escala de cinza) para que, então, se iniciem os processos de filtragem. Tal filtragem é utilizada de forma a realçar diferenças de cor dentro da escala de tons de cinza, sendo que esta diferença de tons é o que ajudará a determinar o que são agregados e o que é o mástico (asfalto + fíler e alguns agregados miúdos) dentro da mistura asfáltica.

Posteriormente, para a aplicação de filtros é necessário converter a imagem para binária (imagem preto e branco – P&B), sendo que esta conversão é realizada com a ferramenta de *Threshold* (identificador de limiar). Com a imagem P&B (binária), pode-se realizar a análise de partículas, onde esta requer que o usuário determine um tamanho mínimo de partícula de interesse, bem como um tamanho máximo (em área).

Como se pode ver, é realizada a contagem de agregados e a mensuração de suas dimensões, e a saída de dados do programa fornece uma planilha com as principais propriedades de interesse dos agregados (dimensões, posição do seu centro de massa, área, perímetro) e ainda mostra, na imagem, cada agregado medido com a identificação deles.

Em seguida, esta planilha de dados é exportada ao Excel, onde a partir do desenvolvimento de uma macro, que por sua vez permite que o programa realize todos os cálculos requeridos para a classificação de peneiras, identifique a posição de cada partícula de acordo com as áreas de interesse preestabelecidas e o calcule a **anisotropia**.

Como pode ser visto na Figura 65, as áreas de interesse foram escolhidas buscando identificar se há diferença de compactação das bordas (numeradas como 1 e 4), centro (numerado como 2 e 3) e da parte superior(A) da placa para a parte inferior(B).

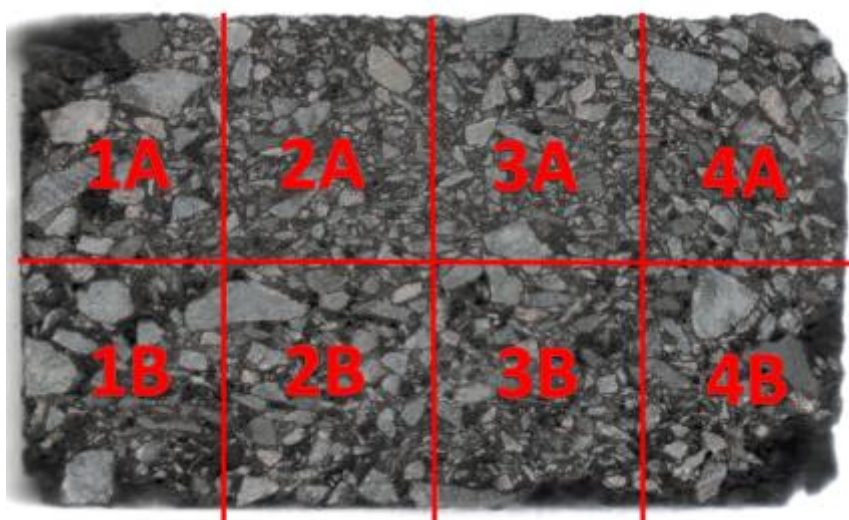


Figura 65 – Representação das áreas de interesse em cada face de corte das placas

O PDI permite que realize uma série de cálculos com os dados obtidos, sendo que um dos cálculos mais relevantes para as misturas asfálticas é a anisotropia.

A **isotropia** é a propriedade de um material apresentar as mesmas propriedades em todas as direções geométricas. A anisotropia identifica se um material (no caso, os agregados) tem uma orientação predominante (se ficam “deitados”, ou não para os mais lamelares) dentro de outro material (mastique). Sendo assim, se há uma orientação predominante, sabe-se que as características mecânicas serão influenciadas negativamente (Massad e Button, 2004). Outra importância desta avaliação é compreender se houve segregação de agregados em algum local por problemas da mistura, temperatura ou das condições de compactação, e se a distribuição de agregados se dá de maneira homogênea

na massa, o que é o desejável. Com isso pode-se avaliar o processo de compactação de forma quantitativa e pode-se utilizar deste processo para comparar dois equipamentos iguais ou dois equipamentos com diferenças de características.

Com isso em mente, Oda e Nakayama (1989) buscaram uma forma matemática de calcular a anisotropia de um material (que no caso destes autores era de solos). Tal equação para cálculo da anisotropia é apresentada como Equação 04.

Equação 04:

$$\Delta = \frac{1}{M} \left[\left(\sum_{k=1}^m \cos \theta^k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^m \sin \theta^k \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde:

Δ = Vetor Magnitude (anisotropia do material);

M= Número de agregados;

θ = Orientação de um agregado individual, variando de -90° à $+90^\circ$;

A orientação de um agregado está representada na Figura 66.

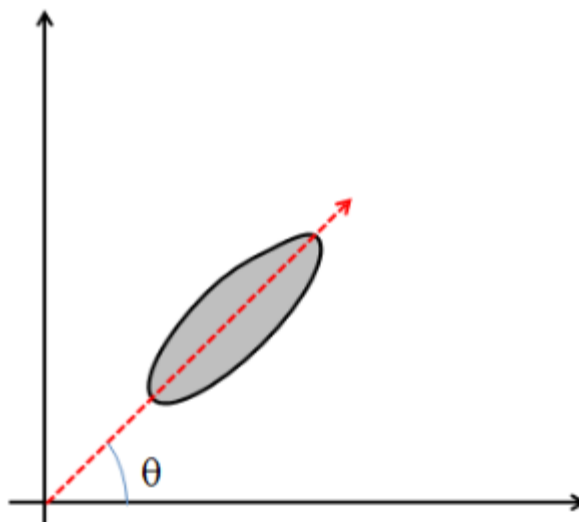


Figura 66 – Orientação angular de uma partícula

A anisotropia de um material pode variar de 0 a 100%, sendo, de acordo com Massad e Button (2004), $\Delta = 0\%$ equivalente a uma distribuição de partículas completamente **randômica** (que é o desejável), e $\Delta = 100\%$ uma distribuição extremamente orientada (com direção predominante, que é indesejável).

Todos os resultados de PDI obtidos nesse estudo, nas mesas compactadoras do LTP – EPUSP e na do CDT-Arteris estão apresentados no ANEXO 1.

A técnica do PDI desenvolvida nesse estudo serviu para comparar a estrutura interna das misturas compactadas nos equipamentos do LTP – EPUSP e CDT – Arteris. Os resultados mostraram que não houve diferenças significativas para as amostras analisadas. Contribuindo para que futuramente essa metodologia possa ser utilizada como ferramenta de análise em outros tipos de misturas asfálticas, foi elaborado um procedimento que se encontra apresentado no ANEXO 2.

8. EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS E AFERIÇÃO

Nos itens a seguir serão descritos detalhes dos equipamentos desenvolvidos nesse estudo, entretanto para a realização da aferição do compactador e do equipamento de módulo de resiliência, fez-se necessário definir o projeto de mistura asfáltica utilizada.

No projeto da mistura foram utilizadas amostras de agregados em graduações de brita tipo 1, pedrisco, pó de pedra e cal hidratada para definição de composição granulométrica (Figura 67), estudo das massas específicas e confecção do projeto pela metodologia Marshall de compactação, para definição de misturas alvo a atender 4% de volume de vazios.

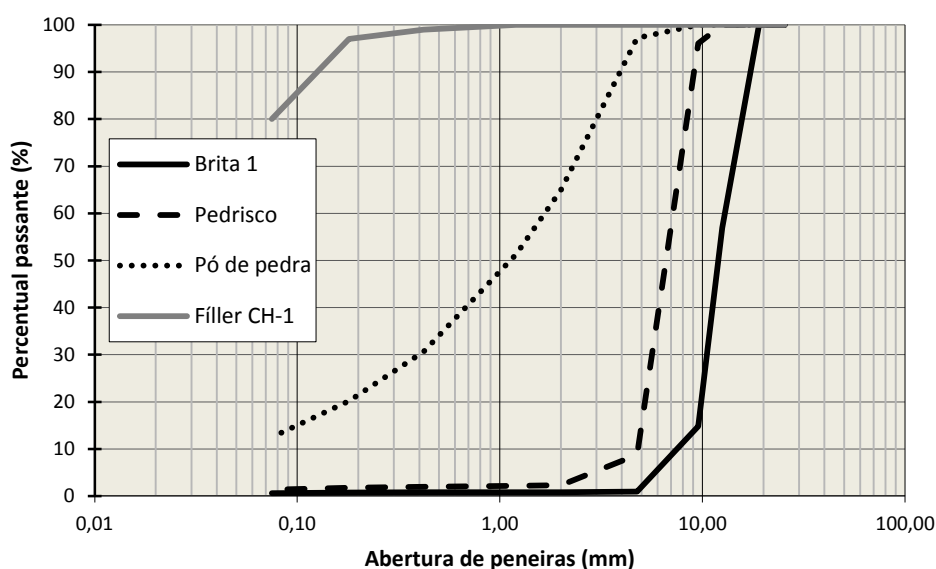


Figura 67 – Granulometria dos materiais para estudo

A faixa a ser atendida depende do diâmetro máximo nominal (DMN) do agregado, que ficou acima de 10% em peso retido na peneira de 12,5 mm, portanto procurou-se trabalhar com a faixa 2 SPV 12,5 mm. Essa mistura descreve segundo a linha de densificação máxima, a frações grosseiras, passando pela zona de restrição e os pontos de controle. As Figura 68 e 69 apresentam a curva granulométrica da composição, bem como a linha de densidade máxima para o referido projeto com os pontos de controle e zona de restrição segundo a metodologia Superpave.

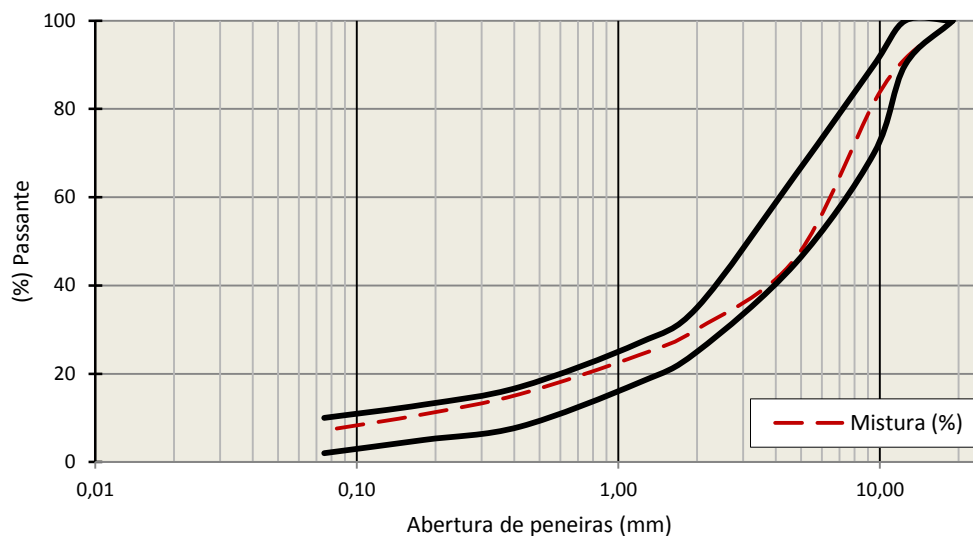


Figura 68 – Distribuição granulométrica do projeto de mistura

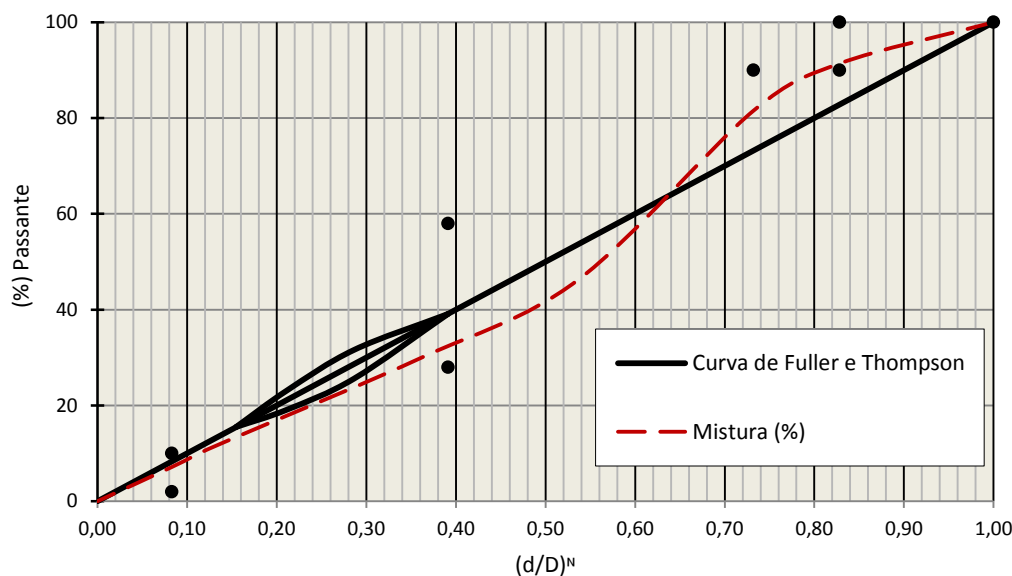


Figura 69 – Linha de densidade máxima para o projeto de mistura

Produziram-se três projetos com a mesma curva granulométrica, variando-se apenas o tipo de cimento asfáltico de petróleo (CAP) para sua aglomeração, utilizando os CAPs 30/45, 50/70 e 60/85 (Modificado com SBS). A partir dos projetos com os CAPs 30/45 e 60/85 (Modificado com SBS) foram compactados corpos de prova Marshall no teor de projeto para estudo de aferição do equipamento de módulo de resiliência. Já no estudo de aferição do processo de rolagem do compactador liso, foram utilizados os três projetos supracitados. Na Figura 70, é possível visualizar o teor de projeto definido para as três misturas com variação de CAP.

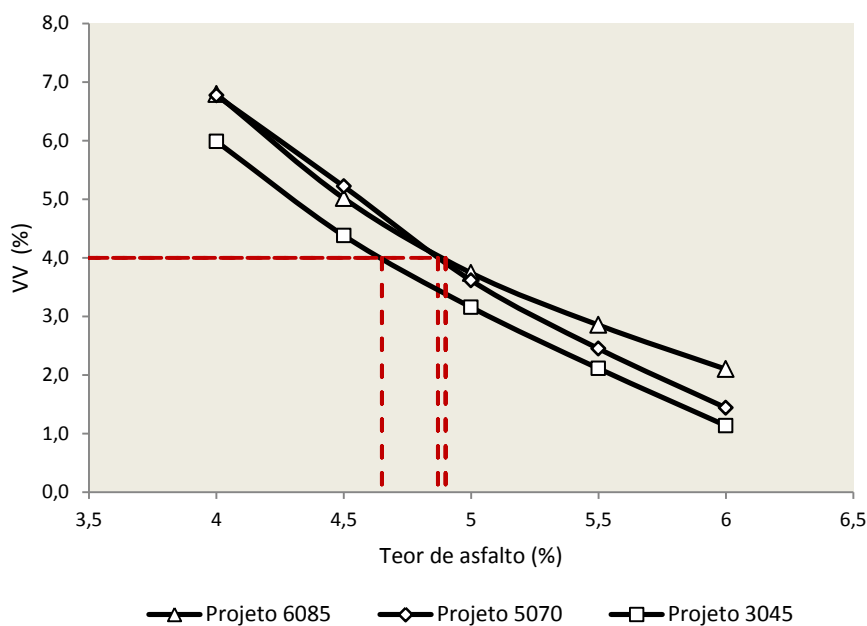


Figura 70 – Teores de projeto para misturas com variação de CAP

8.1. MISTURADORA

A misturadora desenvolvida é munida de aletas espargidoras que promovem a homogeneização da mistura e o entrosamento da matriz pétrea com o concreto asfáltico adicionado conforme teor de projeto. A misturadora possui uma capacidade máxima de trabalho tanto de frequência, quanto de massa de material a ser produzido de 60 Hz e 30 quilos. Na Figura 71 é possível visualizar o detalhe do processo mencionado, mostrando que o equipamento desenvolvido atende a todos os requisitos para o qual foi projetado.



Figura 71 – Detalhe da misturadora e usinagem da mistura

Os detalhes da misturadora desenvolvida para o CDT – Arteris são mostrados no projeto apresentado no ANEXO 3 deste relatório.

8.2. MESA COMPACTADORA E SIMULADOR DE TRÁFEGO

8.2.1. Mesa compactadora

O equipamento compactador de misturas asfálticas do CDT - Arteris visa proporcionar uma forma de compactação semelhante à de campo. Serão produzidas nesse equipamento placas de mistura asfáltica por meio de amassamento por rolagem de forma semelhante ao equipamento francês do LTP. As placas serão compactadas dentro de um molde metálico que estará acoplado a um carrinho (Figura 72).

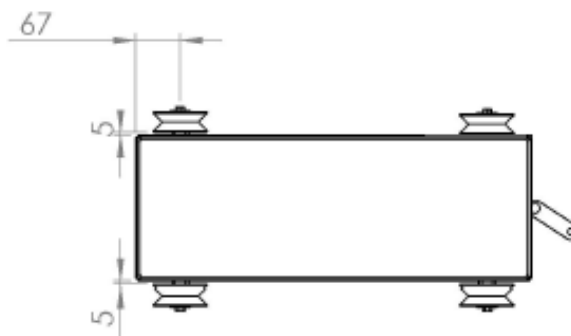


Figura 72 – Carrinho em detalhe

A Figura 73 ilustra a ideia inicial do equipamento. O carrinho (Figura 73 indicação A) promove um deslocamento de vai e vem sobre um jogo de trilhos, que é conectado ao motor por meio de uma correia, acoplada a uma engrenagem. O pneu (Figura 73 indicação B) de compactação fica fixo, aplicando um carregamento suficiente para realizar a compressão da mistura asfáltica por meio de uma alavanca (Figura 73 indicação C) de peso morto. Todo o conjunto de peças é sustentado por uma mesa metálica.

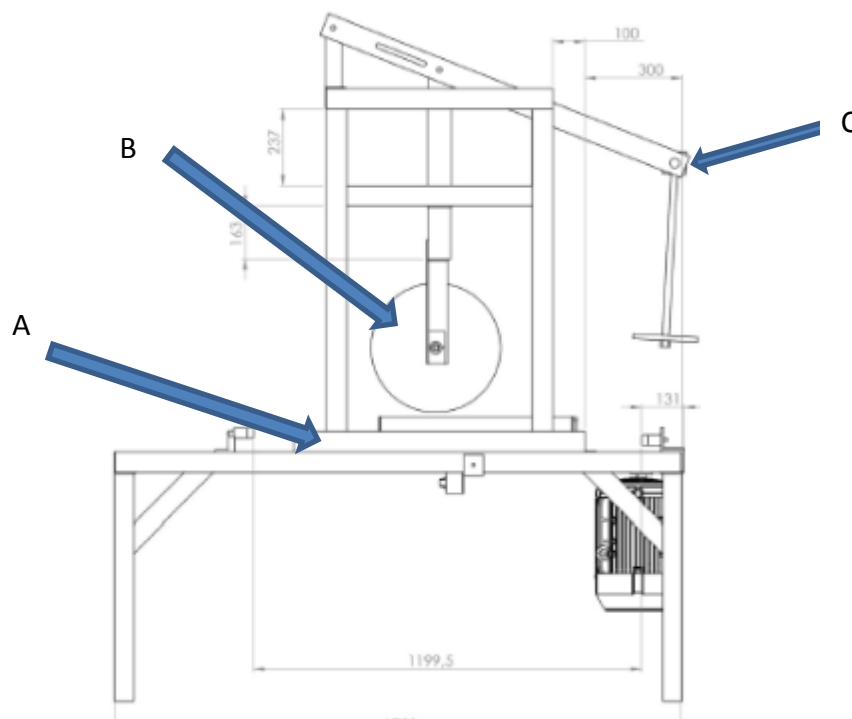


Figura 73 – Disposição das peças em vista lateral

A Figura 74 apresenta em perspectiva o equipamento de compactação idealizado inicialmente, com todas as suas partes constituintes.

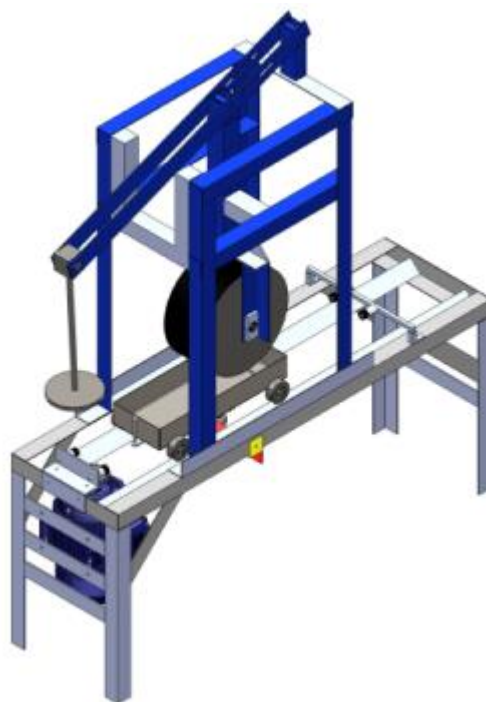


Figura 74 – Compactador em perspectiva

As placas compactadas no compactador do CDT foram comparadas com as placas moldadas no LTP, não somente por parâmetros volumétricos (volume de vazios), mas também por ensaios mecânicos e por análise por meio de processamento digital de imagens. Esta última ferramenta permite identificar a distribuição e orientação dos agregados após compactação, e ainda promove ajustes precisos da mesa compactadora.

Como o objetivo é que em um único equipamento seja possível realizar a compactação e posterior simulação, o desenvolvimento é mais complexo, e fez-se necessário a construção de um protótipo do equipamento feito pelo CDT - ARTERIS em conjunto com o LTP – EPUSP, todos os detalhes de projeto do mesmo são mostrados no ANEXO 4 . A Figura 75 mostra a montagem do mesmo no CDT. Observa-se que o equipamento está de acordo com o projetado.



Figura 75 – Foto do protótipo de CS-CDT em fase de montagem

Após testes realizados com o protótipo para verificação e avaliação, o equipamento projetado para a compactação de amostras asfálticas por rolagem passou por alterações estruturais em virtude de deficiências verificadas ao longo da realização do processo de compactação.

A estrutura do equipamento não se mostrou suficientemente robusta, resultando na ocorrência de vibrações importantes quando da aplicação de carga. O procedimento de compactação não estava produzindo amostras com características uniformes de densificação e de distribuição dos agregados ao longo da placa.

Além disso, o molde que contém a amostra também apresentava relativa fragilidade, restringindo a aplicação de diferentes velocidade nos ciclos de aplicação de carga, o que implica em maior dificuldade para compactação, tendo em vista a perda de temperatura da mistura asfáltica, que diminui a viscosidade do ligante asfáltico e não permite que sejam alcançados os níveis de densificação esperados.

A comparação com placas moldadas no equipamento francês de compactação mostrou importantes diferenças nas distribuições internas dos agregados, característica esta que pôde ser verificada visualmente, sendo ratificada pela quantificação realizada pelo processamento digital de imagens, que apontou não apenas as diferenças entre as placas moldadas em ambos os equipamentos, como também as diferenças em seções distintas de uma mesma amostra compactada com o equipamento desenvolvido nesta pesquisa.

O equipamento, com estrutura robusta, capaz de limitar vibrações importantes é apresentado na Figura 76. Observa-se que o braço de alavanca que impõe o carregamento foi alterado completamente, aumentando o controle sobre a carga aplicada.



Figura 76 – Equipamento reestruturado para compactação por rolagem

O molde que acondiciona a amostra também recebeu reforço estrutural, com sistema de rodas mais eficiente (Figura 77 - a) suficientemente capaz de manter o sistema no trilho, mesmo com a aplicação de cargas maiores. O equipamento recebeu ainda, alguns dispositivos de segurança, como trava do braço de alavanca (Figura 77 – b) e sistema refinado de controle do motor.



(a)



(b)

Figura 77 – Sistema de suporte e direção do molde (a) e braço de alavanca (b)

Os ensaios realizados com o equipamento reestruturado mostraram que as amostras foram melhor compactadas, sem variações ao longo da placa (Figura 78).

Iniciou-se um processo de aferição, por meio da definição de número de passadas e de carga aplicada para as diferentes misturas avaliadas. Os resultados da avaliação da distribuição interna por processamento digital de imagens (PDI) está apresentado no ANEXO 1.



Figura 78 – Aspecto da mistura asfáltica compactada no equipamento reestruturado

Após extensiva revisão bibliográfica e avaliação dos modelos existentes, a mesa compactadora do CDT-Arteris foi desenvolvida com o intuito de obter placas de misturas asfálticas com diversas dimensões (altura), alcançar diferentes níveis de compactação (volume de vazios), preferencialmente mais próximos aos de campo, comparativamente a outras mesas compactadoras e, por fim, permitir que os ensaios de simulação sejam realizados no mesmo equipamento.

Para que a mesa compactadora pudesse atingir todos os objetivos descritos, esta teve seu projeto executivo (ANEXO 5) concebido de tal forma que apresentasse flexibilidade nos dispositivos, demarcados por letras que correspondem aos princípios, conforme mostrado na Figura 79. Os itens identificados em ordem alfabética são apresentados em detalhe de projeto e a imagem real, com a explicação conveniente na Tabela 9.

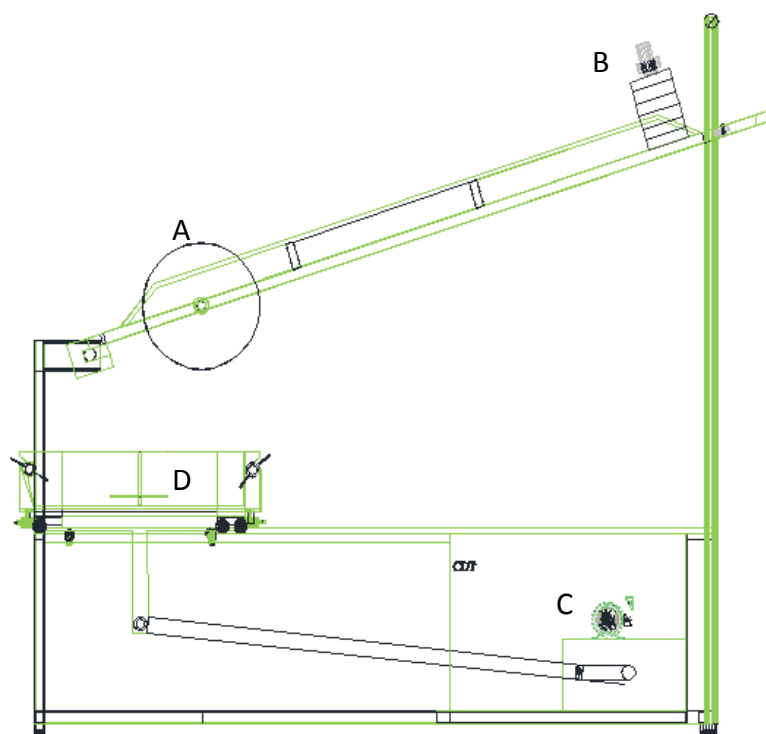
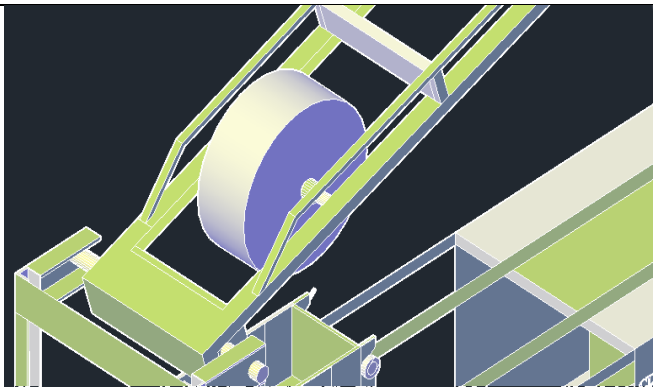
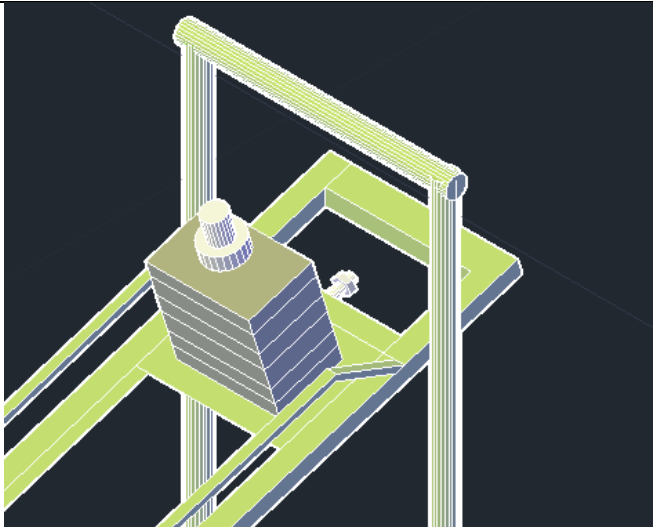
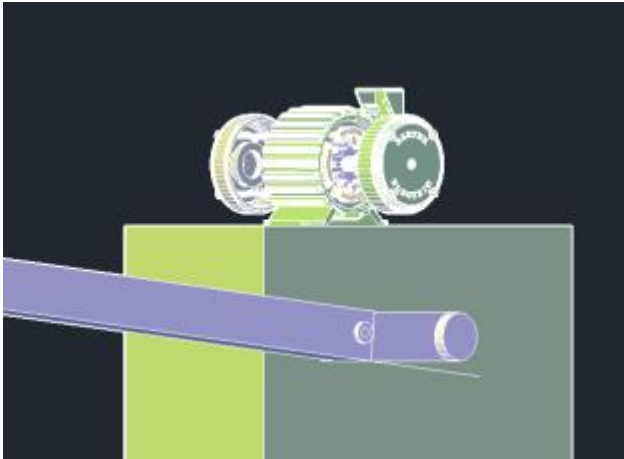
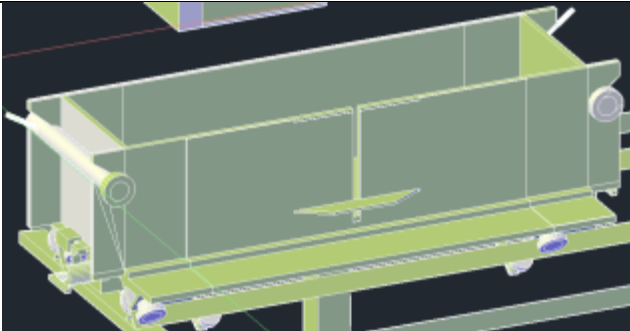


Figura 79 – Mesa Compactadora em detalhe (A – roda de aço; B – contra-peso; C – motor; e D - molde de placas

Tabela 9 – Tabela com identificação dos itens de interesse do projeto com detalhamento da mesa compactadora

Identificação	Projeto	Mesa Compactadora
Item A – Roda de aço		
Item B – Contra Peso		

Item C – Motor		
Identificação	Projeto	Mesa Compactadora
Item D – Molde de placas		

Cada item do equipamento apresenta características necessárias para que os resultados sejam alcançados. A mesa como um todo deve atender a características estruturais e peculiaridades de procedimentos, como movimentação cíclica, para que a mistura seja compactada de forma homogênea e que apresente um resultado próximo ao de campo.

Na Figura 80, tem-se outro detalhe da roda de aço. Esta deve possuir aproximadamente a mesma dimensão do molde de placas, porém não deve sofrer atrito com as bordas do molde.



Figura 80 – Detalhe de encaixe da roda de aço no molde

A roda metálica foi construída para que tivesse perfeita textura e acabamento, com o objetivo que ela não gere imperfeições na amostra. Ela deve ser aquecida ou ainda aplicar óleo vegetal em sua superfície de forma análoga à de campo, para que a mistura asfáltica não adere ao aço da roda.

O item B do esquema da Figura 79 apresenta o contra peso necessário para que a roda de aço atinja o carregamento necessário para compactação. Este contra peso é feito com um braço de alavanca, Figura 81, que multiplica os halteres colocados em sua extremidade. Este braço de alavanca tem um ajuste como mostrado na Figura 82. Para aferição, a roda foi instrumentada de forma que pudesse ser avaliada a carga real sob ela.



Figura 81 – Braço de alavanca



Figura 82 – Detalhe de ajuste do braço de alavanca

O item C do esquema da Figura 79 apresenta o motor da mesa compactadora. O motor tem suas características projetadas de forma que ele apresente as especificações mínimas que faça atingir a velocidade cíclica necessária com o carregamento imposto.

Visto que nem sempre serão executados corpos de prova de 10cm de espessura, como é um dos dois padrões da compactadora tipo LCPC francesa, há a necessidade de ampliar o escopo da técnica para maior variabilidade de espessuras de placas de prova. Para tanto, o molde identificado como Item D no esquema da Figura 79, foi projetado para que seja possível com um único molde, ser possível moldar placas na espessura (altura) desejada.

Na Figura 83 apresentado o detalhe (em vermelho) do entalhe para que isso seja alcançado. Por meio deste dispositivo é possível regular a espessura desejada.



Figura 83 – Entalhe para ajuste de altura em detalhe vermelho

O molde tem a facilidade de ser desmontável em todas suas paredes laterais como pode ser visto na Figura 84. Isso permite uma fácil limpeza do molde e, como característica mais relevante, o desmolde de placas passa a ser extremamente facilitado. Como mostrado na Figura 85, apenas uma das paredes encontra-se aberta para mostrar sua flexibilidade de desmontagem, e na Figura 86 o molde apresenta-se completamente aberto.



Figura 84 – Encaixe de desmonte de paredes do molde



Figura 85 – Parede lateral do molde aberta

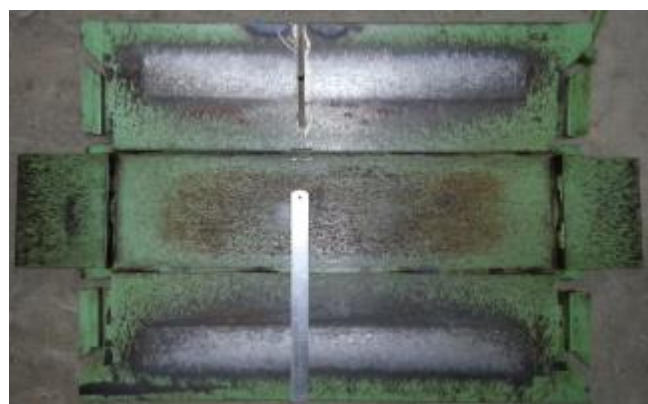


Figura 86 – Molde com todas as paredes abertas

A Figura 87 apresenta o detalhe do encaixe rápido do carrinho na mesa compactadora, o que permite que um operador consiga sozinho realizar o encaixe. A Figura 88 mostra o molde perfeitamente encaixado no suporte do carrinho da mesa compactadora.



Figura 87 – Encaixe rápido



Figura 88 – Molde encaixado no carrinho

O rolamento suave e contínuo do carrinho é alcançado com pequenas rodas metálicas apoiadas sobre o perfil (em ambos lados) – Figura 89, e abaixo do mesmo, conforme mostrado na Figura 90.



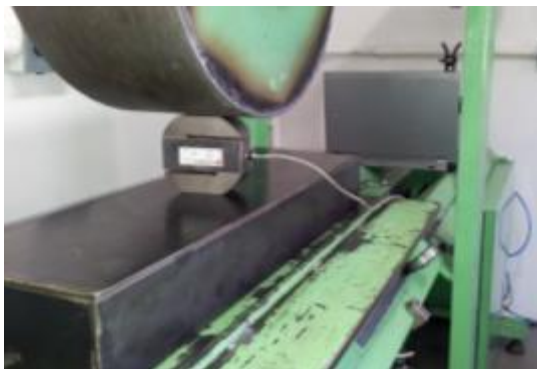
Figura 89 – Rodas em ambos os lados do trilho



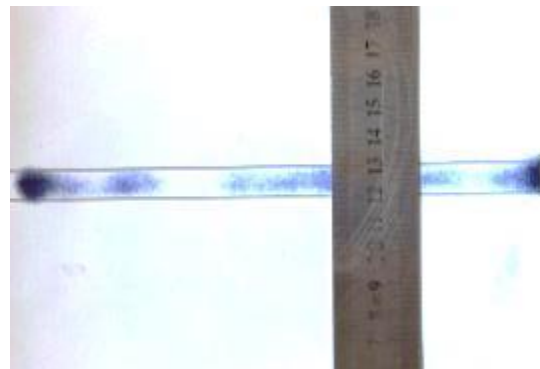
Figura 90 – Conjunto de rodas inferior e superior ao trilho

Esta configuração limita as movimentações transversais do carrinho, onde fica o molde com a mistura asfáltica acondicionada e, mais importante ainda, impede o deslocamento vertical devido ao carregamento em uma das bordas de rolamento do carrinho.

Com a concepção da mesa compactadora buscou-se em seguida definir um procedimento tal qual representasse um número ideal de passadas a se atingir certa densificação a garantir volume de vazios constante. Para tanto, foi realizada uma aferição do lastro do rolo tipo chapa, com determinação da massa e área de contato via célula de carga e marca de carbono respectivamente. Na Figura 91, apresentam-se em detalhes os procedimentos de aferição.



(i)



(ii)

Figura 91 – Compactador: (i) Aferição da massa, (ii) Aferição da área de contato

O procedimento de aferição consistiu a desenvolver pressões de contatos típicas de rolos lisos estáticos para as condições de aplicação de campo, da ordem de 9,3 a 12,2 kgf/cm², como abordado por Geller (1984). Segundo Geller (1984) os rolos lisos estáticos são classificados como lineares de carga estática, em quilogramas por centímetro, para um determinado diâmetro do cilindro. A sua pressão de contato é dependente do arco de contato com a superfície e da profundidade de penetração da mistura a ser compactada (Figura 92). Na Tabela 10, é possível visualizar as várias pressões de contato desenvolvidas pelo rolo liso estático.

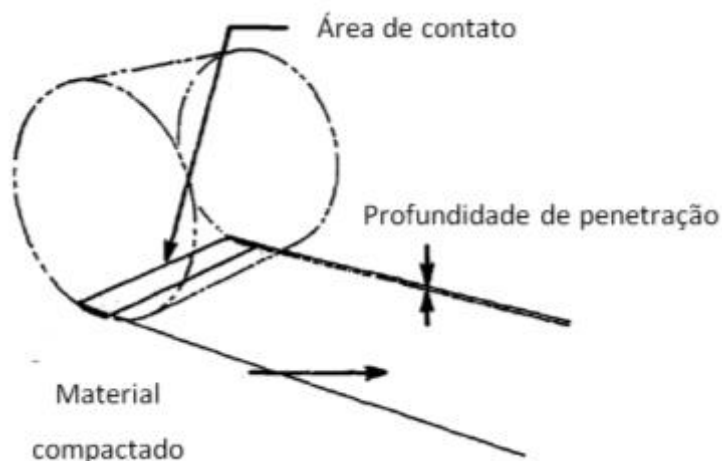


Figura 92 – Esquema da área de contato e profundidade de penetração do rolo liso estático

Tabela 10 – Pressões de contato a várias profundidades de penetração adaptado de Geller (1984)

Classe	Tambor (Diâmetro)	Condições	Carga estática linear (kg/ cm)	Profundidade de Penetração (mm)							
				1,6	3,2	4,8	8,4	9,5	12,7	15,9	19,1
				Pressão de contato (kg/cm ²)							
12-15 ton rolo liso estático	1753 mm	sem lastro	61	12,2	7,8	8,5	5,6	4,8	4,1	3,7	3,3
		com lastro	78,8	15,4	9,9	8,1	7,3	5,8	5,1	4,6	4,2
8-12 ton rolo liso estático	1525 mm	sem lastro	32,2	6,7	4,5	3,7	3,2	2,7	2,3	2,1	1,9
		com lastro	44,8	9,3	6,1	5,2	4,4	3,7	3,2	2,9	2,6

Previamente ao procedimento de calibração, as misturas produzidas eram preparadas em bateladas únicas de com misturadoras com taxa aberto e basculante, de modo a produzir misturas mais homogêneas em termos de características granulométricas e volumétricas pós-compactadas.

Passado o procedimento de definição da pressão de contato, procurou-se produzir placas com dimensões em 600,0 mm de comprimento, 180,0 mm de largura e 63,5 mm de espessura, com o teor ligante do projeto Marshall, e fez-se uma varredura de número de passadas do rolo, variando a 100, 140, 180, 220 e 260 passadas. Com uma placa produzida em cada energia (nº de passadas), foram broqueados três corpos de prova e verificado para

os três projetos o número de passadas ideal para se atingir 4,0 % de vazios. A Figura 93 apresenta uma mistura compactada após o procedimento supramencionado.

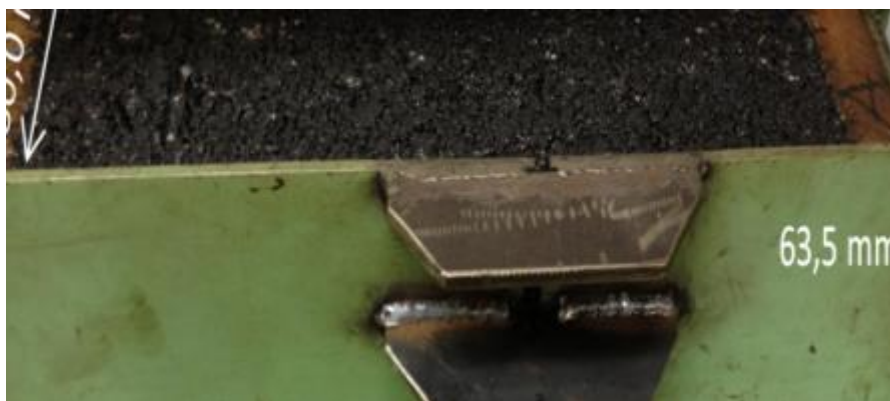


Figura 93 – Detalhe da mistura compactada

Na Figura 94, é possível visualizar a condição de volume de vazios para cada projeto compactado a depender do número de passadas do rolo. É possível verificar que a densificação dos materiais a 4,0 % de vazios é obtido próximo a 175 a 190 passadas. Concomitantemente a checagem dos vazios, foi realizada nos grupos de corpos de prova broqueados das placas a ruptura por resistência a tração indireta.

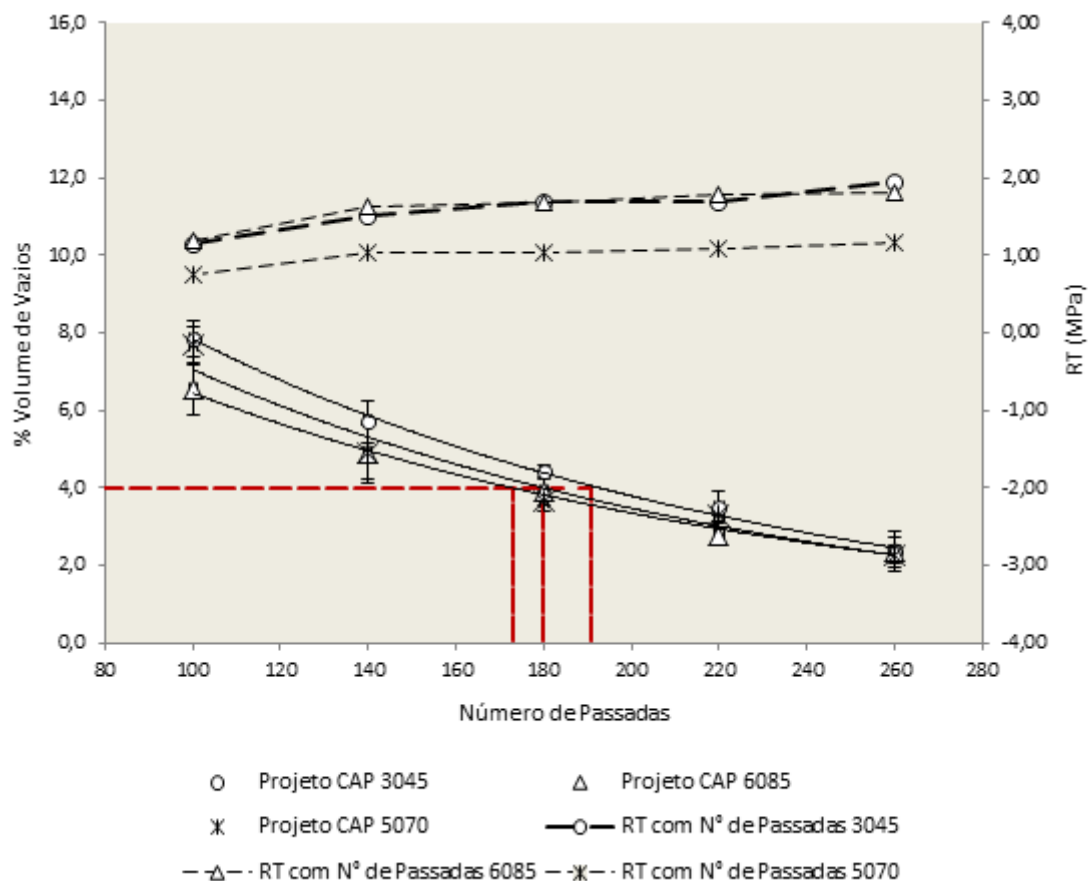


Figura 94 – Curva para definição do número de passadas para atingir 4,0% de vazios do projeto Marshall

8.2.2. Simulador de tráfego

O desenvolvimento do equipamento para simulação de tráfego e determinação do potencial para deformação permanente em misturas asfálticas procura utilizar o mesmo equipamento destinado à compactação de placas por rolagem, sendo substituídos alguns componentes.

O principal objetivo do equipamento simulador de tráfego é mensurar os danos em misturas asfálticas submetidas aos esforços repetidos da aplicação de carga por roda metálica, com largura inferior à largura total da placa, estando a placa submersa em água à temperatura constante de 60 graus. O procedimento para a execução do ensaio tem o equipamento Roda de Hamburgo (Hamburg Wheel Tracking Device) e o APA (Asphalt

Pavement Analyzer), como princípio de funcionamento, sendo possível avaliar a susceptibilidade à água, além da deformação permanente. Apesar da semelhança no procedimento mecânico, as seguintes diferenças precisam ser pontuadas: (i) dimensões dos corpos de prova, (ii) medida da deformação permanente, (iii) carga aplicada, (iv) número de ciclos.

- As amostras foram confeccionadas no compactador desenvolvido nesta pesquisa, e mantendo-se as mesmas dimensões da moldagem (180 mm X 600 mm X 63,5 mm) ao passo que as amostras tipicamente utilizadas na Roda de Hamburgo têm dimensões diferenciadas (260 mm X 320 mm X 40 mm).
- A medição da deformação na Roda de Hamburgo é constante, a partir da instrumentação por LVDT; no caso do equipamento desenvolvido nesta pesquisa, foram definidas etapas intermediárias para medição do afundamento, dada a impossibilidade da instalação do LVDT. Este processo de medição é similar ao procedimento para simulação no equipamento francês.
- A determinação da carga aplicada no ensaio foi definida a partir de ensaios iniciais de experimentação, podendo inclusive, serem definidas categorias distintas de carga em função do tipo de mistura.
- O número de ciclos, bem como a definição de pontos de interesse, tais como são definidos no ensaio com a Roda de Hamburgo (estagio de consolidação, potencial de deformação e dano por umidade – stripping), foram definidos ao longo da calibração do equipamento.

A Figura 95 mostra uma representação esquemática do suporte de amostra que foi utilizado na simulação de tráfego, que conta ainda com um reservatório de água instalado na lateral, munido de dispositivo para circulação da água, com o objetivo de manter constante a temperatura da amostra ensaiada. Detalhes de projeto são apresentados no ANEXO 6.

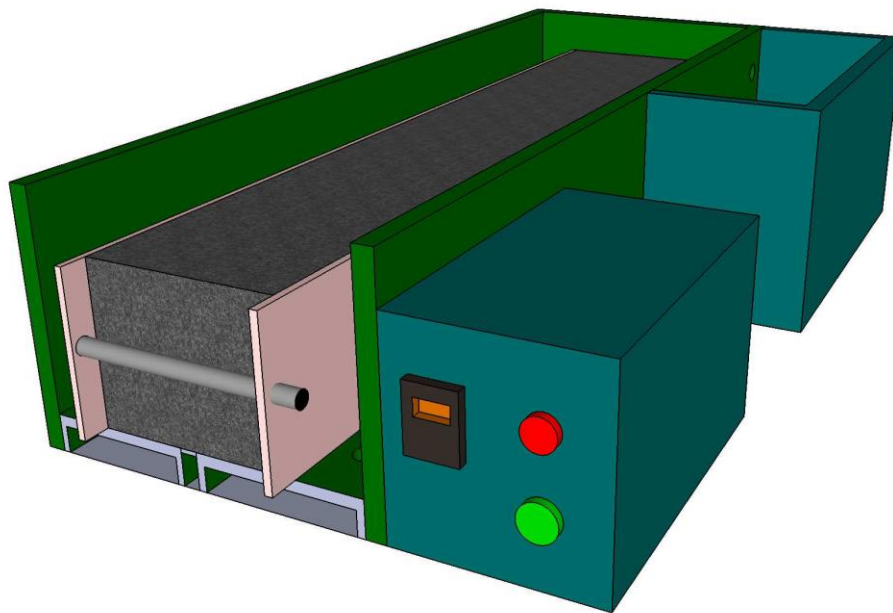


Figura 95 – Representação esquemática do suporte de amostra para simulação de tráfego, com circulação de água em temperatura constante

Para avaliação da deformação permanente, a estrutura do procedimento o qual foi montado se baseia principalmente nas premissas de ensaio oriundas do *HWTD (Hamburg Wheel Tracking Devices)* equipamento o qual é destinado à medida da resistência a deformação permanente em misturas asfálticas de rodovias Alemãs, mais conhecido como roda de Hamburgo, e do equipamento *APA (Asphalt Pavement Analyze)* originalmente produzido em meados da década de 1980 para avaliação da formação de trilha de roda em misturas asfálticas Norte Americanas, sendo o seu procedimento descrito na norma *AASHTO T 340 (2010) – Determining Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt Using the Asphalt Pavement Analyzer*.

Segundo Moura (2010), há variações nos dois tipos de ensaios quanto a fatores como, dimensões de corpos de prova, carga de ensaio, temperatura de ensaio e número de ciclos aplicado ao ensaio. A Tabela 11 apresenta as principais variações do procedimento de ensaios quanto aos equipamentos mencionados e seus métodos de ensaio.

Tabela 11 – Premissas de ensaio para HWTD e APA segundo Moura (2010)

<i>Premissas de ensaio</i>	<i>Hamburg Wheel Tracking Devices</i>	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
<i>Modo de compactação</i>	<i>Amassamento</i>	<i>Amassamento</i>
<i>Dimensões do corpo de prova (cm)</i> <i>L=larg./C=comp./E=esp./D=diâ.</i>	<i>LxCxE = 26 x 32 x 4</i>	<i>LxCxE= 12,5 x 30 x 7,5</i> <i>DxE= 15 x 7,5</i>
<i>Volume de vazios (%)</i>	<i>6 - 8</i>	<i>4 - 7</i>
<i>Número de ciclos (2 passadas)</i>	<i>20.000</i>	<i>8.000</i>
<i>Carga de ensaio (N)</i>	<i>705</i>	<i>445</i>
<i>Condição de ensaio</i>	<i>Seco ou imerso em água</i>	<i>Seca ou imerso em água</i>
<i>Tipo de roda</i>	<i>Metálica</i>	<i>Mangueira inflada</i>
<i>Temperatura de ensaio (°C)</i>	<i>20 - 70</i>	<i>35 - 60</i>
<i>Limite admissível (mm)</i>	<i>4</i>	<i>7,6</i>

O simulador de tráfego desenvolvido pelo CDT - Arteris trabalha com a deformação permanente na condição de imersão da mistura em água com temperatura controlada em 60°C. A carga de ensaio é aplicada por um rolo liso de dimensões inferiores ao rolo liso utilizado para o processo de compactação por rolagem, com dimensões de área de contato de 10,0 mm de largura e 50,0 mm de comprimento e aplicando uma carga da ordem de 578 N, gerando uma pressão de contato próxima a 11,5 kgf/cm². O critério de parada assumido ao ensaio é similar ao adotado pelo procedimento APA, considerando 16.000 passadas (equivalente a 8.000 ciclos) de solicitação e um limite admissível de deformação de 7,6 mm. A Figura 96 apresenta os rolos lisos tanto para compactação quanto para desenvolvimento da deformação permanente.



Figura 96 – Rolos lisos para compactação da mistura e simulação da deformação permanente

Procedimento:

- a. Inicialmente a mistura deve ser preparada a modo de atender uma volumetria com 4 a 7% de volume de vazios, segundo o teor de projeto especificado por metodologia Marshall ou SUPERPAVE.
- b. Em seguida deve ser checada a massa específica aparente segundo o procedimento ARTERIS T 166 (2013) da placa compactada de modo à checagem do volume de vazios da mesma, comparando com a massa específica máxima medida, extraído do procedimento ARTERIS T 209-10 (2013).
- c. Sequencialmente a placa produzida é levada à estufa e condicionada a 60° C durante quatro horas para estabilização e homogeneização da temperatura de ensaio. O período de quatro horas foi definido com base em um termopar acoplado a placa para medições de temperatura com passar do tempo como apresenta a Figura 97.

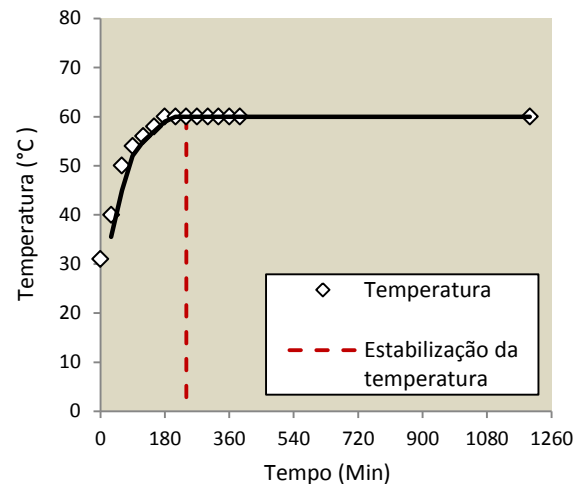


Figura 97 – Detalhe da mistura em condicionamento e da curva para definição do tempo de estabilização da placa a 60°C em estufa

- d. Concomitante a estabilização da temperatura da placa, deve ser preparado o molde para simulação da deformação permanente, preenchido com água e controlada a temperatura de ensaio em 60° C como observado na Figura 98.



Figura 98 – Situação do molde com água para simulação da deformação permanente

- e. Em seguida, a placa é levada ao molde para simulação da deformação permanente e devem-se proceder inicialmente 50 passadas (25 ciclos) no corpo de prova para eliminar irregularidades superficiais. Após isto devem ser retiradas as leituras iniciais no corpo de prova com o gabarito manual, como apresenta a Figura 99. São

realizadas três leituras em placa: uma central e outras duas espaçadas a 125,0 mm de distância do centro.



Figura 99 – Detalhe do gabarito utilizado em ensaio para medida da deformação acumulada

- f. Além da leitura inicial, mais algumas passadas são realizadas de modo a verificar o afundamento causado pela passagem de roda metálica: 200, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000, 12.000 e 16.000.
- g. Acabado o número de passadas, retira-se a placa do molde e o ensaio é considerado finalizado.

Cálculos:

- a. Determinar a média da deformação em mm, para cada passagem de roda metálica preestabelecida em ensaio.
- b. Em seguida, deve-se aplicar regressão nos dados obtidos de modo a atender uma função potencial do crescimento da formação da trilha de roda com o número de passadas, plotando-se os resultados em gráfico xy com escala logarítmica nos dois eixos, como apresenta a exemplo, a Figura 100.

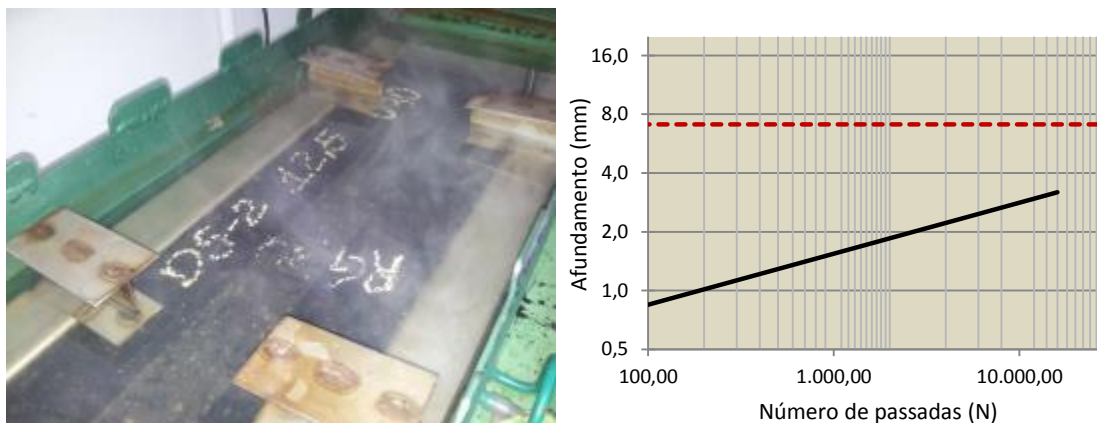


Figura 100 – Detalhe da deformação gerada no ensaio e do traçado de resultados da deformação permanente após 16.000 passadas

Aferição da mesa compactadora e simulador de tráfego

Para a avaliação do comportamento da mesa compactadora e do simulador de tráfego desenvolvido pelo CDT - Arteris, comparativamente com os equipamentos franceses do LTP - EPUSP, produzidos pelo LCPC, foram usadas 2 misturas asfálticas em quantidade suficiente para a produção de placas em ambos os equipamentos (tanto no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação quanto no laboratório do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Arteris). Foram escolhidas duas misturas asfálticas, com composições granulométricas distintas, uma com características de concreto asfáltico denso – mistura 1, e outra com características de *binder* – mistura 2 (Figura 101), utilizando em todas as misturas asfálticas um ligante asfáltico caracterizado como CAP 30/45.

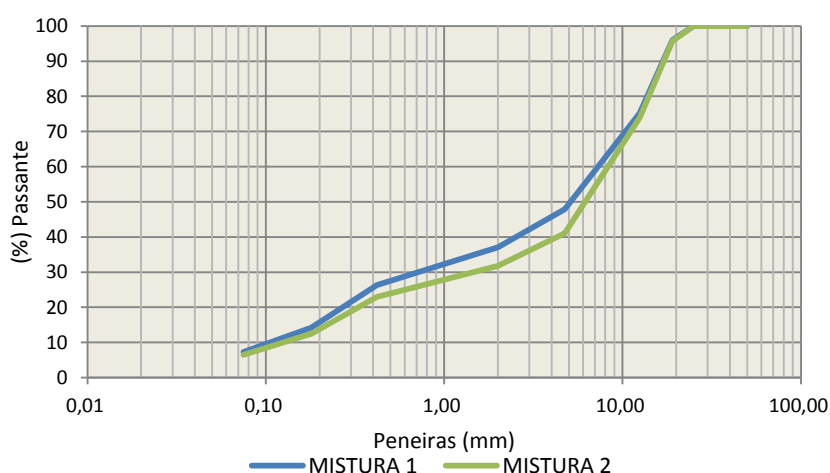


Figura 101 – Granulometria das misturas utilizadas para aferição simulador CDT e simulador LCPC

O volume de vazios das placas produzidas pelo equipamento desenvolvido, precisa estar distribuído de maneira homogênea, tanto ao longo da profundidade, quanto no sentido longitudinal. As placas compactadas foram ensaiadas para determinação da massa específica aparente compactada da mistura asfáltica, a fim da checagem do volume de vazios pelo compute da massa específica medida (Gmm) ou *Rice Test*.

Os ensaios foram realizados conforme a metodologia desenvolvida pelo CDT para o simulador CDT ARTERIS e conforme a norma a NF P 98-253-1 (AFNOR, 1993b) francesa, para metodologia com o simulador tipo LCPC. A Figura 102 apresenta os resultados com as respectivas deformações geradas nos respectivos equipamentos e volume de vazios.

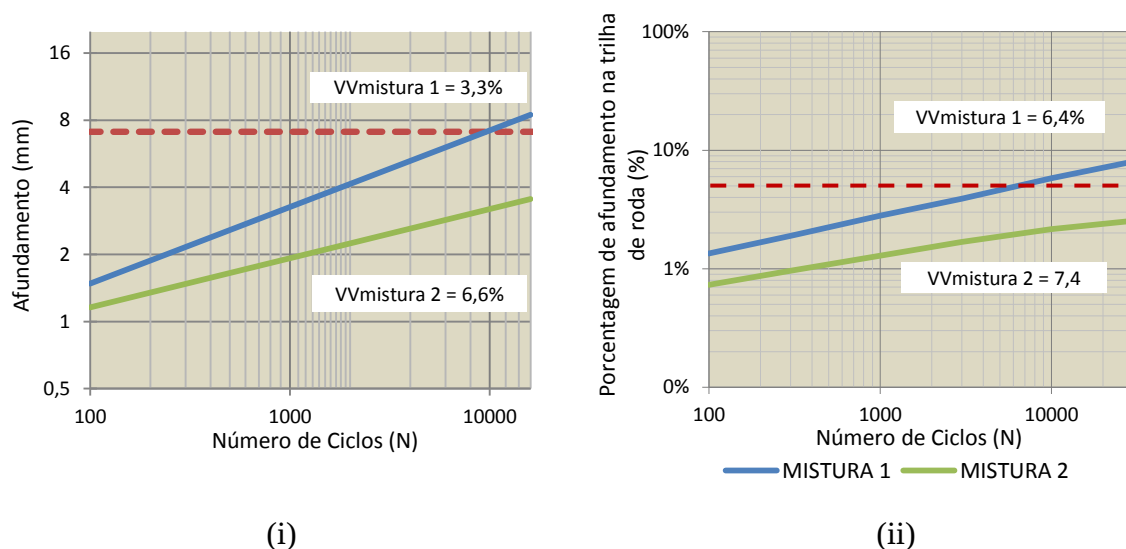


Figura 102 – (i) Afundamento pelo equipamento CDT e (ii) afundamento percentual pelo equipamento do LTP - Francês

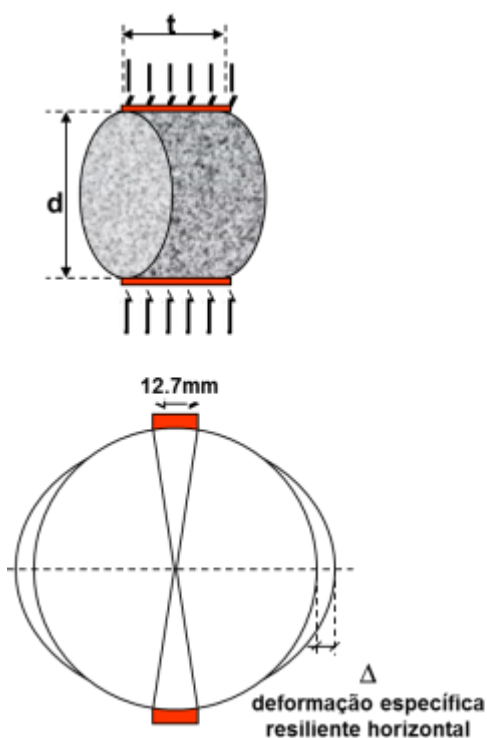
Pelos resultados é possível identificar que a mistura 1 apresentou pronunciada deformação permanente após o número total de ciclos de cada equipamento, passando do limite pré-estabelecido pelas duas metodologias, indicando um comportamento instável tanto para o equipamento simulador CDT, quanto para o simulador LCPC. Para mistura 2, um material com propriedades como binder, esta apresentou após o número de ciclos em cada equipamento, deformação permanente inferior ao estabelecido, indicando o adequado comportamento tanto para o equipamento simulador CDT, quanto para o simulador LCPC.

Analisando os dois procedimentos, e os dois tipos de equipamentos, é possível identificar que há a mesma tendência de resposta quanto à deformação permanente, muito embora haja a necessidade de no futuro, aumentar o campo de análise de resultados para validação do uso do simulador CDT - Arteris, variando-se características como: (i) materiais, (ii) granulometrias, (iii) parâmetros de ensaio, (iv) condições de ensaio, e etc.

8.3. PRENSA DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT) da Arteris, em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-EPUSP), executou a montagem de um equipamento para a realização do ensaio de módulo de resiliência em misturas asfálticas, do tipo pulso pneumático, seguindo as recomendações da norma do DNIT 135/2010 – ME, *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência*. Além de atender esta norma, ele poderá também atender a norma ABNT NBR 16018:2011 *Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida* e a norma americana ASTM D7369 - 11 *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test*.

O equipamento permite a realização de ensaios diametral de módulo de resiliência em misturas asfálticas em corpos-de-prova tipo Marshall. Basicamente, o procedimento de ensaio consiste em, assentar a geratriz do corpo de prova tipo Marshall no friso inferior do dispositivo centralizador (Figura 103) e, suavemente, encostar o friso superior desse dispositivo na geratriz diametralmente oposta. Conforme a solicitação cíclica da carga do ensaio, o plano vertical (entre os dois frisos) do corpo-de-prova apresenta um deslocamento de compressão e devido às características do corpo de prova, ocorre um deslocamento de tração no plano transversal (Figura 103). Esse deslocamento transversal é medido por meio de um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), equipamento para medição de deslocamento linear.



$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi t d}$$

Normalmente $d = 10 \text{ cm (4")}$

$$\sigma_t = 0.064 \frac{F}{t}$$

Para friso de carga de 1,27 cm de largura

$$M_R = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} = \frac{F}{t \Delta} (0.9976\mu + 0.2692)$$

Admitindo $\mu = 0.35$

$$M_R = \frac{F}{t(2\Delta)} 0.6184$$

Figura 103 – Solicitação esquemática de um corpo de prova Marshall de mistura asfáltica sob compressão diametral e deslocamento elástico horizontal

O sistema de acionamento do êmbolo do pistão que propicia aplicação da carga no corpo de prova é pneumático, a sua regulação é feita através de um regulador de pressão, podendo definir-se a intensidade da tensão aplicada. O tempo de atuação da carga de ensaio é alcançado por meio de um controlador lógico programável (CLP) acoplado diretamente a uma válvula solenoide instalada na entrada do atuador. Esse tempo é da ordem de 0,1 s com o corpo de prova solicitado pela carga de ensaio e 0,9 s sem solicitação (repouso), conforme apresentado na Figura 104. O CLP permite a abertura e o fechamento de uma válvula solenoide de forma que esses tempos sejam alcançados.

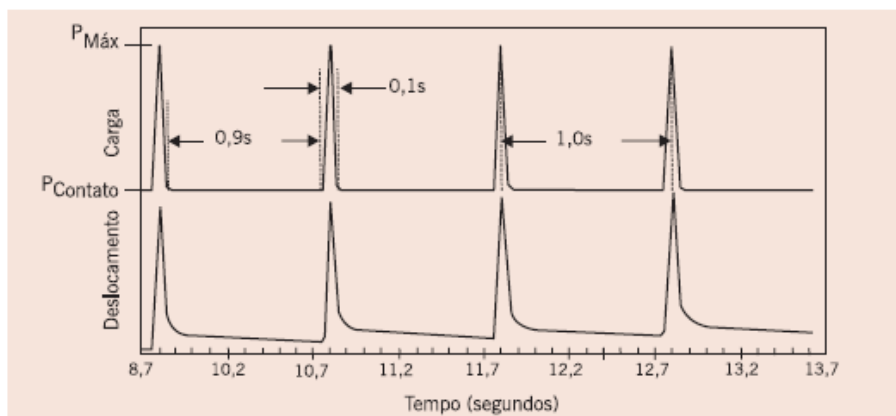


Figura 104 – Duração dos tempos de carregamento e repouso

(Fonte: Bernucci *et al.*, 2008)

Um painel de comando com os instrumentos para a regulação das cargas de ensaio e um sistema de aquisição de dados (placa conversora de sinal analógico/digital) também fazem parte do conjunto do referido equipamento.

Abaixo estão apresentados os detalhes de cada componente do equipamento pneumático para ensaio de módulo de resiliência em misturas asfálticas:

- Pórtico (prensa) metálico munido de base plana quadrada de 450 mm de lado, duas hastes de diâmetro de 2" com rosca tipo quadrada e comprimento de 1400 mm, base móvel superior munida de furos para alojamento do atuador e fixação dessa base superior com 4 roscas, sendo duas acima e duas abaixo;
- Célula de carga com capacidade de 10 kN;
- Dispositivo centralizador de corpos de prova tipo Marshall de forma que o corpo de prova seja disposto diametralmente para ensaio;
- Suporte transversal (tipo garra) para o LVDT;
- Transdutor mecânico-eletromagnético tipo LVDT de contato;
- Sistema de condicionador de sinal analógico/digital;
- Atuador com capacidade de 10 kN, diâmetro de 6", curso do pistão de 25 mm e anel magnético como limitador do curso do êmbolo;
- Contador de pulsos pneumático;

- Válvula solenoide (12 V) acoplada ao pistão com acionamento de abertura e fechamento por pulso elétrico;
- Painel de comando: manômetro, regulador de pressão, válvula solenoide, controlador lógico programável (CLP);
- Câmara de climatização com troca de ar forçado, com dimensões compatíveis para alojamento da prensa e atuador, com capacidade de manter a temperatura de ensaio entre 0°C e 60°C com variação de 0,5°C;
- Fonte de ar comprimido com pressão média de 110 psi.

Na Figura 105 é apresentado um croqui da aparelhagem para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas, conforme DNIT 135/2010 – ME.

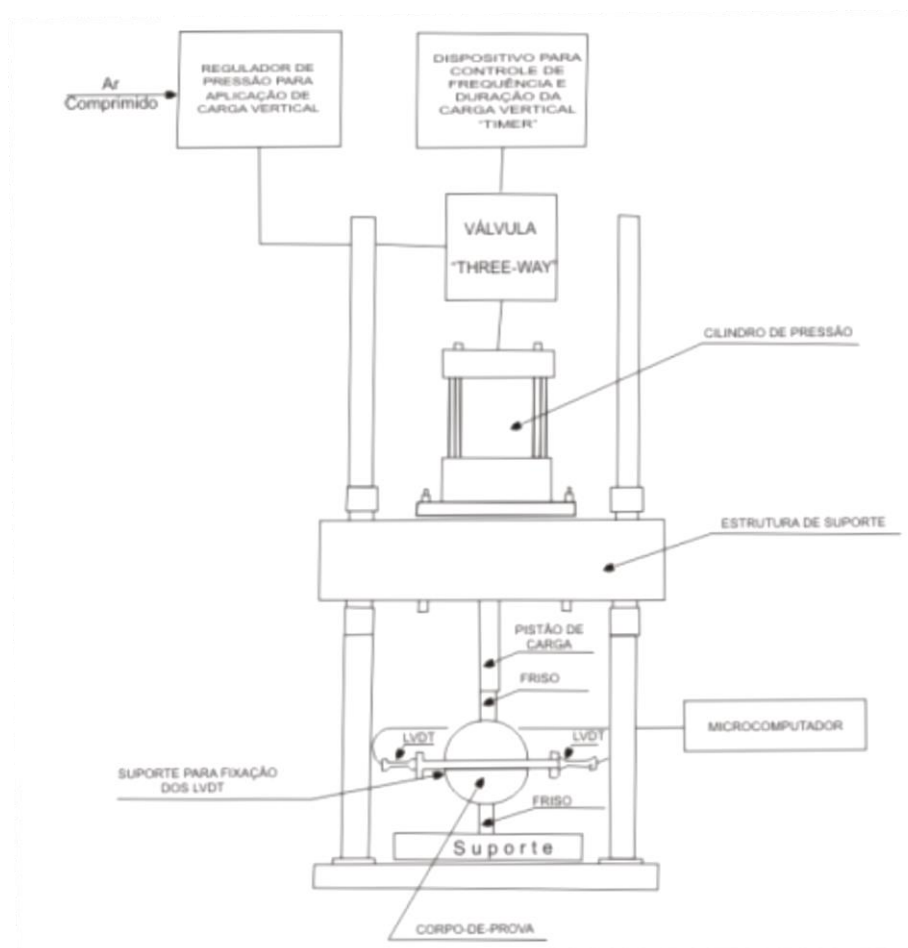


Figura 105 – Aparelhagem para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas

8.3.1. Avaliação do equipamento de módulo de resiliência

A avaliação do equipamento de módulo de resiliência montado no CDT da Arteris foi realizada por meio de ensaios comparativos com o equipamento pneumático do LTP-EPUSP (Figura 106), que atende às exigências das normas citadas anteriormente , e já foi utilizado no desenvolvimento de vários trabalhos técnicos e de pesquisas.



Figura 106 – Equipamento pneumático do LTP-EPUSP

8.3.2. Montagem do equipamento de módulo de resiliência de misturas asfálticas do CDT - Arteris

De posse dos componentes, procedeu-se à montagem do equipamento de módulo de resiliência de misturas asfálticas, iniciando a mesma pela fixação do atuador na base móvel superior da prensa (Figura 107).



Figura 107 – Fixação do atuador na base móvel

Em seguida, prosseguiu com a montagem do painel de comando, fixando o manômetro, regulador de pressão, válvula solenoide, controlador lógico programável (CLP), relógio indicador da pressão de ar e acionadores para ligar e desligar (Figura 108).



Figura 108 – Montagem do painel de comando

Finalizando, com a ligação da válvula solenoide (12 V) acoplada ao pistão com acionamento de abertura e fechamento por pulso elétrico junto ao atuador, sistema de alimentação de ar comprimido (Figura 109) para que o equipamento de módulo de resiliência fosse ligado, e pudesse verificar o funcionamento de todos os componentes em conjunto, pois assim, poderia ser corrigida eventuais falhas, bem como assegurar que os

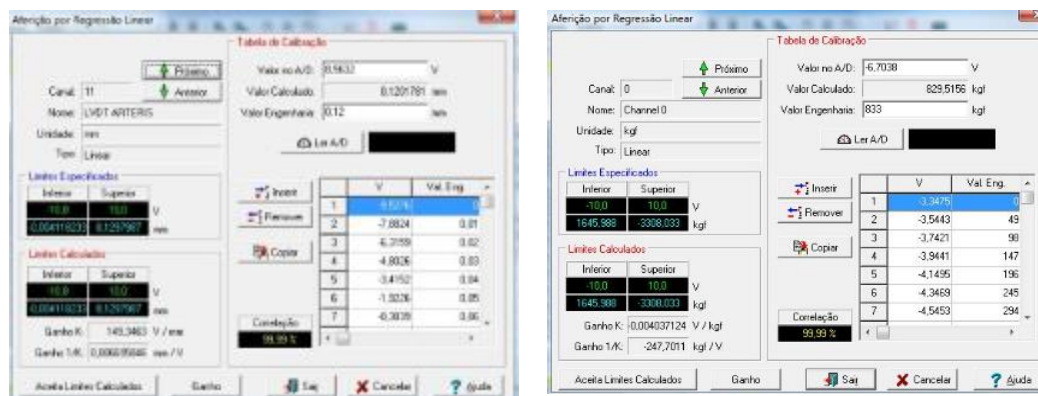
mesmos estivessem desempenhando suas funções adequadamente, mormente, o atuador e a válvula solenoide.



Figura 109 – Sistema de ligação do ar comprimido e válvula solenoide

Após o perfeito funcionamento do equipamento de módulo de resiliência, outra etapa que engloba esse processo foi necessária: a instalação do software de aquisição (AqDados) e análise (AqAnalysis) de dados da Lynx, que tem como interface uma placa onde são ligados a célula de carga e o LVDT (Linear Variable Differential Transformer), necessitando a calibração dos mesmos, para que os registros das medidas de força e deslocamento estejam em conformidade.

A calibração do LVDT foi realizada com o auxílio de um dispositivo, onde fixou-se no mesmo o LVDT em uma extremidade e na outra o micrômetro, de forma que ao girar este para medir, pressione o LVDT até encontrar a faixa de leitura em V (volt) estabelecida para calibração, fixa o valor inicial no A/D em volt no sistema de aquisição que corresponderá ao valor zero de engenharia em milímetros no sistema, estabelecendo também o zero inicial no micrômetro, seguindo com as demais leituras ao girar o leitor do micrômetro e registrar as mesmas aos respectivos valores de voltagem. Também, de forma análoga, porém com uso de um anel dinamométrico, realizou-se a calibração da célula de carga. A Figura 110 (i e ii) mostra o registro de ambas no sistema de aquisição.



(i) (ii)
 Figura 110 – (i) Registro do LVDT e (ii) Registro da célula de carga

Finalizada a montagem e testes no LTP - EPUSP, o equipamento foi enviado e instalado no CDT - ARTERIS (Figura 111), onde se adotou o mesmo procedimento de verificação já realizado no LTP para confirmar os resultados obtidos quanto ao pulso de aplicação de carga e medições de deslocamento com material padrão (corpo de prova de alumínio) para seguir com os testes em misturas asfálticas e determinar o módulo de resiliência das mesmas.



Figura 111 – Equipamento instalado no CDT

8.3.3. Verificação e aferição do equipamento de módulo de resiliência

A verificação e aferição do equipamento de módulo de resiliência de misturas asfálticas do CDT, foi realizada com base: i) Procedimento adotado na prensa pneumática

do LTP; ii) Repetição do procedimento do LTP no equipamento do CDT; iii) Comparação dos resultados do procedimento entre equipamentos; iv) Testes com misturas asfálticas nos equipamentos do CDT e LTP, com a metodologia de cálculo dos módulos de resiliência; v) Comparação dos resultados de módulo de resiliência das misturas asfálticas ensaiadas entre equipamentos; e vi) Análise estatística de dados entre equipamentos.

Procedimento adotado na prensa pneumática do LTP – EPUSP

A verificação do equipamento de módulo de resiliência de misturas asfálticas montado no Centro de Desenvolvimento Tecnológico - CDT da Arteris teve como referência, o equipamento pneumático do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LTP EPUSP, sendo que este adota como base para verificação de materiais e ensaios a prensa servo hidráulica modelo MTS 810 de propriedade do LTP.

No Brasil, os ensaios de carga repetida e ensaios dinâmicos foram iniciados na COPPE/UFRJ, em 1977, sendo os de misturas asfálticas em 1980 (Medina et. al, 2005). Segundo Vianna (2002), com um corpo de prova padrão é possível verificar e/ou quantificar as causas das diferenças dos resultados entre laboratórios quando é utilizada a mesma metodologia, além de permitir a calibração dos equipamentos, adequando a funcionamento idêntico entre todos os laboratórios de pesquisa e prestadores de serviços.

Baseando-se no princípio citado anteriormente, o LTP também tem como premissa de ensaios, qualidade e confiabilidade. Dessa forma, para o ensaio de módulo de resiliência a verificação entre prensas (hidráulica e pneumática) é realizada com um corpo de prova padrão de alumínio (Diâmetro de 101,63 mm e altura de 63,57mm), cujas dimensões são semelhantes a um corpo de prova Marshall, utilizando a instrumentação do ensaio, aplicando cargas estabelecidas, obtendo-se os resultados de forças e deslocamentos, comparando-os a fim de verificar a conformidade dos dados, já que os controladores para aplicação de carga, bem como os medidores de deslocamentos são diferentes entre ambas. A Figura 112 mostra a instrumentação usada na MTS com material padrão.



Figura 112 – Instrumentação usada na MTS

Repetição do procedimento do LTP no equipamento do CDT

Como o sistema de aplicação de carga e obtenção das medidas de deslocamento da prensa montada para o CDT da Arteris são iguais ao da prensa pneumática do LTP, a verificação do pulso das mesmas foi realizada com o corpo de prova padrão de alumínio, diâmetro de 101,63 mm e altura de 63,57mm (Figura 113), cujas dimensões são semelhantes a um corpo de prova Marshall, utilizando a instrumentação (Dispositivo centralizador, suporte transversal e LVDT) do ensaio, aplicando uma carga de aproximadamente 100 kgf, para obtenção da média de quatro resultados e posterior comparação.

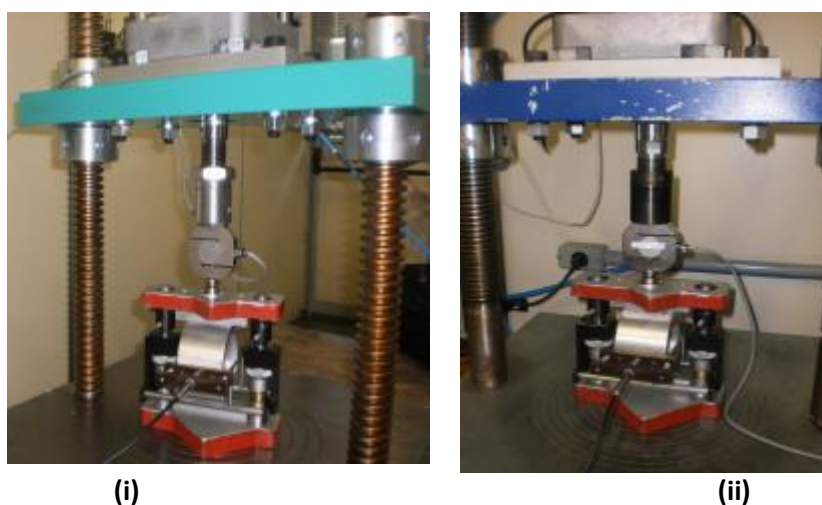


Figura 113 – (i) Ensaio nas prensas do CDT e (ii) do LTP

A Figura 114 mostra os resultados médios obtidos para o tempo de 1 s (aplicação de carga em 0,1 s e repouso de 0,9 s) através do procedimento de verificação adotado entre os equipamentos do LTP e CDT.

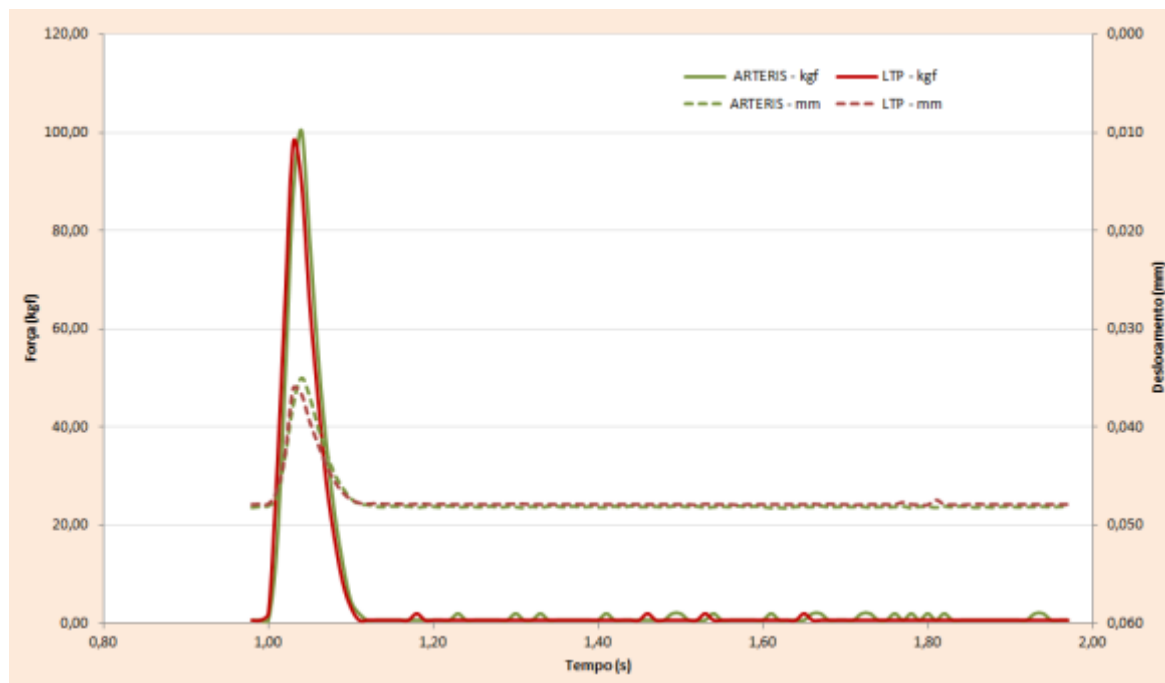


Figura 114 – Resultados obtidos no tempo de 1 s

Como o deslocamento gerado é dependente da força aplicada, comparando os resultados, observa-se que as diferenças entre as amplitudes das forças aplicadas em cada equipamento e seus respectivos deslocamentos foram praticamente iguais, denotando a adequada funcionalidade de todos os componentes e sistema, bem como conformidade entre dados.

Dessa forma, o equipamento de módulo de resiliência montado para o CDT - Arteris, tem às mesmas características e qualidades do LTP - EPUSP, mostrando-se adequado a prosseguir com os testes em misturas asfálticas para obtenção do módulo de resiliência das mesmas.

Testes com misturas asfálticas nos equipamentos do CDT e LTP, com a metodologia de cálculo dos módulos de resiliência

Para os testes foram utilizadas duas misturas asfálticas usadas rotineiramente pela ARTERIS no pavimento de suas rodovias, elaborada pelo CDT, detalhes e características das mesmas foram descritas anteriormente.

A partir dessas misturas asfálticas, foram confeccionados pelo CDT 12 (doze) corpos de prova Marshall de cada uma, sendo numerados de 1 a 12 para identificar a mistura com o CAP 3045 e 13 a 24 para identificar a mistura com o SBS 60/85, totalizando 24 (vinte e quatro) CPs, conforme mostra a Figura 115.



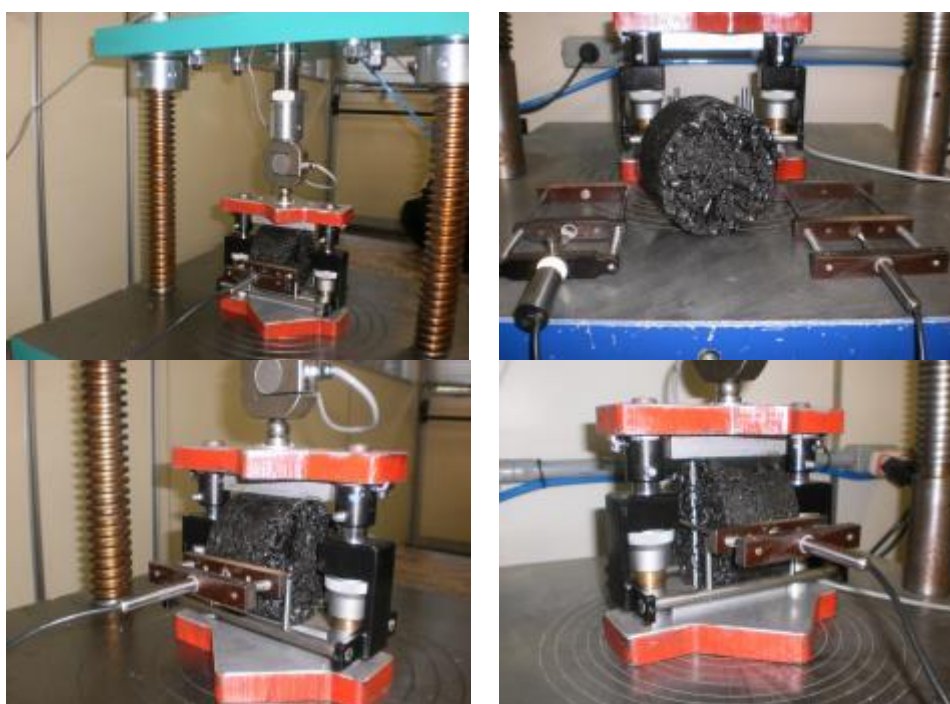
Figura 115 – (i) CAP 30/45 e (ii) SBS 60/85

De cada mistura utilizaram-se 03 (três) CPs na determinação do ensaio de resistência à tração, seguindo instruções das normas da ABNT NBR 15087 Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral; DNIT 136/2010 – ME Pavimentação asfáltica - Determinação da resistência à tração por compressão diametral; e ASTM D6931 – 12 *Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures*. Com a média dos três resultados, adotou-se a porcentagem de 20% do valor de resistência à tração como parâmetro necessário para estimar a carga aplicada no módulo de resiliência, a Figura 116 mostra essa etapa.



Figura 116 – Etapas do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os demais CPs, 09 (nove) de cada mistura, foram utilizados na realização dos testes de módulo de resiliência nos equipamentos do CDT e LTP. Nesse ensaio a montagem do conjunto corpo de prova, suporte e LVDT, consistem em: posicionar o corpo de prova no interior do suporte para fixação do LVDT; colocar o corpo de prova na base da estrutura do suporte, entre dois cabeçotes curvos (frisos metálicos); fixar e ajustar o LVDT de forma que o sinal do mesmo possa ser visualizado na escala do sistema de aquisição de dados no microcomputador; e verificar se o pistão com a célula de carga está no centro da esfera do suporte. A Figura 117 ilustra essas etapas em ambos os equipamentos.



(i)

(ii)

Figura 117 – Etapas do ensaio de módulo de resiliência

Após montagem da instrumentação, iniciou-se o ensaio com a aplicação de carga vertical repetida diametralmente no corpo de prova até atingir o valor máximo (obtido através do ensaio de resistência à tração). Segundo a norma da ASTM D7369, nessa fase já é iniciada a contagem do condicionamento de 100 ciclos, posteriormente faz o registro dos últimos dez ciclos, utilizando apenas os cinco primeiros para o cálculo das deformações horizontais.

Conforme já mencionado, o equipamento de módulo de resiliência desenvolvido atende às normas: *DNIT 135/2010 – ME, Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência*; *ABNT NBR 16018:2011 Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida*; e *ASTM D7369 - 11 Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test*. Os métodos de ensaio da ABNT e ASTM estabelecem quantidade de ciclos diferentes para registro dos deslocamentos que serão usados no cálculo do módulo de resiliência, já o método do DNIT não faz nenhuma citação.

Dessa forma, para esse estudo, a metodologia de cálculo utilizada nas duas misturas testadas é descrita a seguir.

Para o cálculo dos deslocamentos obtidos, adotou-se a norma ASTM D7639, pelo fato de mostrar os métodos de cálculo dos deslocamentos instantâneos e deslocamentos totais, subdividindo o pulso de deslocamento em partes (Figura 118).

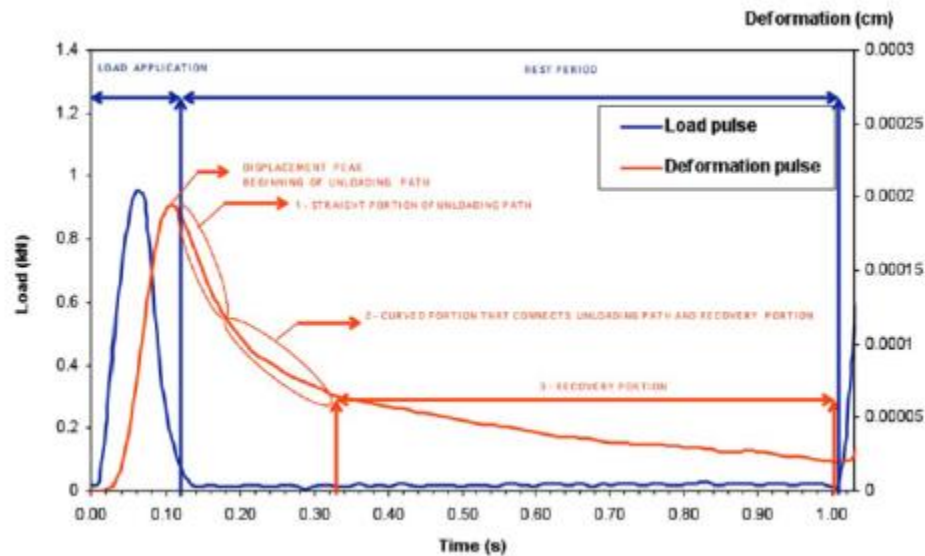


Figura 118 – Subdivisões do pulso de deslocamento

Para os deslocamentos instantâneos são determinadas as regressões para as três porções da curva de deslocamento (Figura 119).

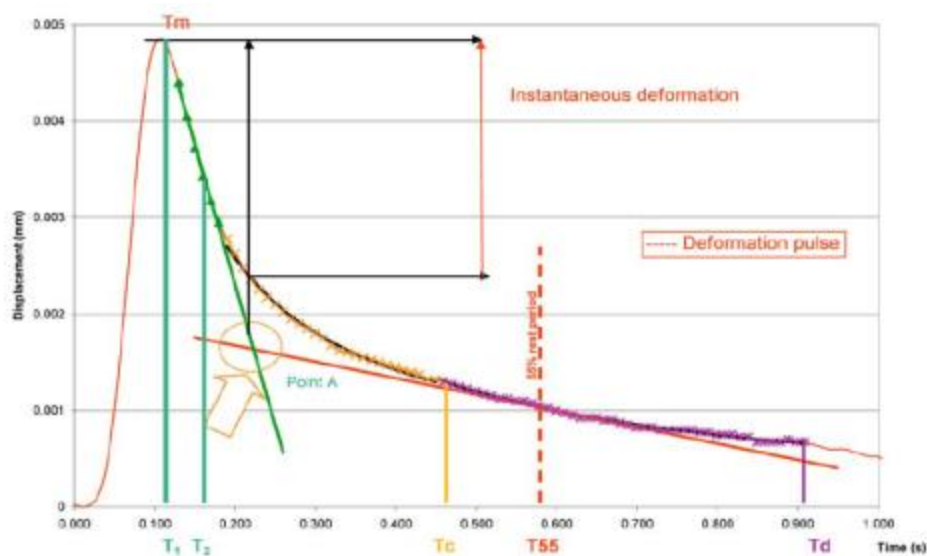


Figura 119 – Deslocamento resiliente instantâneo

O cálculo do deslocamento total consiste em medir o valor obtido através da média dos valores de deslocamento no período entre 85% e 95% do período de descanso, pelo pico de deslocamento (Figura 120).

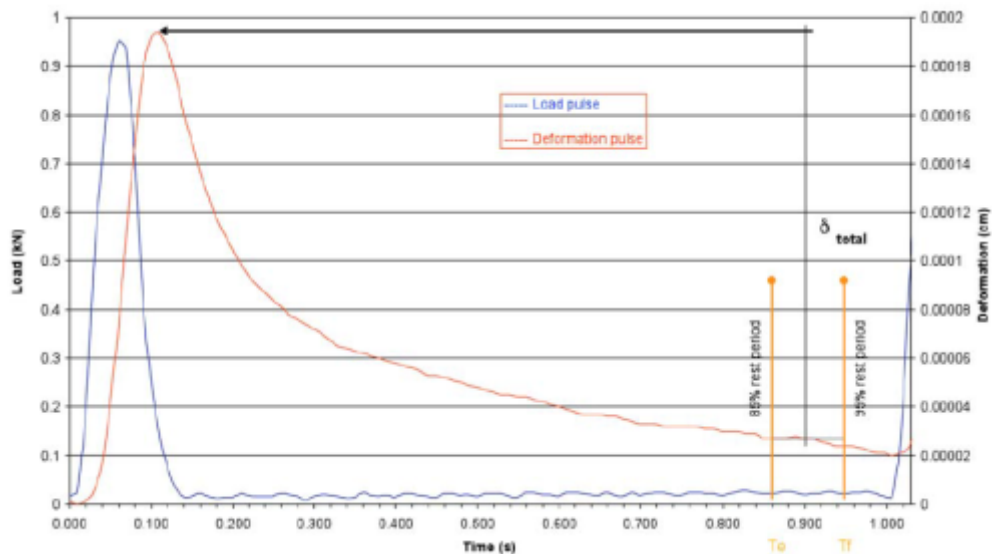


Figura 120 – Deslocamento resiliente total

Pelo fato da norma do DNIT não fazer nenhuma distinção quanto aos deslocamentos obtidos, foi utilizada a expressão mencionada na mesma:

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} \cdot (0,9976\mu + 0,2692)$$

Onde: MR – módulo de resiliência, em MPa; F – carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em N; Δ - deformação resiliente registrada no microcomputador, para aplicações de carga (F), em cm; H – altura do corpo de prova, em cm; μ - coeficiente de Poisson (Adotou-se $\mu = 0,30$ no cálculo de todas as misturas).

Porém os módulos de resiliência foram calculados de duas formas, em uma usando os deslocamentos (Δ) totais, e na outra os deslocamentos (Δ) instantâneos, como meio de compará-los e mostrar as diferenças de valores entre os mesmos. Cabe ressaltar que todos os cálculos foram realizados utilizando as ferramentas do Microsoft Office Excel 2010.

Comparação dos resultados de módulo de resiliência das misturas asfálticas ensaiadas entre equipamentos

Os resultados de módulo de resiliência obtidos na mistura com o CAP 30/45 nos equipamentos do CDT e LTP através do deslocamento total (Figura 121) e deslocamento instantâneo (Figura 122), são mostrados a seguir:

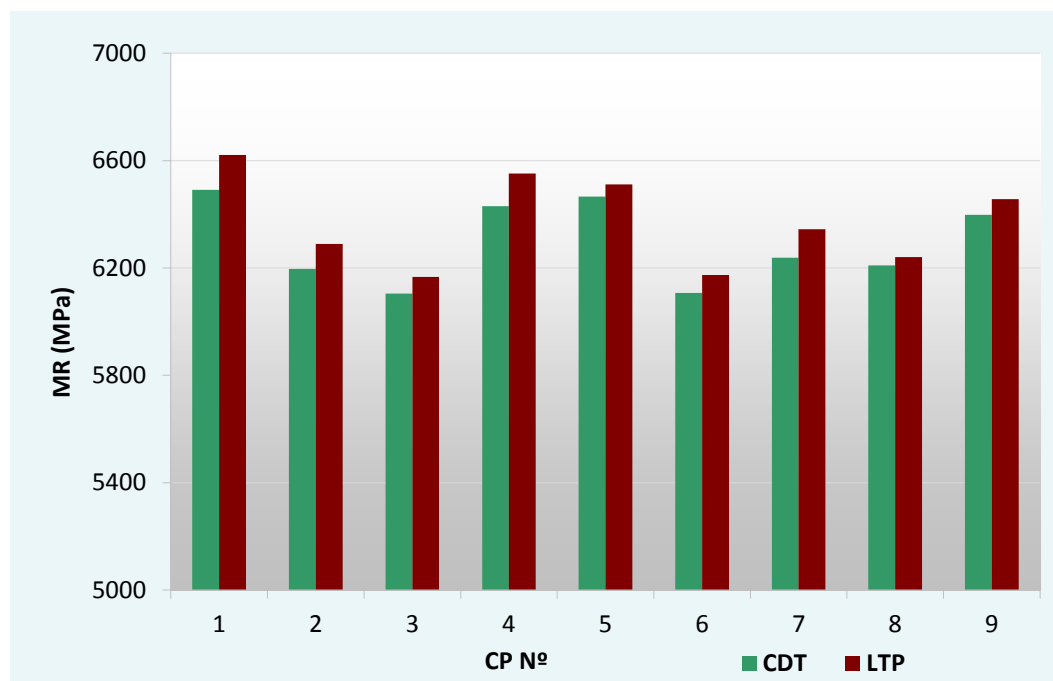


Figura 121 – Resultados de MR através do deslocamento total – CAP 3045

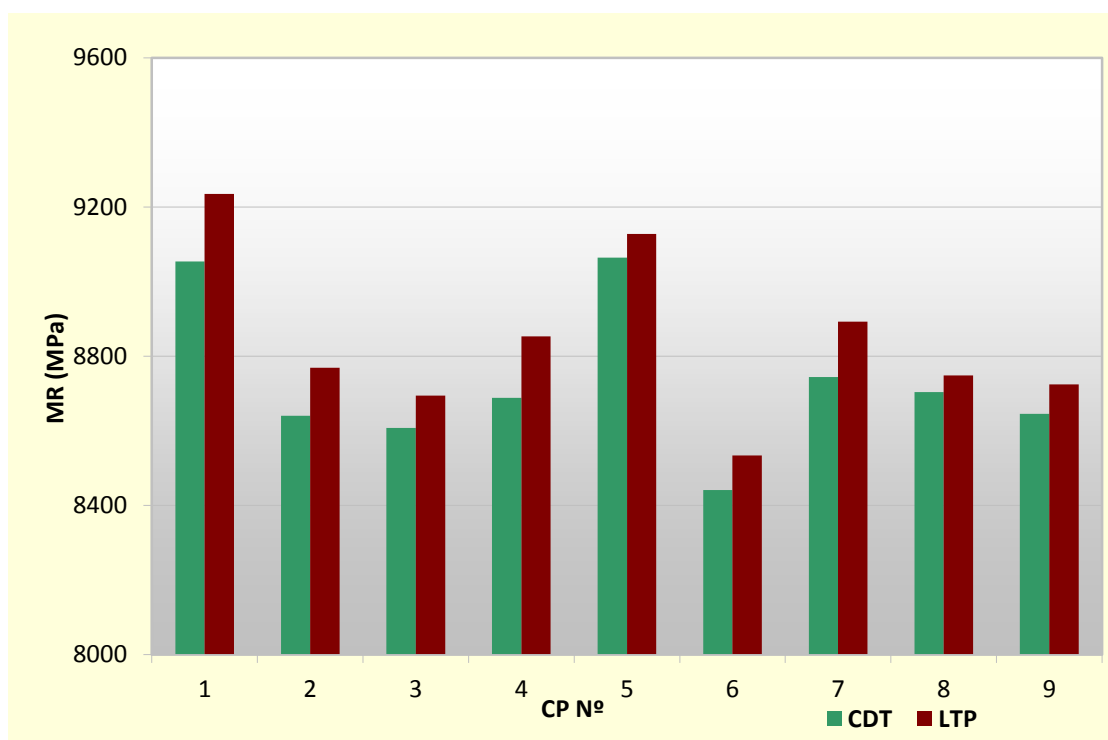


Figura 122 – Resultados de MR através do deslocamento instantâneo – CAP 3045

A média dos resultados de módulo de resiliência obtidos nos nove corpos de prova da mistura com o CAP 30/45 através do deslocamento total e instantâneo, no equipamento do LTP foi de 6373 MPa ($\sigma = 2,65\%$) e 8842 MPa ($\sigma = 2,48\%$), já no equipamento do CDT foi de 6293 MPa ($\sigma = 2,44\%$) e 8732 MPa ($\sigma = 2,34\%$), respectivamente.

Os resultados de módulo de resiliência obtidos na mistura com o SBS 60/85 nos equipamentos do CDT e LTP através do deslocamento total (Figura 123) e deslocamento instantâneo (Figura 124) são mostrados a seguir.

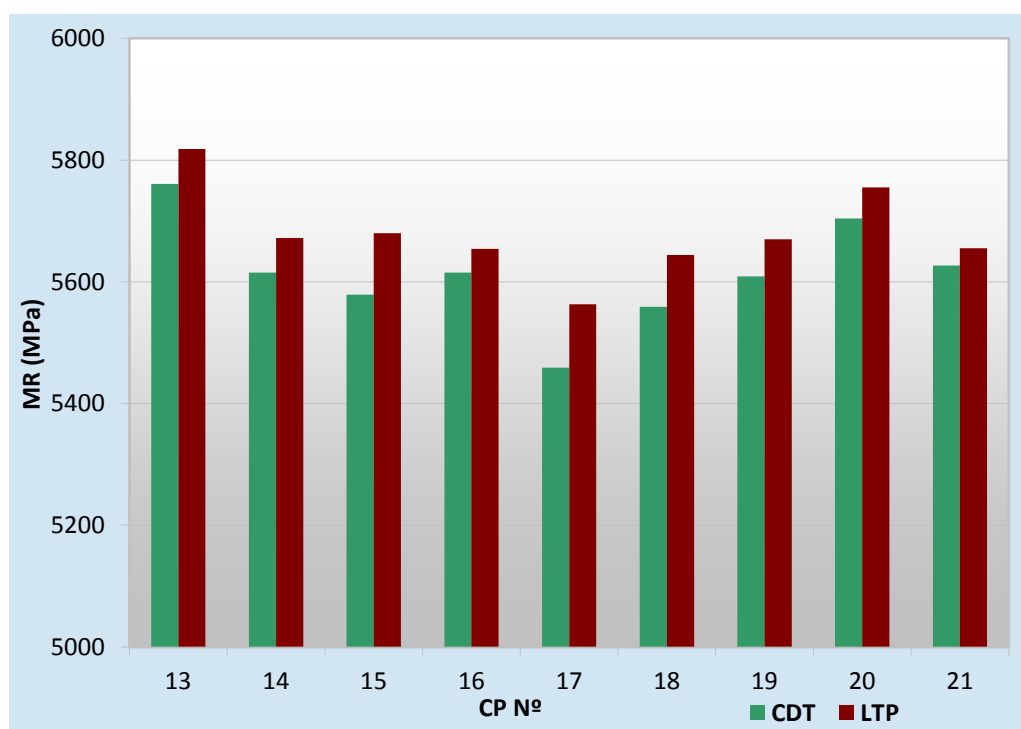


Figura 123 – Resultados de MR através do deslocamento total – SBS 60/85

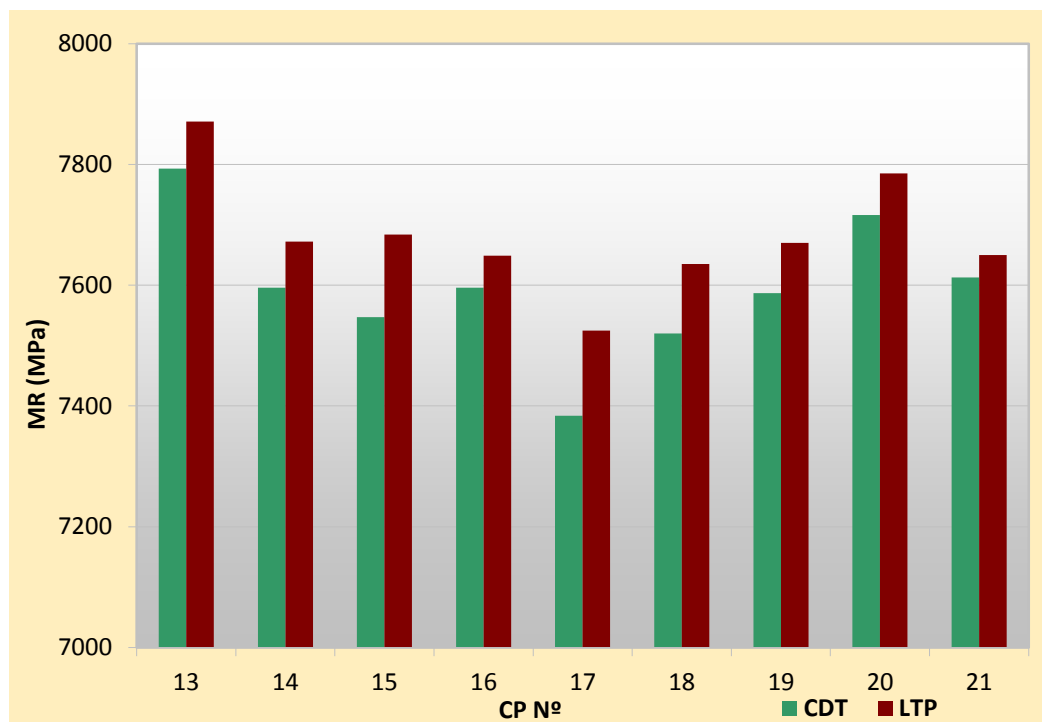


Figura 124 – Resultados de MR através do deslocamento instantâneo – SBS 60/85

A média dos resultados de módulo de resiliência obtidos nos nove corpos de prova da mistura com o SBS 60/85 através do deslocamento total e instantâneo, no equipamento do LTP foi de 5679 MPa (desvio padrão de 1,26%) e 7682 MPa (desvio padrão de 1,26%), já no equipamento do CDT foi de 5614 MPa (desvio padrão de 1,52%) e 7595 MPa (desvio padrão de 1,52%), respectivamente.

Para comparar os resultados de módulo de resiliência nos equipamentos do CDT e LTP, foi adotado o limite estabelecido pela norma da ABNT, a mesma informa que caso um dos grupos possua um ou mais resultados individuais com variação maior do que 5% em relação à respectiva média, então tal grupo deve ser desconsiderado (todos os resultados). Essa porcentagem foi utilizada por ser inferior ao recomendado pela ASTM, 7%.

O escopo em realizar tal comparação, é evidenciar se os resultados medidos pelo equipamento do CDT estão dentro da faixa medida no equipamento do LTP (**referência**), dessa forma, usou a média dos módulos obtidos pelo LTP, variando a mesma em $\pm 5\%$, estabelecendo assim, LTP (Limites).

A comparação dos resultados de módulo de resiliência obtidos na mistura com o CAP 3045 nos equipamentos do CDT e LTP através do deslocamento total (Figura 125) e deslocamento instantâneo (Figura 126) é mostrada a seguir.

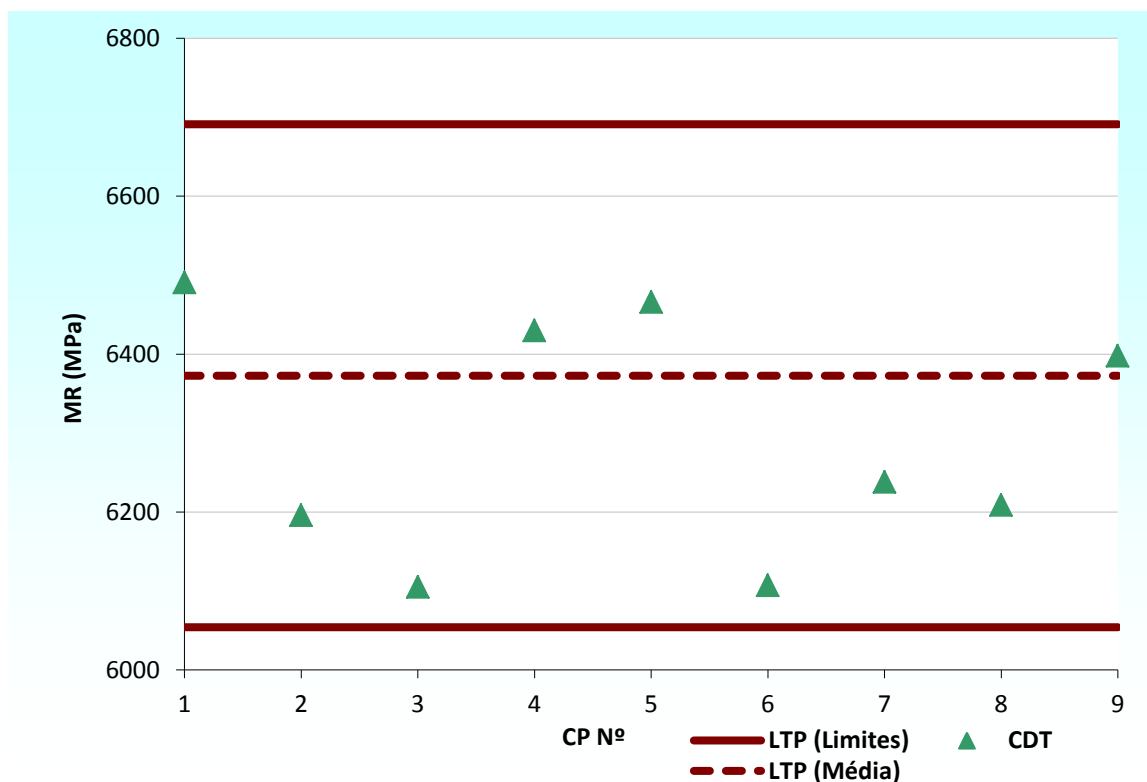


Figura 125 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento total) – CAP 30/45

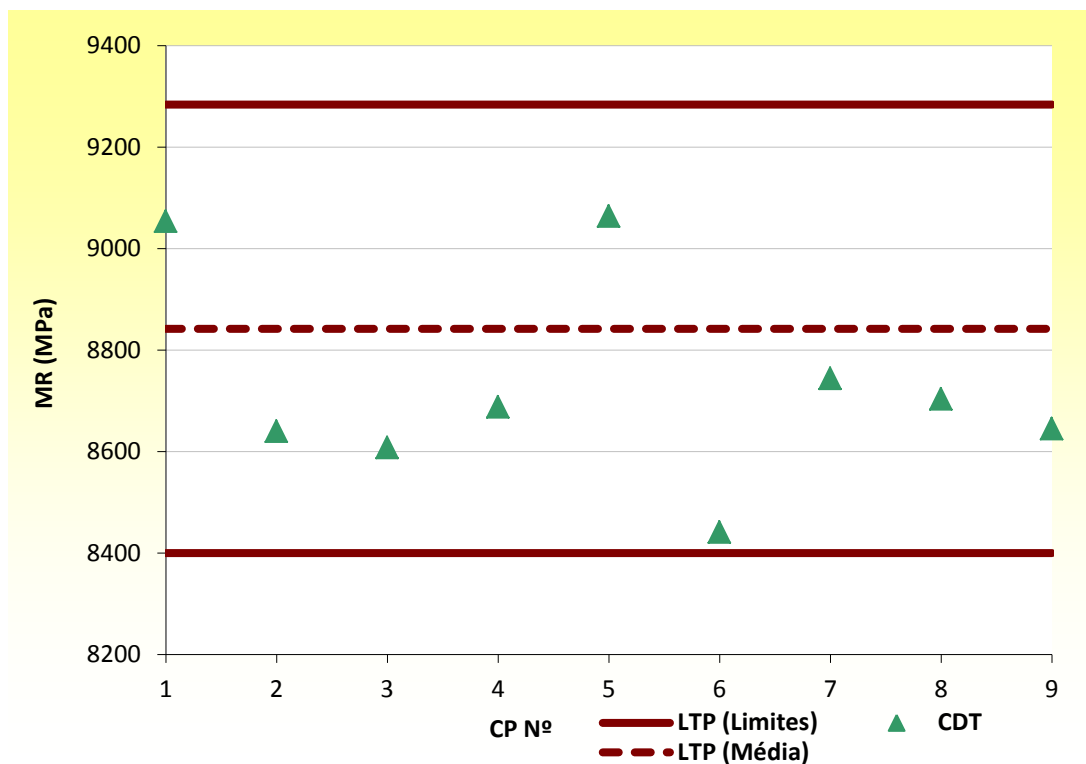


Figura 126 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento instantâneo) – CAP 30/45

A comparação dos resultados de módulo de resiliência obtidos na mistura com o SBS 60/85 nos equipamentos do CDT e LTP através do deslocamento total (Figura 127) e deslocamento instantâneo (Figura 128) é mostrada a seguir.

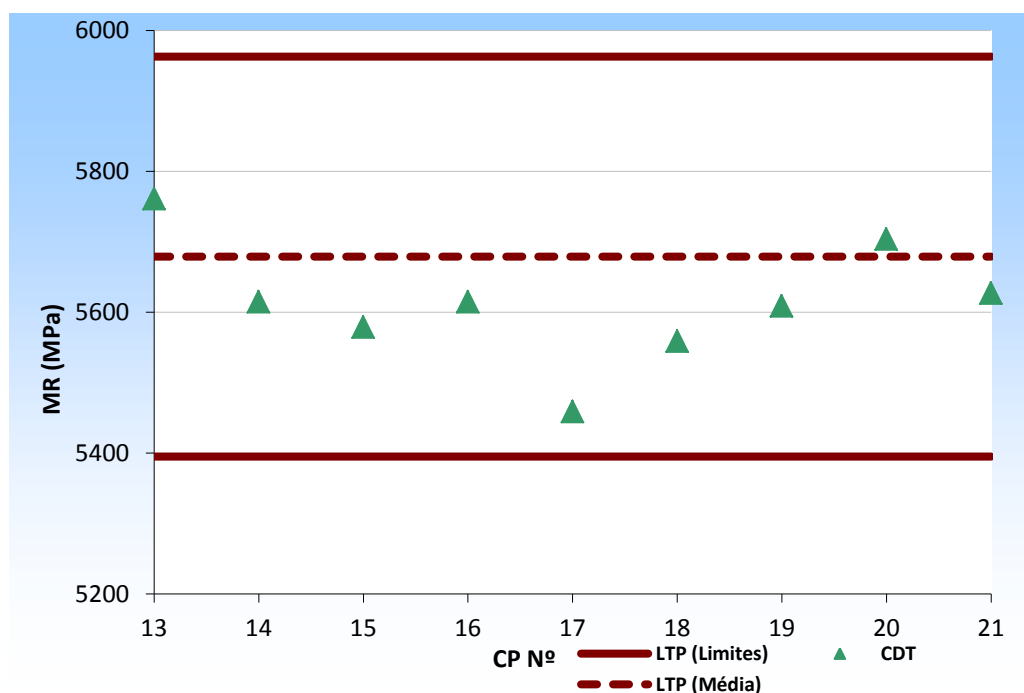


Figura 127 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento total) – SBS 60/85

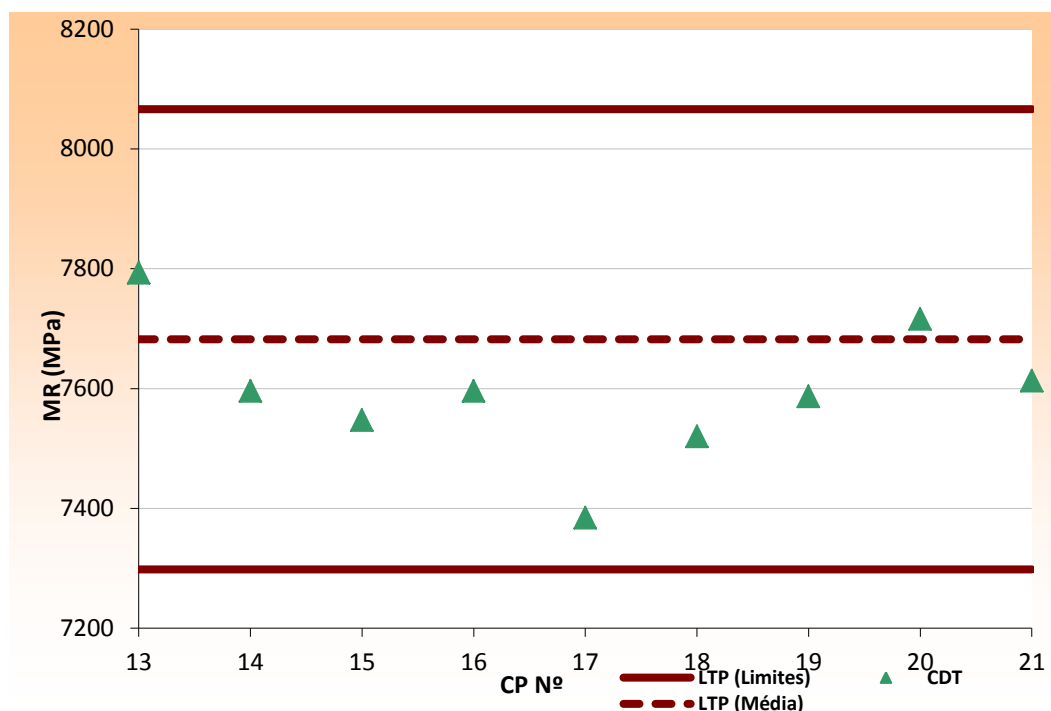


Figura 128 – Comparação dos módulos do CDT e LTP (deslocamento instantâneo) – SBS 60/85

Observa-se que todos os resultados de módulo de resiliência medidos no equipamento do CDT, independente do deslocamento (total ou instantânea) utilizado para cálculo, estão dentro dos limites do LTP, denotando similaridade entre os equipamentos para as misturas asfálticas em questão.

No entanto, quando se compara para a mesma mistura os valores médios de módulos obtidos com o deslocamento total e instantâneo no equipamento do CDT e LTP, há diferenças, essa já é esperada, pois o deslocamento total é maior que o instantâneo, fazendo com que os módulos calculados com esse tenham valores maiores que aquele.

Análise estatística de dados entre equipamentos

Apesar dos resultados comparativos das médias mostrarem que não há diferenças entre os equipamentos do CDT e LTP, foi realizada uma análise estatística dos dados obtidos nos mesmos, para avaliar o nível de confiança (α).

Para testar a igualdade das médias, utilizou-se a análise de variância, usando o teste “F” de Snedecor, o mesmo faz a comparação das variâncias “entre os tratamentos” e “dentro dos tratamentos” da seguinte forma (Calegare, 2009):

$H_0: \sigma^2_E = \sigma^2_R$ (Não existe diferença entre os tratamentos)

$H_1: \sigma^2_E > \sigma^2_R$ (Existe diferença entre os tratamentos)

A variável de teste é a estatística “F” de Snedecor, assim calculada:

$$F_{\text{calc}} = S^2_E / S^2_R$$

Este valor deve ser comparado com o F_{crit} (“F” crítico) obtido para o nível de significância α , com os seguintes graus de liberdade:

Numerador: $\phi_1 = (a - 1)$

Denominador: $\phi_2 = a \cdot (n - 1)$

Sendo: a – n. de tratamentos; e n – n. de elementos em cada tratamento.

A regra de decisão, ao nível α de significância:

Se: $F_{\text{calc}} \leq F_{\text{crit}} \rightarrow$ Aceitar H_0 (Não existe diferença entre os tratamentos);

Se: $F_{\text{calc}} > F_{\text{crit}} \rightarrow$ Rejeitar H_0 (Existe diferença entre os tratamentos).

A Tabela 12, apresenta os resultados da análise para $\alpha = 1\%$.

Tabela 12 – Resultados da análise para $\alpha = 1\%$

CAP	Deslocamento	Fcalc	Fcrit
3045	Total	1,086	8,53
3045	Instantâneo	1,215	
6085	Total	3,042	
6085	Instantâneo	3,036	

Analisando a tabela, verifica-se que $F_{calc} < F_{crit}$ para todos os CAPs. Dessa forma, aceita-se a H_0 , confirmando que não existe diferenças entre os equipamentos, com 99% de confiança.

Conclusões sobre o equipamento de módulo de resiliência

Pelo fato da montagem do equipamento de módulo de resiliência envolver diversos componentes, a mesma foi trabalhosa, principalmente no que se refere ao funcionamento adequado do atuador quanto ao tempo de aplicação do pulso de carga, calibração do LVDT e célula de carga no sistema de aquisição de dados. Porém, o perfeito funcionamento do equipamento foi comprovado com o procedimento adotado pelo LTP com um corpo de prova padrão, mostrando igualdade nos resultados entre as amplitudes do pulso de aplicação de carga e deslocamento.

Comprovou-se também, com os resultados obtidos nas duas misturas (CAP 30/45 e SBS 60/85) testadas em ambos os equipamentos, independente do deslocamento (total ou instantâneo), ficaram dentro dos limites estabelecidos nas normas da ABNT e ASTM.

A análise estatística mostrou que não há diferenças entre os resultados das amostras ensaiadas nos equipamentos do CDT e LTP, apontando 99% de confiança.

9. CONCLUSÕES GERAIS

Neste projeto de pesquisa o principal objetivo foi o desenvolvimento para o CDT – Arteris de equipamento simulador de tráfego de laboratório para previsão de desempenho de misturas asfálticas. Para que o mesmo ocorresse, se fez necessário definir o teor ótimo de algumas misturas asfálticas por diferentes métodos de dosagem, comparando e analisando a sua estrutura interna através do Processamento Digital de Imagens (PDI). Além do mais, foi desenvolvido uma misturadora e um equipamento de módulo de resiliência para auxiliar na determinação de propriedades mecânicas de misturas asfálticas.

O processamento digital de imagens (PDI) apresenta-se como uma ótima ferramenta na avaliação da homogeneidade e isotropia do material após o processo de compactação. Com o PDI é possível verificar a distribuição, orientação e forma dos agregados contidos em uma mistura asfáltica compactada. Apesar de existir uma diversidade de softwares disponíveis no mercado que podem cumprir as tarefas requeridas, nesta pesquisa foi desenvolvida a técnica de captura e de análise de imagens mais apropriada e satisfatória.

Esse projeto contribuiu para equipar o CDT - Arteris com novos equipamentos que auxiliarão no desenvolvimento de futuras pesquisas e projetos de pavimentos rodoviários, onde poderão ser testados materiais de diferentes características, variando o teor de CAP, tipos de granulometrias, avaliando características de desempenho através do simulador de tráfego, bem como características mecânicas através do módulo de resiliência, que servirá de parâmetro na realização e avaliação do dimensionamento estrutural. Os resultados dos testes e procedimentos adotados para aferição dos equipamentos mostraram que os mesmos dentro de suas especificidades estão em conformidade com o proposto.

A montagem e testes dos equipamentos que foram desenvolvidos para o CDT - Arteris, não foi uma tarefa simples. A experiência técnica e prática dos profissionais do CDT, aliada a um local capacitado, com recursos técnicos, experiência no desenvolvimento de equipamentos, e principalmente, em materiais de pavimentação, como o LTP - EPUSP, foi imprescindível. Isso fica evidenciado nesse estudo, pois além de conseguir atingir o grande objetivo, desenvolvimento de equipamento simulador de tráfego de laboratório para previsão de desempenho de misturas asfálticas, todos os esforços e meios necessários foram empregados para que o projeto se realizasse com qualidade, conformidade e confiabilidade.

Todos os objetivos deste projeto de pesquisa foram atingidos plenamente.

10. ENTIDADE OU EQUIPE EXECUTORA

A empresa que coordena os serviços é a PAULISTA INFRAESTRUTURA LTDA associada com:

- Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica da USP, e
- JMCHAVES Consultoria Ltda.

IDENTIFICAÇÃO DOS PARTICIPANTES

- Coordenador Geral: José Mário Chaves - JMChaves
- Equipe LTP/EPUSP:
 - Profa. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci – Professora Titular, Coordenadora do Projeto
 - Edson Moura – Doutor, Técnico Nível Superior
 - Sérgio Copetti Callai – Doutorando, Pesquisador
 - Kamilla L. Vasconcelos – Doutora, Pesquisadora
 - Robson C. da Costa – Técnico Nível Superior
 - André Kazuo – Iniciação Científica
 - Erasmo Alves – Técnico de Laboratório
 - Diomária Rocha dos Santos – Secretária
- Equipe Laboratório da Paulista Infraestrutura:
 - Igor Amorim Beja – Mestrando, Pesquisador
 - Amanda Helena Marcandali Silva – Doutoranda, Pesquisadora
 - Hugo Florêncio – Tecnólogo
 - Vagner Alba – Tecnólogo

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12891:1993. Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. 1993.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15087:2012. Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. 2012
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16018: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão sob carga repetida. 2011.
- AFNOR – ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. NF P 98-253-1: deformation permanente des mélanges hydrocarbonés: partie 1: essai d’orniérage. Paris, 1993b
- Asphalt Institute. The Asphalt Handbook. Manual Series, n 4 (MS-4), 7ª Edição, EUA, 2007.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 340: standard method of test for determining rutting susceptibility of hot mix asphalt using the asphalt pavement analyzer. Washington D.C, 2010. 13 p.
- ASTM D 6931/12. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures. 2012.
- ASTM D 7369/11. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test. 2011.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G, CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro. 2008. 504p.
- Calegare, A. J. A. Introdução ao delineamento de experimentos. 2ª Edição, São Paulo: Blucher, 2009.
- CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO ARTERIS. ARTERIS T 166-10: Massa específica aparente de misturas asfálticas compactadas usando amostras saturadas – superfície seca. São Paulo, 2013.
- CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO ARTERIS. ARTERIS T 209-10: Massa específica teórica máxima e densidade de misturas asfálticas para pavimentação. São Paulo, 2013.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 12697-31: Mélanges bitumineux méthodes d’essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 31: Confection d’éprouvettes á la presse à compactage giratoire. Version Française. Bruxelles, 2003.
- _____. EN 12697-33: Mélange bitumineux: Méthodes d’essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 33: Confection d’éprouvettes au compacteur de plaque. Version française. Bruxelles, 2003.
- DNER-ME-043/95. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Misturas Betuminosas a Quente - Ensaio Marshall, 1995.

- DNIT 135/2010. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, 2010.
- DNIT 136/2010. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, 2010.
- Geller, M. “Compaction equipment for asphalt mixtures”, placement and compaction of asphalt mixtures, ASTM STP 829, F. T. Wagner, Ed. American Society for Testing and Materials, 1984, p. 28-47.
- MASSAD, E.; BUTTON, J. Implications of experimental measurements and analyses of the internal structure of hot-mix asphalt. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, V 1891. Washington, EUA. 2004
- Medina, J.; Motta, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos, Rio de Janeiro, 2005 2ª Edição
- MOTTA, R. dos S., Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.
- MOURA de, E. Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.
- Odda, M., Nakayama, H. Yield Function for Soil with Anisotropic Fabric. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 15(1), 89-104. 1989.
- Sousa, J. B.; Tayebali, A.; Harvey, J.; Hendricks, P.; Monismith, C. L. Sensitivity of Strategic Highway Research Program A-003A Testing Equipment to Mix Design Parameters for Permanent Deformation and Fatigue. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, V 1384. Washington, EUA. 1993.
- VIANNA, A. A. D. Contribuição para o Estabelecimento de um Material Padrão e de Metodologia para Calibração de Equipamentos de Ensaio Dinâmicos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

ANEXO 1 – RESULTADOS DE PDI

1.1. PDI - Resultados com distribuição granulométrica SPV 12,5mm no teor de 4%

A placa moldada para este estudo foi compactada com os agregados graníticos, na distribuição granulométrica SPV 12,5mm, no teor de 4%, segundo o projeto Marshall SPV 12,5mm CDT059/2012. Os valores do vetor magnitude estão apresentados na Tabela 13, onde E01 é a seção inicial da placa e L1 e L2 representam cada lado de uma dada seção, onde se pode observar que todos estão abaixo de 10%, o que indica que o corpo de prova analisado continha uma distribuição de agregados bastante aleatória (randômica), o que significa que a forma de compactação está adequada para a mistura asfáltica em questão.

Tabela 13 – Valores obtidos de vetor magnitude

Seção	Vetor magnitude (%)
E10	5,8
E09 L1	2,2
E09 L2	2,7
E08 L1	4,9
E08 L2	4,5
E07 L1	2,8
E07 L2	4,3
E06 L1	3,0
E06 L2	5,2
E05 L1	3,7
E05 L2	1,7
E04 L1	3,5
E03 L2	2,5
E02 L1	4,8
E02 L2	7,6
E01	1,9

Na Figura 129, o eixo X representa a região de interesse (de acordo com a subdivisão em quadrantes mostrada na Figura 65); o eixo Z representa a seção de corte longitudinal e o lado de cada seção; e o eixo Y representa o percentual relativo à quantidade de partículas que ocorre em cada um dos quadrantes. As partículas referem-se àquelas de dimensão retida na peneira de 4 mm. Ilustrando, a seção E10 tem, em princípio em certo número de partículas maiores que 4mm de diâmetro, que corresponde a 100%. O quadrante 1B apresenta 10% do total das partículas maiores que 4mm da seção E10. Teoricamente, a

média exata de distribuição homogênea é 12,5% de partículas em cada quadrante. Encontrou-se uma média de 10 a 15% de partículas maiores que 4mm por quadrante. Observe-se que houve pequena variabilidade quantitativa de partículas maiores que 4mm, ou seja, de agregados graúdos, demonstrando que o material compactado na mesa tipo LCPC é homogêneo e isotrópico.

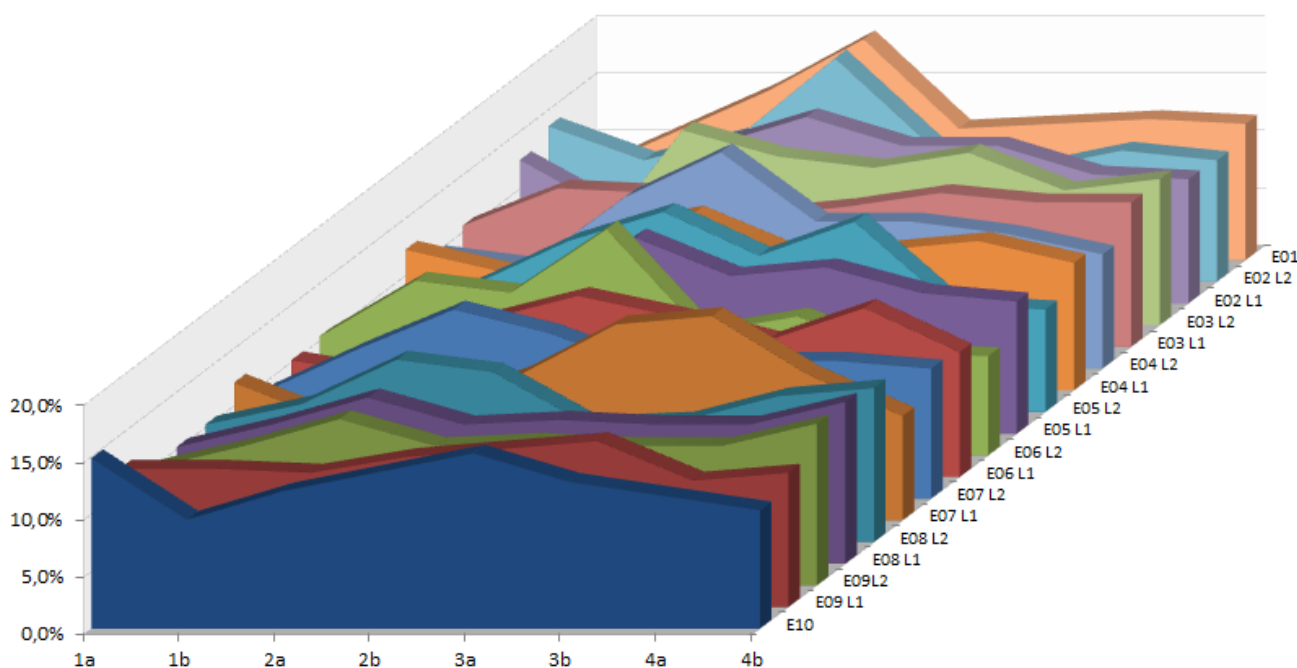


Figura 129 – Distribuição de partículas para placa de 4%, quanto a posição, dentro de cada seção da placa analisada

1.2. Resultados com distribuição granulométrica SPV 12,5mm nos teores de 5% e 6%

Todas as placas foram usinadas e moldadas de acordo com especificado no projeto Marshall SPV 12,5mm CDT059/2012, e também nos teores de 5% e 6%.

Os valores do vetor magnitude, para cada teor de ligante estão apresentados na Tabela 14. O vetor magnitude indica o grau de anisotropia que o material tem, quanto maior o valor (mais próximo a 100%) mais orientado ele será, e de forma oposta, quanto mais baixo o valor maior será sua randomicidade.

Podemos observar que em todas as placas para todos os teores de ligante acima do especificado em projeto, os vetores magnitudes estão abaixo de 10%, indicando que os corpos de prova analisados contem uma distribuição de agregados bastante aleatória (randômica), representando que a forma de compactação está adequada.

Tabela 14 – Valores obtidos de vetor magnitude

Seção	Vetor magnitude	Seção	Vetor magnitude
E10	1,8%	E10	7,9%
E09 L1	8,6%	E09 L1	1,0%
E09 L2	4,5%	E09 L2	2,2%
E08 L1	4,5%	E08 L1	3,5%
E08 L2	3,5%	E08 L2	2,4%
E07 L1	5,6%	E07 L1	7,2%
E07 L2	3,3%	E07 L2	4,2%
E06 L1	6,8%	E06 L1	6,6%
E06 L2	3,0%	E06 L2	1,0%
E05 L1	1,4%	E05 L1	4,6%
E05 L2	3,3%	E05 L2	4,5%
E04 L1	2,4%	E04 L1	4,0%
E04 L2	4,7%	E04 L2	3,6%
E03 L1	3,2%	E03 L1	2,4%
E03 L2	8,7%	E03 L2	3,1%
E02 L1	2,2%	E02 L1	3,8%
E02 L2	4,9%	E02 L2	2,7%
E01	8,9%	E01	3,3%

SPV 12,5mm 5%

SPV 12,5mm 6%

A homogeneidade é avaliada quanto à quantidade de agregados (valores absolutos) em cada seção conforme Figura 130. Esta contagem de agregados é realizada pelo software, em que ele conta partículas maiores que uma dada dimensão, no nosso caso maiores que 4mm (retidos até a peneira de 4mm).

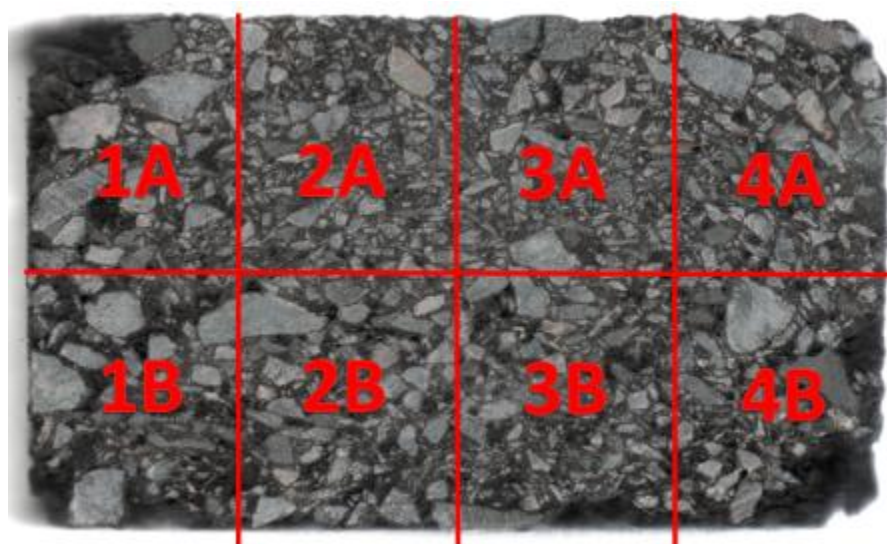


Figura 130 – Divisões em uma seção para avaliar a homogeneidade de cada seção de uma placa

Cada uma das partículas maiores e iguais a 4mm são consideradas e classificadas em cada uma das divisões de cada seção. Então é criado um histograma para que seja possível avaliar esta homogeneidade e comparar entre as placas. As Figuras 131 e 132 mostram o histograma de cada seção para uma placa de 5% e 6%, respectivamente.

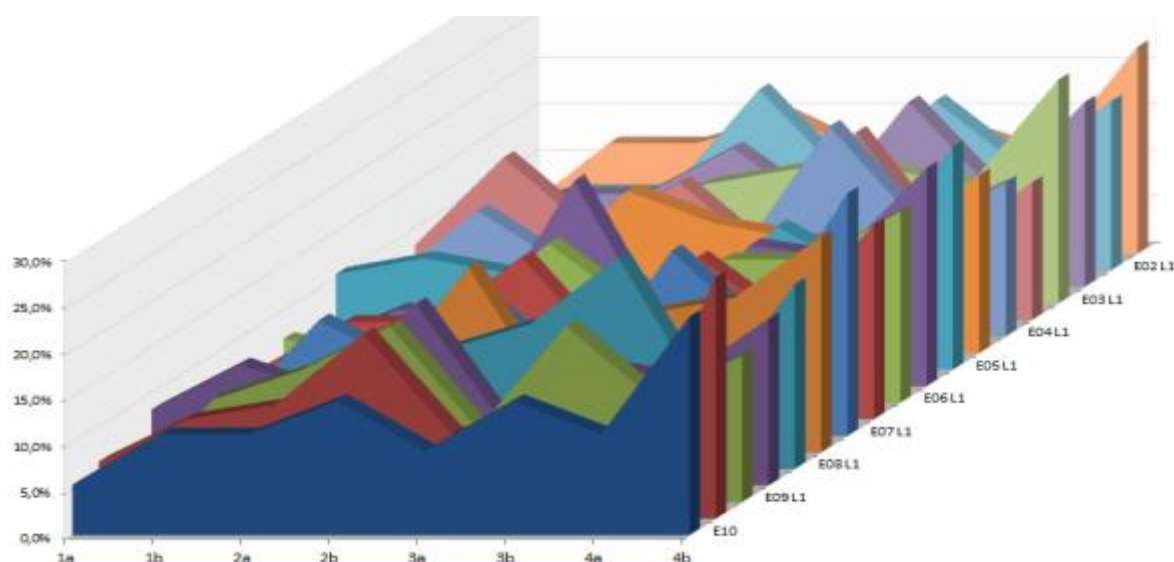


Figura 131 – Distribuição de partículas para placa de 5%, quanto a posição, dentro de cada seção da placa analisada

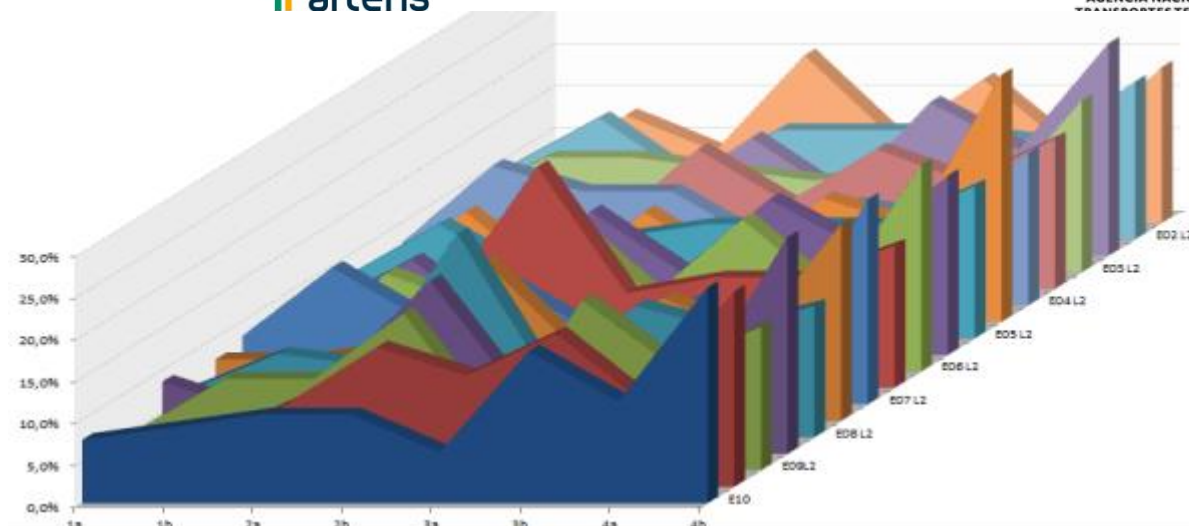


Figura 132 – Distribuição de partículas para placa de 6%, quanto a posição, dentro de cada seção da placa analisada

As figuras dos histogramas mostram a variabilidade da distribuição dos agregados em cada seção, vemos que a variabilidade mesmo que um pouco maior em teores acima de 4%, mesmo assim ainda podendo ser considerados homogêneos.

1.3. Análise detalhada de resultados em todos os teores (4%, 5% e 6%)

Os valores do vetor magnitude, para cada teor de ligante estão apresentados na Tabela 15. O vetor magnitude indica o grau de anisotropia que o material tem, quanto maior o valor (mais próximo a 100%) mais orientado ele será, e de forma oposta quanto mais baixo o valor maior será sua randomicidade. O ideal é que se tenham vetores de magnitude baixos para que os agregados dentro da placa tenham uma boa orientação (randômica) assim podendo considerar que a placa de concreto asfáltico é isotrópica.

Tabela 15 – Valores obtidos de vetor magnitude

SPV 12,5mm 4%	Seção	Vetor magnitude	SPV 12,5mm 5%	Seção	Vetor magnitude	SPV 12,5mm 6%	Seção	Vetor magnitude
	E10	5,8%		E10	1,8%		E10	7,9%
	E09 L1	2,2%		E09 L1	8,6%		E09 L1	1,0%
	E09 L2	2,7%		E09 L2	4,5%		E09 L2	2,2%
	E08 L1	4,9%		E08 L1	4,5%		E08 L1	3,5%
	E08 L2	4,5%		E08 L2	3,5%		E08 L2	2,4%
	E07 L1	2,8%		E07 L1	5,6%		E07 L1	7,2%
	E07 L2	4,3%		E07 L2	3,3%		E07 L2	4,2%
	E06 L1	3,0%		E06 L1	6,8%		E06 L1	6,6%
	E06 L2	5,2%		E06 L2	3,0%		E06 L2	1,0%
	E05 L1	3,7%		E05 L1	1,4%		E05 L1	4,6%
	E05 L2	1,7%		E05 L2	3,3%		E05 L2	4,5%
	E04 L1	3,5%		E04 L1	2,4%		E04 L1	4,0%
	E04 L2	3,7%		E04 L2	4,7%		E04 L2	3,6%
	E03 L1	2,1%		E03 L1	3,2%		E03 L1	2,4%
	E03 L2	2,5%		E03 L2	8,7%		E03 L2	3,1%
SPV 12,5mm 4%	E02 L1	4,8%		E02 L1	2,2%		E02 L1	3,8%
	E02 L2	7,6%		E02 L2	4,9%		E02 L2	2,7%
	E01	1,9%		E01	8,9%		E01	3,3%

Observa-se que em todas as placas usinadas e moldadas no LTP de acordo com o projeto Marshall SPV 12,5mm CDT059/2012, nos teores de 4%, 5% e 6% os vetores magnitudes estão abaixo de 10%, isso significa que o corpo de prova analisado contem uma distribuição de agregados bastante aleatória (randômica), representando uma boa característica para misturas asfálticas, indicando que a forma de compactação está adequada.

Notou-se que na realidade têm-se lados fisicamente iguais, mesmo que não tenham os mesmos valores, são as faces que estão em contato, pois eram unidas (E01-E02L2, E02L1-E03L2, e assim por diante). Com este conhecimento, então foram calculadas as médias para os pares de interesse, e estão apresentados na Figura 133, onde é verificada a anisotropia ao longo das placas, para diferentes teores.

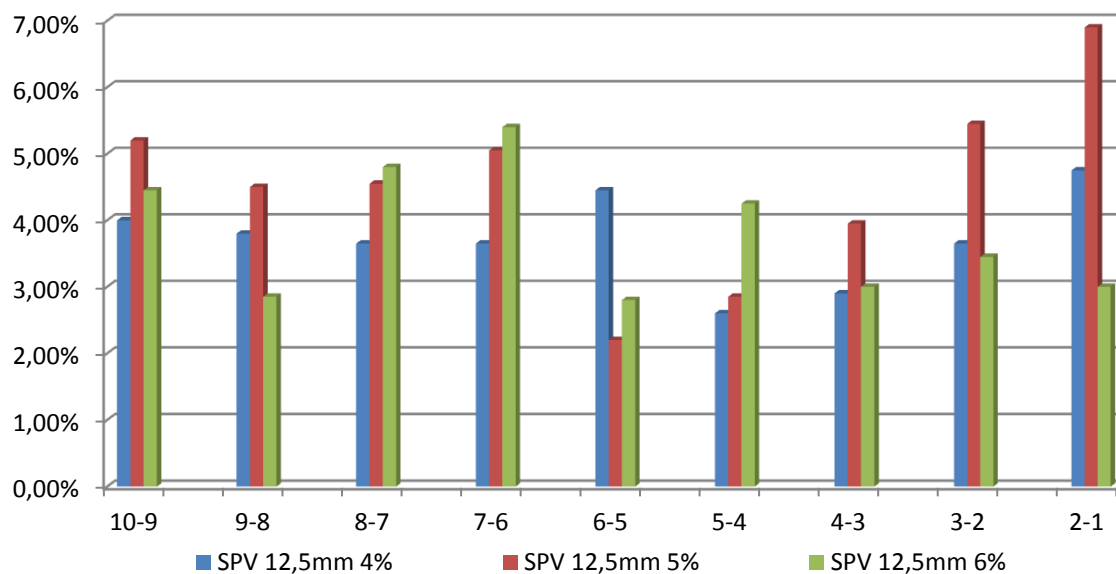


Figura 133 – Anisotropia por pares de imagem para todas as placas

A variação de valores de anisotropia não chega ser relevante, pois mesmo os valores maiores (Tabela 15 e Figura 133) ainda são considerados randômicos e extremamente baixos dentro da escala (0-100%).

O PDI foi desenvolvido nesta pesquisa para corpos de prova produzidos em mesa compactadora tipo francesa, na altura de 10cm. Visto que nem sempre serão executados corpos de prova desta altura, ou mesmo nesta mesa, viu-se a necessidade de ampliar o escopo da técnica para maior variabilidade de corpos de prova.

Com isso foram estabelecidas as áreas de interesse para avaliar a homogeneidade de diversos Corpos de Prova. A determinação das áreas de estudo são importantes pois elas devem ser representativas e é de suma importância de que sejam padronizadas para que possa-se realizar comparações e para que todos realizem o PDI da mesma forma.

Toda descrição das áreas de cada Corpo de Prova, estão apresentadas no Procedimento do PDI (Anexo 2).

1.4. PDI em placas compactadas na mesa compactadora do CDT-Arteris

Foram compactadas placas de misturas asfálticas no equipamento do CDT-Arteris para que fossem comparadas às compactadas no LTP. Importante ressaltar que o compactador do CDT tem a capacidade de compactar misturas asfálticas com volume de vazios final mais baixo. Então, para que pudesse ser realizada uma comparação inicial foi compactada uma placa com volume de vazios semelhante ao compactador francês, no mesmo teor de ligante de 5% e curva granulométrica, de acordo com o projeto já apresentado anteriormente.

Uma seção transversal da placa compactada na mesa compactadora do CDT-Arteris encontra-se apresentada na Figura 134. Os valores do vetor magnitude estão apresentados na Tabela 16, onde E01 é a seção inicial da placa e L1 e L2 representam cada lado de uma dada seção, onde se pode observar que todos estão abaixo de 10%, indicando que o corpo de prova analisado apresentou distribuição de agregados aleatória (randômica).

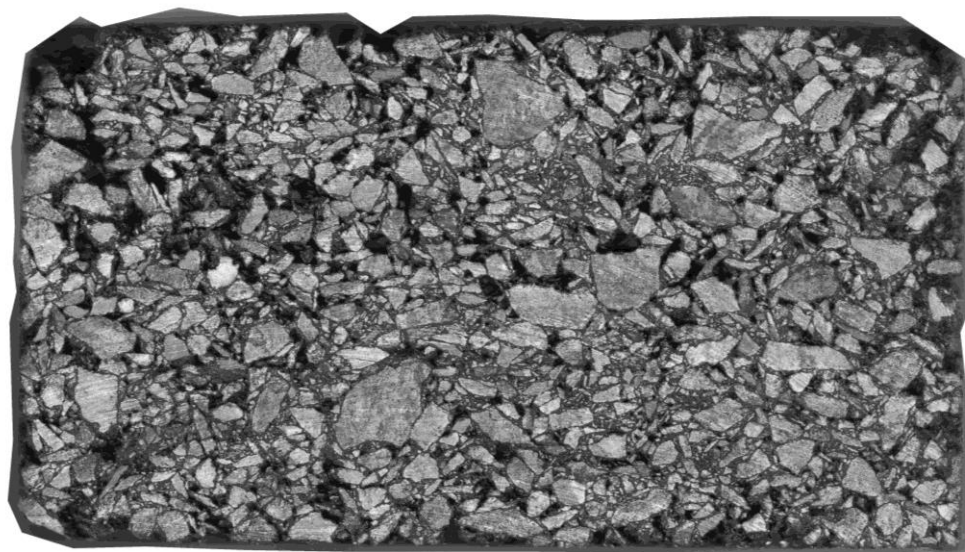


Figura 134 – PDI da placa compactada no CDT

Tabela 16 – Valores obtidos de vetor magnitude (Imagens da placa CDT-Arteris)

Seção	Vetor magnitude
E02 L2	4,30%
E03 L1	7,09%
E07 L2	1,10%
E08 L1	0,59%

A partir das divisões apresentadas na Figura 130, foi criado o histograma para avaliação da homogeneidade de cada seção da placa. Cada uma das partículas maiores e iguais a 4mm foram consideradas e classificadas em cada uma das divisões dessas seção. A Figura 135 mostra o histograma de cada seção para uma placa de 5%.

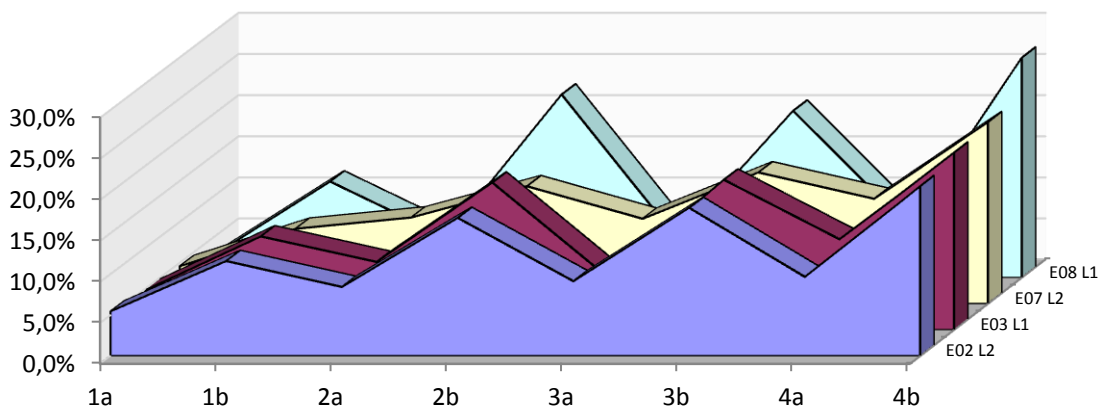


Figura 135 – Resultado de quatro imagens analisadas de placa produzida no CDT-Arteris

Os resultados de PDI mostram que a placa compactada no CDT obteve valores de anisotropia e homogeneidade dentro do aceitável. A anisotropia média ficou em torno de 4% para a placa executada no CDT e 5% para a placa executada no LTP, o que demonstra que as placas podem ser consideradas similares quanto ao estado de compactação e posicionamento e distribuição de agregados (dentro da amostragem investigada).

ANEXO 2 – PROCEDIMENTO DO PDI

MANUAL PARA PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS COM FIJI(IMAGEJ) E ANÁLISE DA ESTRUTURA INTERNA

abril de 2013

O manual foi desenvolvido para projeto da Autopista Régis Bittencourt, com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico - RDT da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT, no projeto respectivo com parceria da USP-LTP e CDT, sendo o documento, parte integrante do relatório V Régis Bittencourt de Abril de 2013.

O presente manual foi desenvolvido pelo doutorando Sérgio Copetti Callai e pelo aluno de Iniciação Científica André Kazuo.

1 APRESENTAÇÃO

Este manual foi desenvolvido com o intuito de apresentar a técnica desenvolvida para análise de imagens de revestimentos asfálticos para avaliação de sua estrutura interna. O manual serve como guia de todo o processo do PDI, desde a captura da imagem, tratamento e por fim análise.

O manual apresenta de forma geral como fazer a captura com recomendações do processo correto. Ainda demonstra passo a passo como proceder com o tratamento da imagem, desde como tomar a escala correta até, por fim, como analisar ela de forma que ela forneça os dados necessário para analisarmos internamente o revestimento.

No manual poderá ser encontrado como proceder com esta análise para diferentes dimensões de corpos de prova.

Por fim ainda é apresentado os códigos das macros do Excel, as quais realizam os cálculos de distribuição, dimensões(peneiras) e de anisotropia.

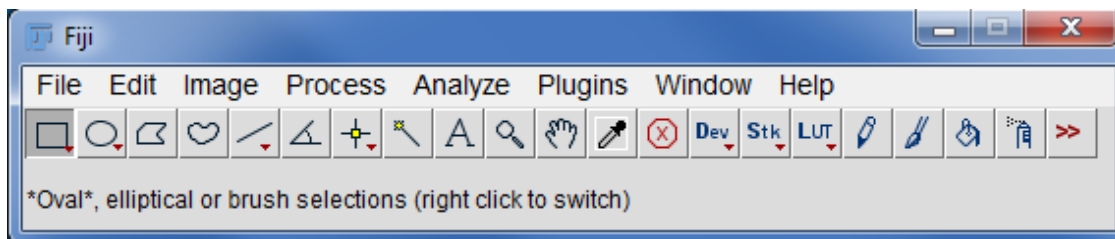
2 SOFTWARE

O *software* utilizado pode ser o ImageJ ou Fiji. O Fiji é uma distribuição com complementos do ImageJ. Todas as imagens aqui contidas serão do Fiji.

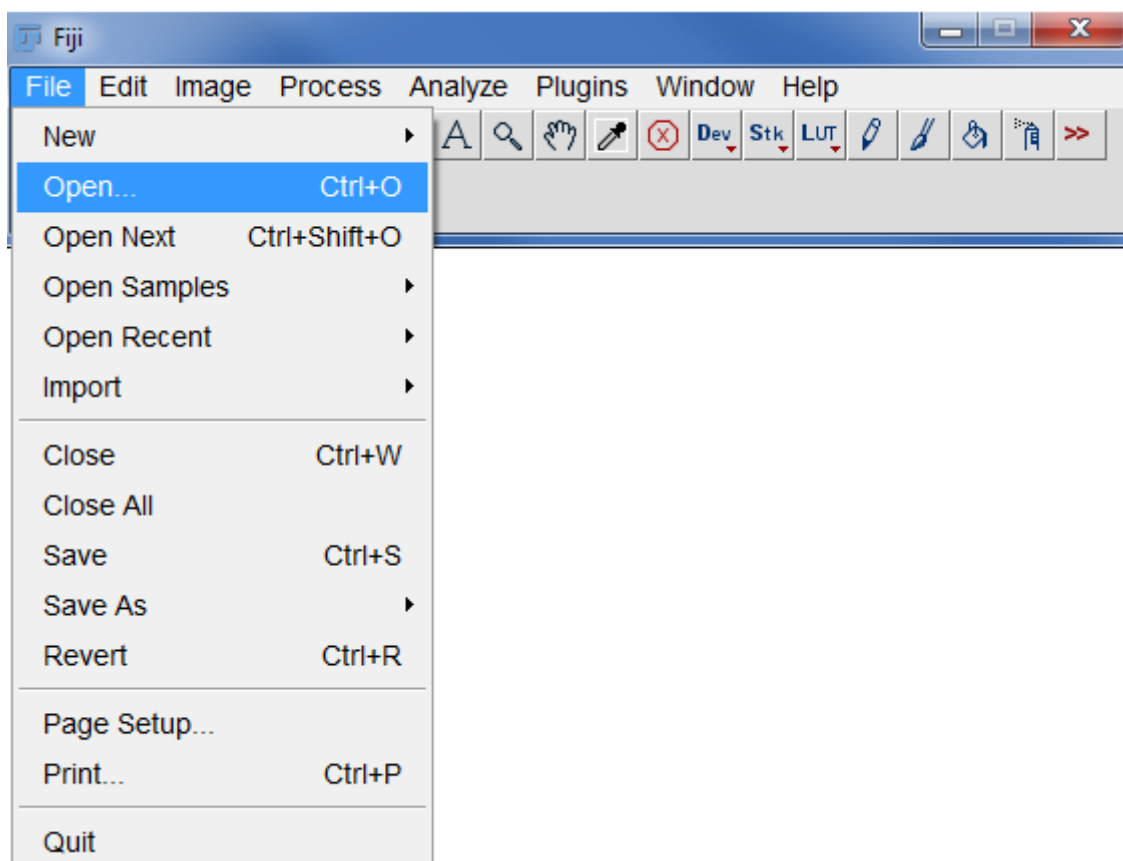
<http://fiji.sc/Fiji> -- Site oficial

OBSERVAÇÃO: É de extrema importância ressaltar que **as imagens devem ser escaneadas com a resolução de 600 dpi**, pois todos os cálculos pré-programados no Excel levam em consideração esta resolução. Logo, se o escaneamento for feito com outra resolução, todos os cálculos se tornarão inválidos.

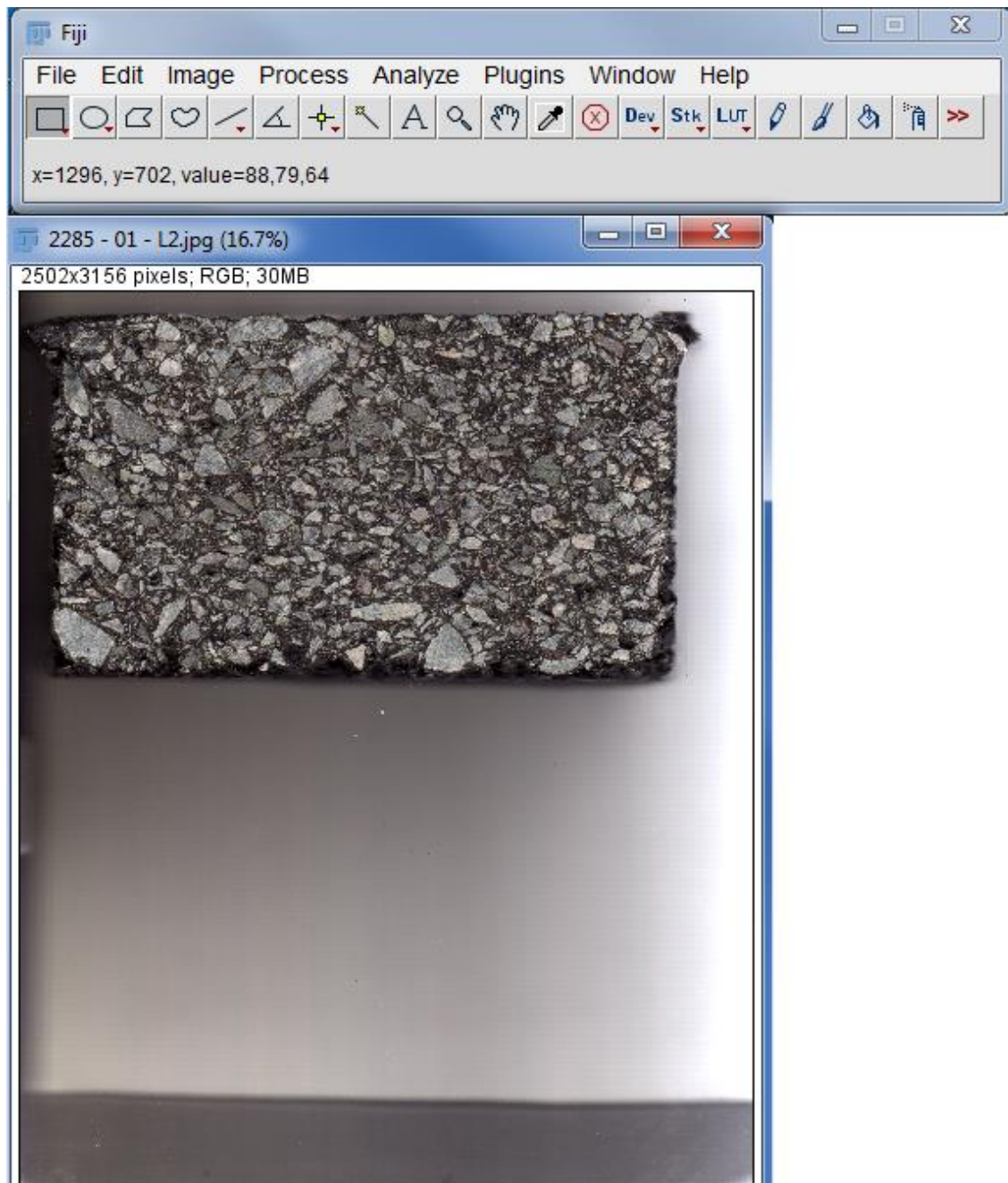
Abrir o Software(FIJI).



Clicar em “File” e abrir pasta onde localizam-se os arquivos de imagem do revestimento em estudo.



Então o arquivo será aberto como na imagem a seguir:

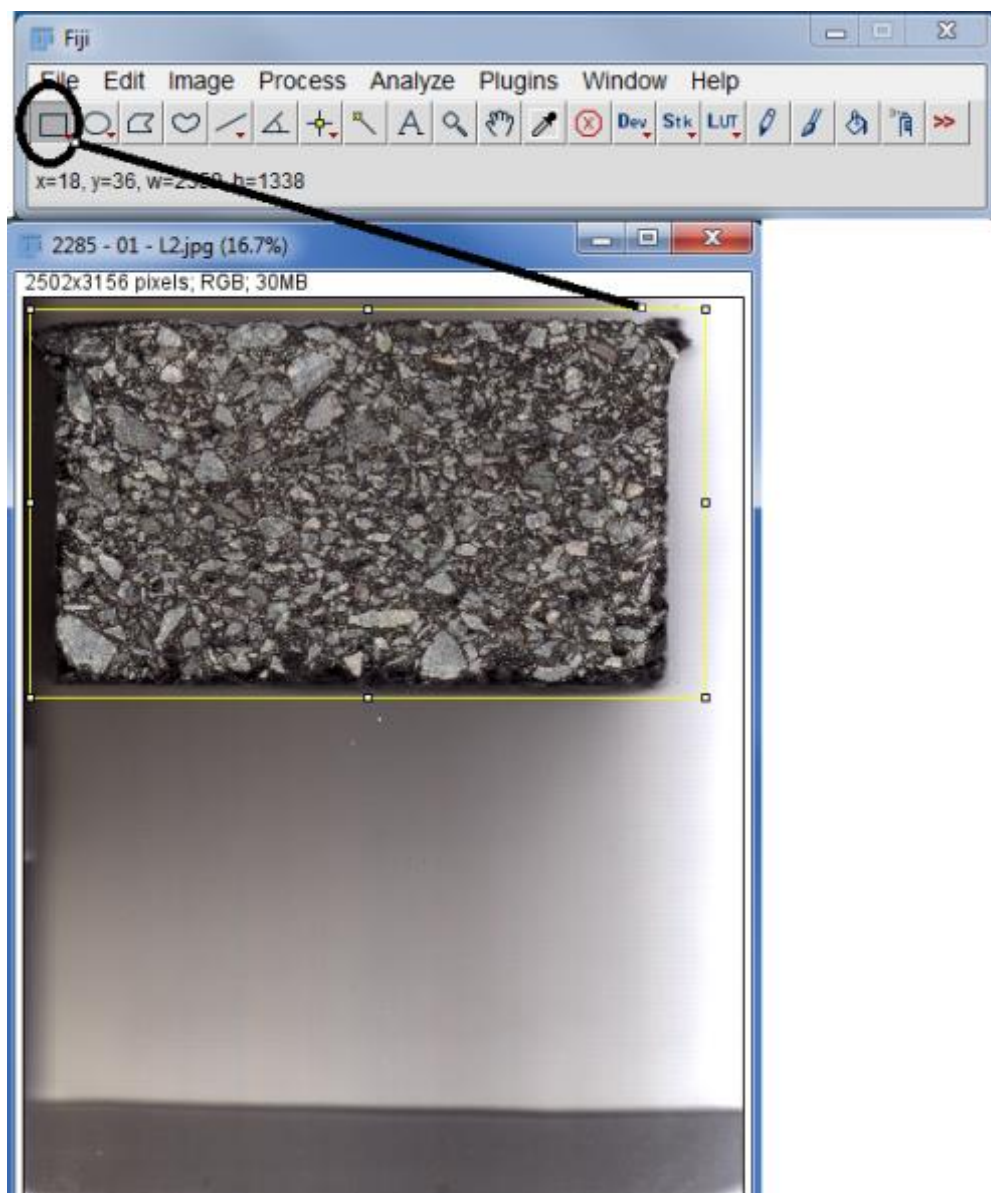


2.1 ESCALA

Nesta imagem devemos selecionar linha(5 botão), marcar dois pontos de interesse que tenhamos medido na realidade. Então selecionamos “Analyze” → “Set Scale”. Nesta janela o valor em pixel foi determinado pela linha que o usuário mediu na tela, e o valor desta linha na realidade é colocado bem como a unidade de interesse.

Como a imagem está com áreas que não nos interessam, temos de recortar apenas a área de interesse.

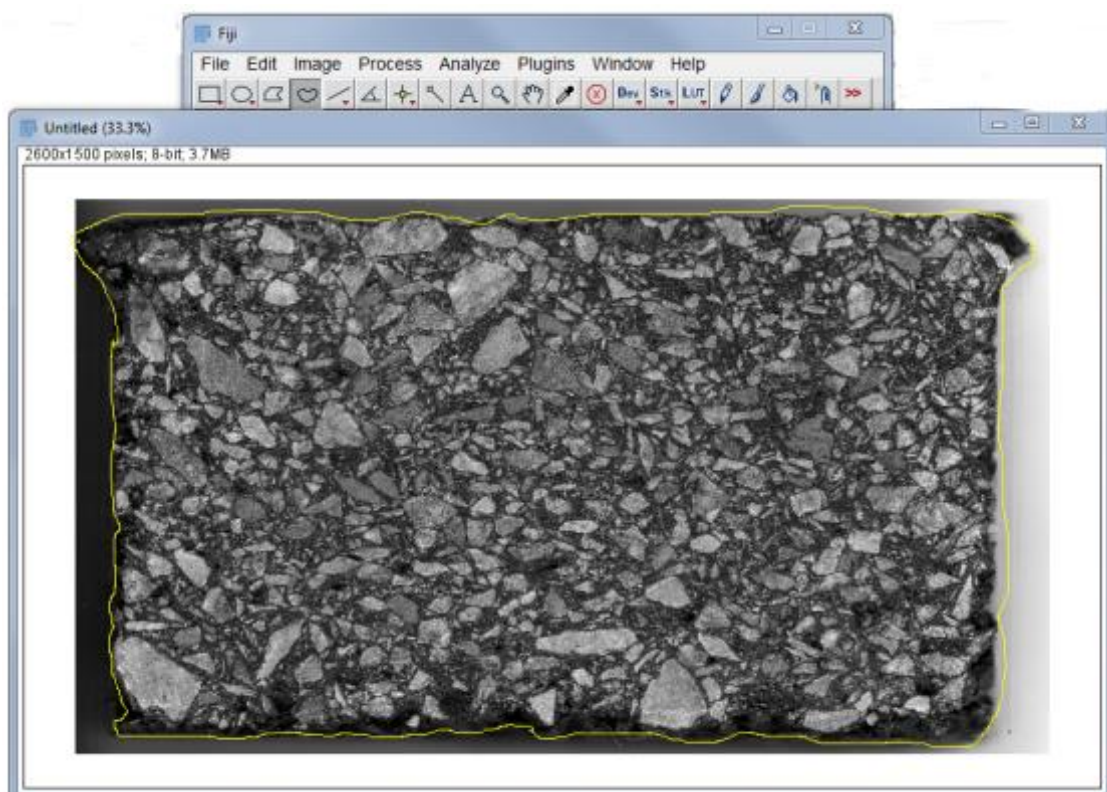
Usando a ferramenta de seleção retangular(ou a mais apropriada para a forma do objeto).



Cortando objeto e colando em uma arquivo novo(para abrir um arquivo novo, clicar em file e new).

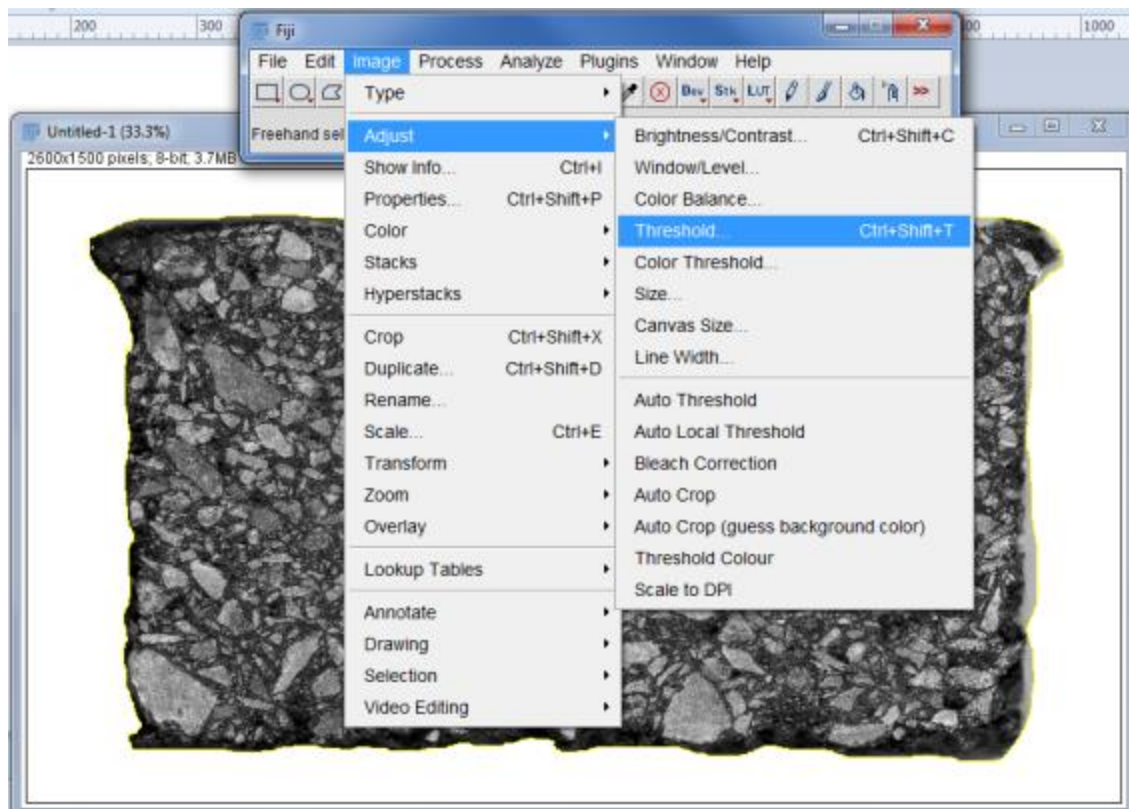
Importante que o objeto novo deve ter tamanho mínimo que é determinado pela “w” e “h” do corte da imagem(w=2350, h=1338, como no exemplo)

Utilizando a ferramenta FreeHand, selecionamos apenas o revestimento (área de interesse).

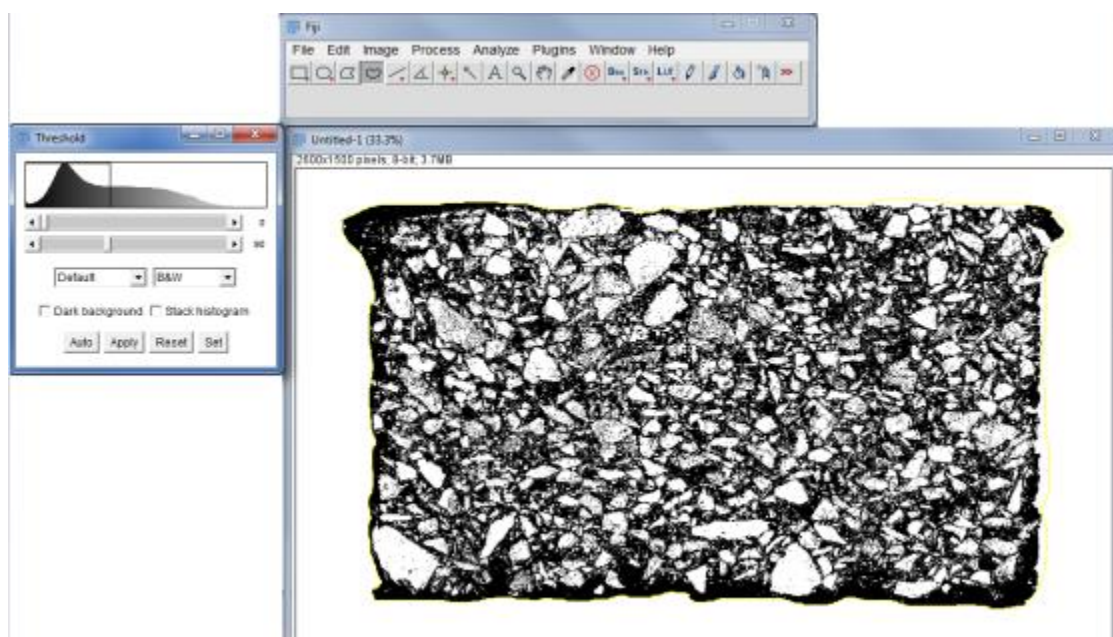


2.2 CONVERSÃO EM BINÁRIA (THRESHOLD)

Com a imagem já no tamanho correto, devemos ajustar o threshold. Esta ferramenta de ajuste tornará a imagem em preto e branco, onde buscaremos que os agregados sejam (brancos ou pretos) e o ligante e fundo seja da cor oposta.



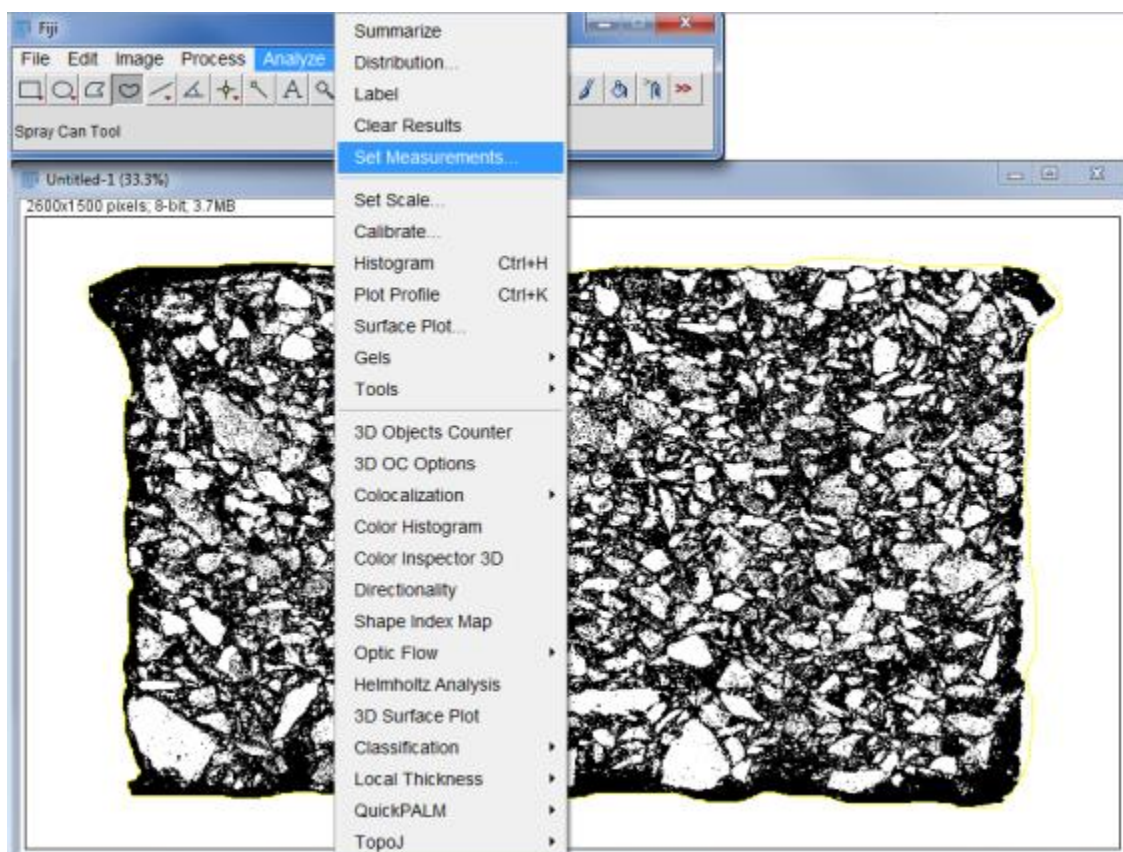
O threshold apresenta um histograma, onde podemos determinar o ponto de corte entre 255 tons de cinza, este ponto de corte será o que determinará o que será branco (agregado ou ligante) e preto(o que não for branco)



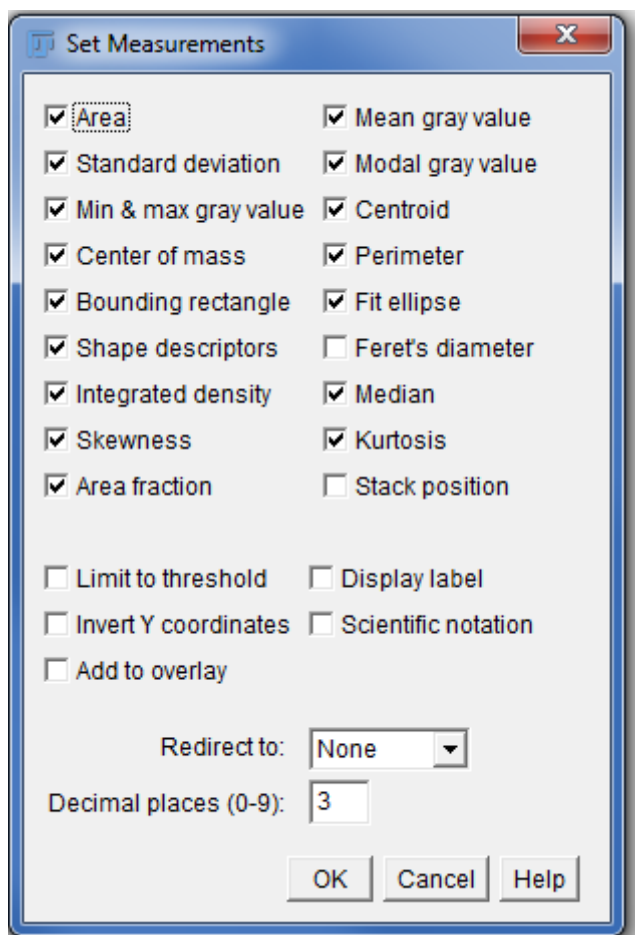
Agora é necessária uma série de correções visando separar agregados uns dos outros. Para isso utiliza-se a lápis(botão do lápis).

Primeiro Clicar com o botão direito no símbolo do lápis, e colocar diamentro do lápis de 4 pixels.

Uma vez a imagem pronta para análise devemos escolher quais são as medidas e analises que o software deve fazer.



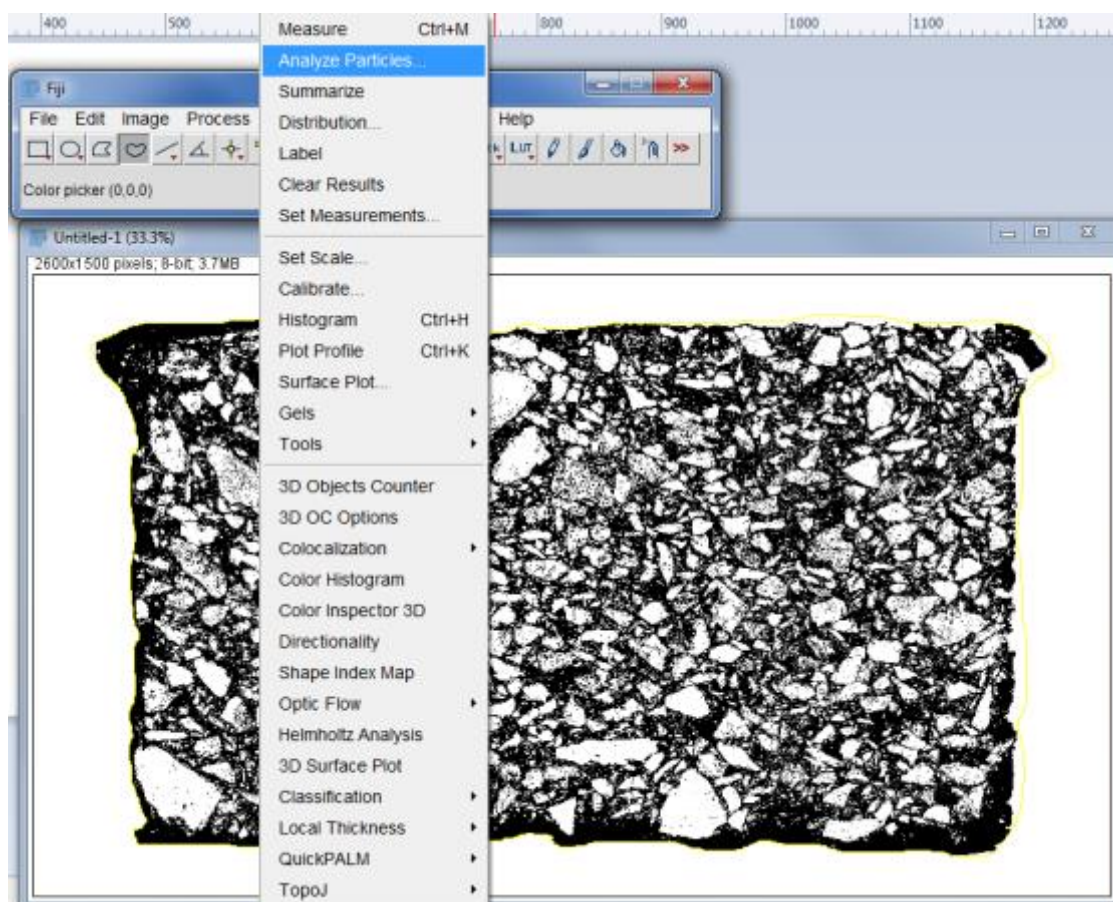
Ao selecionarmos “set Measurements” abrira uma nova janela.



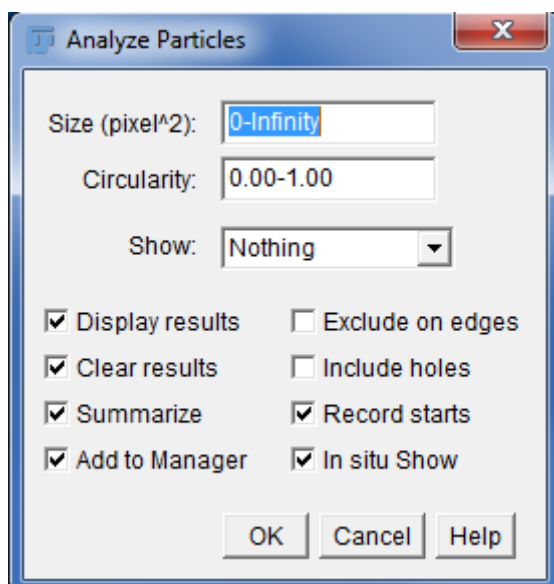
Onde o usuário deve deixar as áreas marcadas no exemplo marcadas no seu software.

2.3 ANÁLISE DE PARTÍCULAS

Uma vez todos os passos tomados, a imagem no tamanho correto, com escala correta, com as medições que queremos sinalizadas, e os agregados corrigidos com o lápis, pode realizar a análise de partículas.



Ao clicarmos em “Analyze Particles” uma nova janela abrirá, como na imagem abaixo.



Aqui deve-se determinar o tamanho mínimo em área(Pixel 2 ou mm 2), o tamanho mínimo recomendado pela experiência fica em torno de 4mm 2 e tamanho máximo não é necessário.

Clicando em “OK” a análise será feita e uma vez que ele liste os dados obtidos, este arquivo de dados deve ser salvo com mesmo nome da imagem, e posteriormente aberto em Excel.

3 ANÁLISE DOS DADOS

3.1 Preparação para os cálculos

Tendo em mãos os arquivos Excel, com os dados de todas as imagens de uma mesma placa asfáltica, é necessário reuni-los em um arquivo único, para eventual comparação de informações entre os corpos de prova que compõem tal placa. (O arquivo único Excel, está anexado na pasta do manual).

O arquivo Excel é constituído de uma macro, que possibilita a separação dos agregados por peneira (12,5 / 9,5 / 4,75 / 2,00), calcula o valor da anisotropia e fornece a distribuição de agregados pela face do corpo de prova. Para que a macro possa calcular e utilizar as informações de forma correta, é fundamental que os seguintes dados estejam presentes nesta ordem, exatamente:

- # Partícula / Área / X / Y / XM / YM / Perim. / BX / BY / Width / Height / Major / Minor / Angle / Circ. / %Area / AR / Round / Solidity / XStart / YStart.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	Centroide em mm																			Centroide em Pixel	
2	# Partícula	Area	X	Y	XM	YM	Perim.	BX	BY	Width	Height	Major	Minor	Angle	Circ.	%Area	AR	Round	Solidity	XStart	YStart
3	1	77.033	50.474	15.755	50.474	15.755	54.585	40.940	13.162	20.171	5.470	21.108	4.647	179.512		100	4.543	0.220	0.826	535	154
4	2	25.780	79.684	15.407	79.684	15.407	23.791	74.957	13.248	9.573	4.274	8.591	3.821	0.996		100	2.249	0.445	0.901	924	155
5	3	8.598	104.713	15.284	104.713	15.284	15.199	102.137	13.846	4.530	3.077	4.368	2.506	173.521		100	1.743	0.574	0.834	1226	162
6	4	29.564	161.068	16.567	161.068	16.567	26.029	156.325	13.932	8.889	5.214	8.407	4.478	12.243		100	1.878	0.533	0.865	1879	163
7	5	7.305	70.459	15.913	70.459	15.913	14.394	68.291	14.103	4.017	3.248	3.791	2.454	23.761		100	1.545	0.647	0.776	828	165
8	6	140.354	180.758	20.406	180.758	20.406	52.515	171.026	14.188	17.179	13.504	15.673	11.402	172.424		100	1.375	0.727	0.934	2095	166

Vale observar que apesar do parâmetro “Circ.” estar presente, a coluna de dados deve estar vazia, pois será utilizada como auxílio para o cálculo da anisotropia, posteriormente.

Além disso, para que a separação por peneiras, realizada pela macro, possa ser feita corretamente, somente as colunas MAJOR e MINOR, devem apresentar o símbolo “.” (ponto final). Isto porque para o Excel, o símbolo “.” é separador de decimal e não de milhar, diferentemente do Fiji (veja imagem abaixo).

	J	K	L	M	N	O
	Width	Height	Major	Minor	Angle	Circ.
2	5,556	2,564	4.533	1.832	-13,666	0,397
8	6,838	3,077	6.341	2.504	-7,483	0,526
9	4,103	2,564	3.391	2.351	-0,214	0,608
9	5,556	2,65	4.896	1.583	-18,295	0,342
13	2,735	2,564	2.482	2.207	-18,315	0,746
8	3,675	1,960	3.550	1.582	1,149	0,509
17	5,641	3,55	5.397	2.246	-19,246	0,411
16	2,564	2,137	2.624	2.077	-20,157	0,873
2	2,65	2,821	2.412	2.186	-67,306	0,698
17	2,65	2,222	2.566	2.113	25,054	0,756
15	4,53	2,564	4.139	2.490	1,978	0,67
11	3,59	4,355	5.082	1.592	54,451	0,387
11	5,128	3,932	4.414	2.986	-9,387	0,578
11	3,077	2,821	3.399	2.036	-38,217	0,736
11	4,103	2,340	3.399	2.036	-38,217	0,736

3.2 Cálculos e classificação

Com toda a tabela de dados preenchida, basta clicar no ícone “Cálculos”.

AD	AE		AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
Classificação	Anisotropia geral		1a	11					
			1b	12					
			2a	21					
			2b	22					

Calculos

O valor da anisotropia aparecerá automaticamente:

ção	Anisotropia geral		
	$\Delta = 1/M [(\sum_{k=1}^m \cos^2[\theta^k])]$	1b	12
		2a	21
		2b	22
		3a	31
		3b	32
		4a	41
		4b	42
	5,6%		

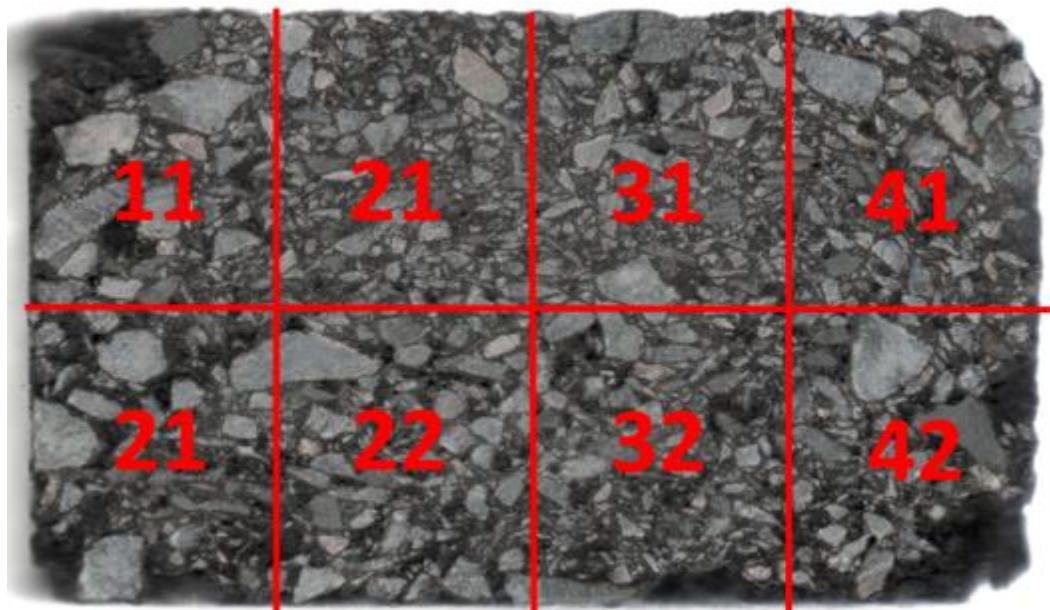
Porém, todas as vezes em que o botão “Cálculos” for pressionado, a coluna com os valores de “Angle” irá se alterar. Por outro lado, uma cópia com os valores originais será feita automaticamente na coluna adjacente, que até então encontrava-se vazia. Dessa forma, caso seja necessário realizar os cálculos novamente, basta resgatar os dados da coluna ao lado.

O botão “Cálculos” também irá gerar a classificação de cada agregado por peneira, juntamente da posição em que ele se encontra no corpo de prova.

	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
	Classificação	Peneira 12,5	Classificação	Peneira 9,5	Classificação	Peneira 4,75	Classificação	Passante 4,75	Classificação
4	21								
5	31								
2	41							4.478	41
3	21								
5	41			11.402	41	11.402	41	11.402	41
6	41					6.647	41	6.647	41
9	31								
1	11								
3	21								
7	11								
1	31					8.022	31	8.022	31
2	41								
3	11					5.434	11	5.434	11
8	41								
7	31								
8	41			10.837	41	10.837	41	10.837	41
8	11								

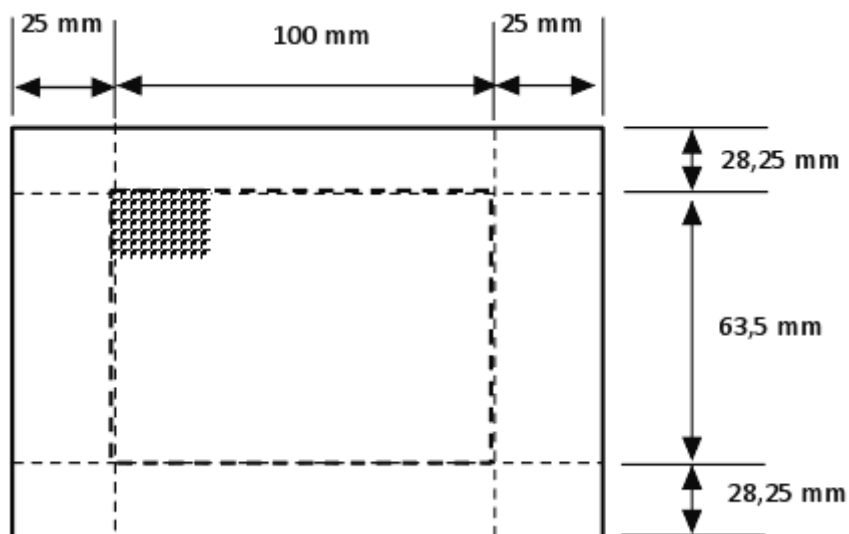
Os agregados passantes da peneira 2,00mm não serão utilizados, como recomendados pela experiência. Por este motivo, a coluna destacada apresenta lacunas, que correspondem a esses valores.

Vale observar que esta classificação está sendo feita considerando um CP da placa de 10cm, com a seguinte divisão de áreas:

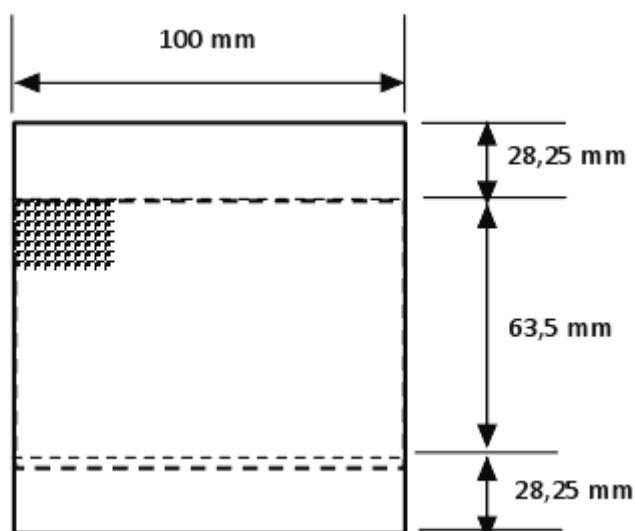


Logo, como as áreas são diferentes para cada corpo de prova, a explicação do código será feita separadamente. O uso do CP da placa de 10cm foi feito apenas como exemplo.

Veja abaixo, outros exemplos de separação de área para diferentes tipos de corpo de prova:



Superpave de 150mm (divisão com 9 áreas)



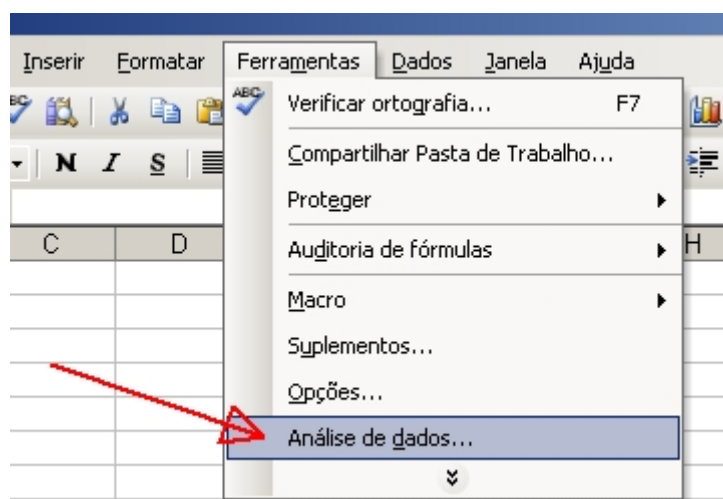
Superpave de 100mm (divisão com 3 áreas)

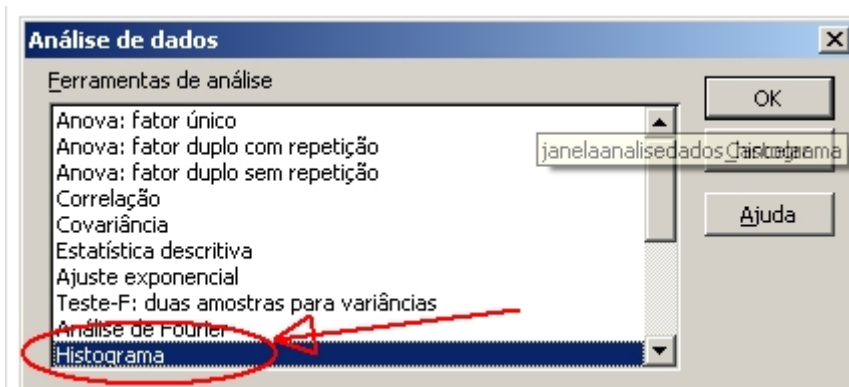
O código pré-programado do Excel fará a classificação e os cálculos para os CP's: Superpave 100mm, Superpave 150mm, Marshall, CDT, CP da placa de 10cm e da placa de 5cm.

3.3 Construção do histograma

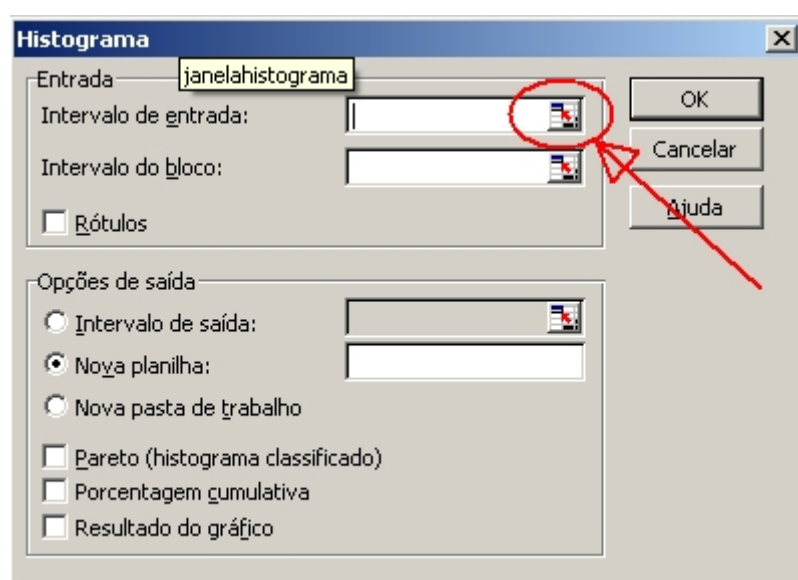
Para a construção do histograma é necessário seguir uma sequência de passos.

Abrir “Ferramentas” → “Análise de Dados” → “Histograma”:





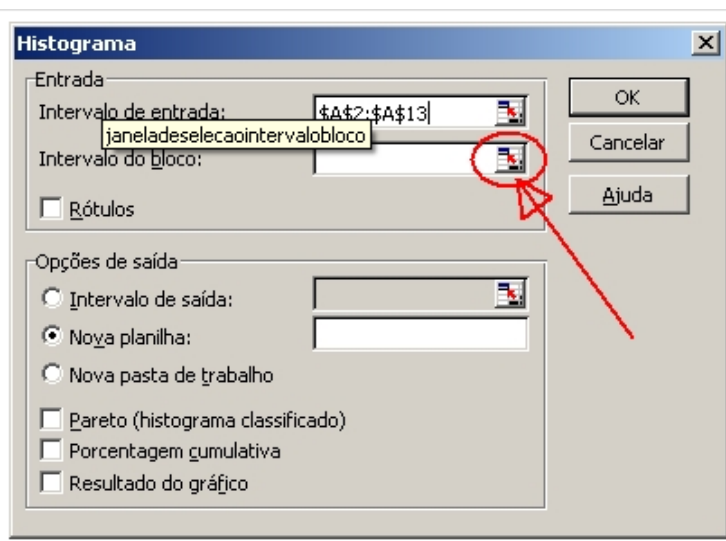
Abrirá uma nova janela. Será necessário alimentar primeiramente com o “Intervalo de entrada”:



O intervalo de entrada está destacado em vermelho e abrange todos os dados e não somente os que aparecem na figura abaixo:

	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
	Classificação	Peneira 12,5	Classificação	Peneira 9,5	Classificação	Peneira 4,75	Classificação	Passante 4,75	Classificação
4	21								
5	31								
2	41							4.478	41
3	21								
5	41			11.402	41	11.402	41	11.402	41
6	41					6.647	41	6.647	41
9	31								
1	11								
3	21								
7	11								
1	31					8.022	31	8.022	31
2	41								
3	11					5.434	11	5.434	11
8	41								
7	31								
8	41			10.837	41	10.837	41	10.837	41
8	11								

Em seguida, alimentamos com o “Intervalo do bloco”:



a geral		
	1a	11
	1b	12
	2a	21
	2b	22
	3a	31
	3b	32
	4a	41
	4b	42

O “Intervalo do bloco” está destacado em vermelho.

Em seguida escolhemos aonde o histograma será “impresso”, podendo ser na própria planilha ou em outra planilha, obtendo assim a seguinte tabela:

Bloco	Frequência
11	6
12	10
21	5
22	9
31	9
32	9
41	8
42	13
Mais	0

Efetuada este mesmo procedimento para todas as imagens, serão obtidos diversos histogramas que poderão ser usados para a construção de gráficos que permitem com

4 CÁLCULOS PARA DIFERENTES CP'S

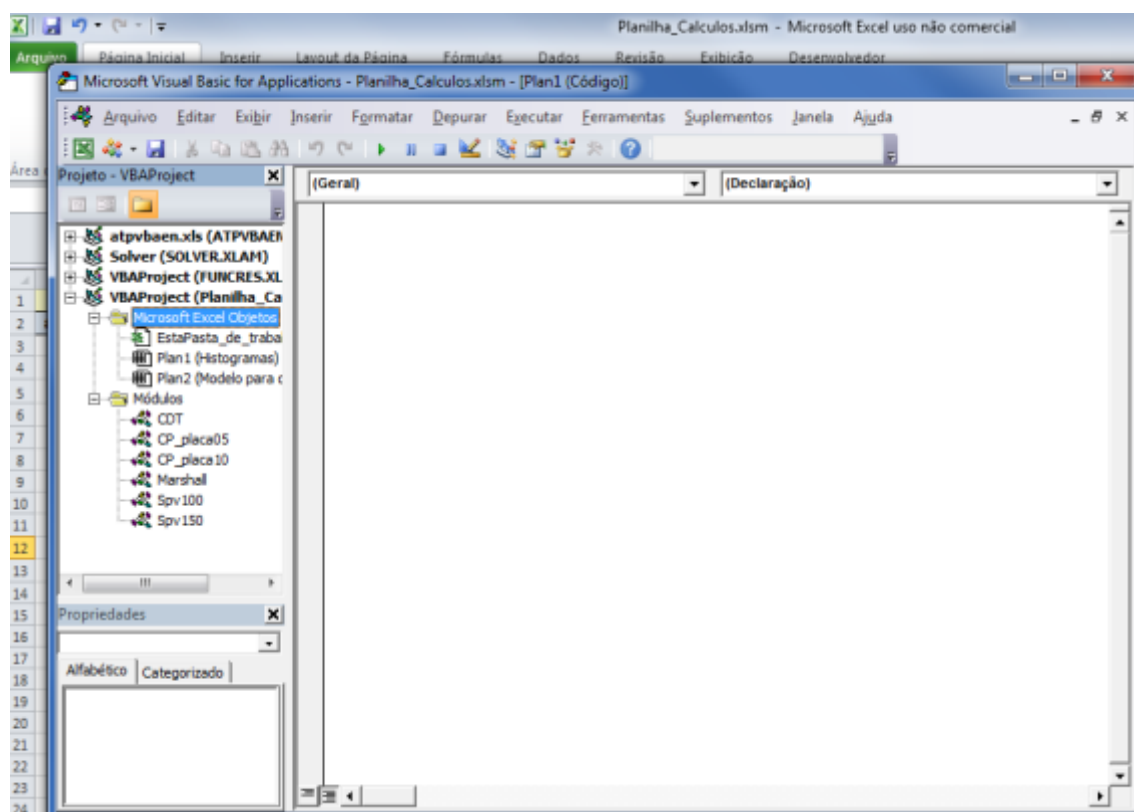
É importante ressaltar que a macro foi alterada para atender cada corpo de prova separadamente. Como foi mencionado no início do Manual, a resolução das imagens escaneadas é fundamental. Imagens com resoluções diferentes de 600 dpi apresentarão resultados errados, uma vez que os códigos são feitos considerando a resolução em questão.

Sabendo que o método de determinar o valor da Anisotropia e o método de separação por peneira são os mesmos para todos os tipos de corpo de prova, os seus códigos estarão presentes somente no primeiro exemplo, sendo assim implícito para todos os outros.

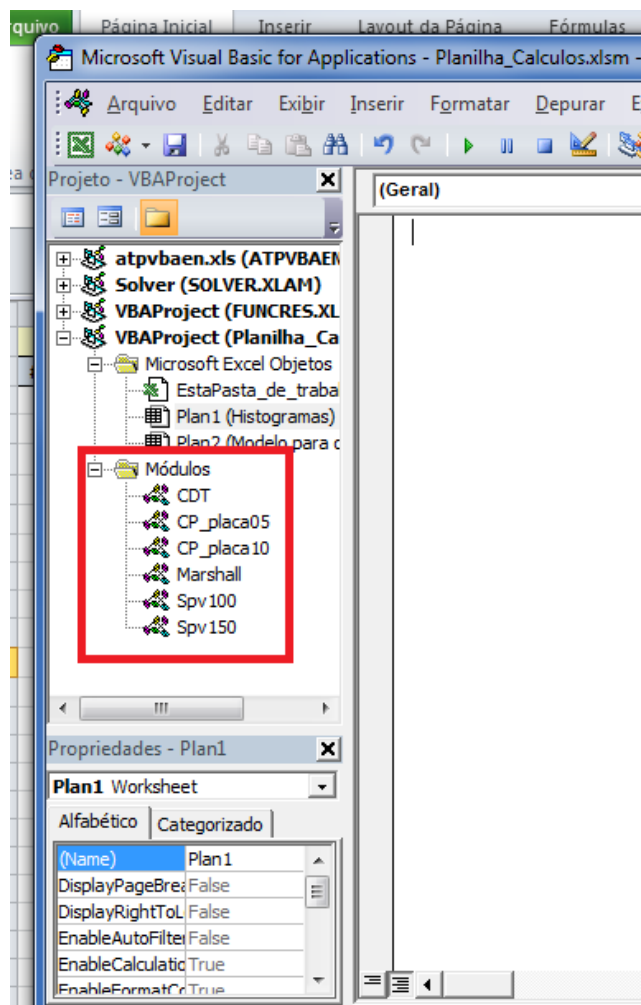
Como os cálculos do arquivo Excel usarão os centros de massa em Pixels (XStart e YStart estão em pixels e X e Y estão em milímetros) é importante certificar-se de que os valores de XStart e YStart estão corretos e em suas respectivas colunas. O uso do centro de massa de cada agregado em pixels, garante uma maior precisão nos cálculos.

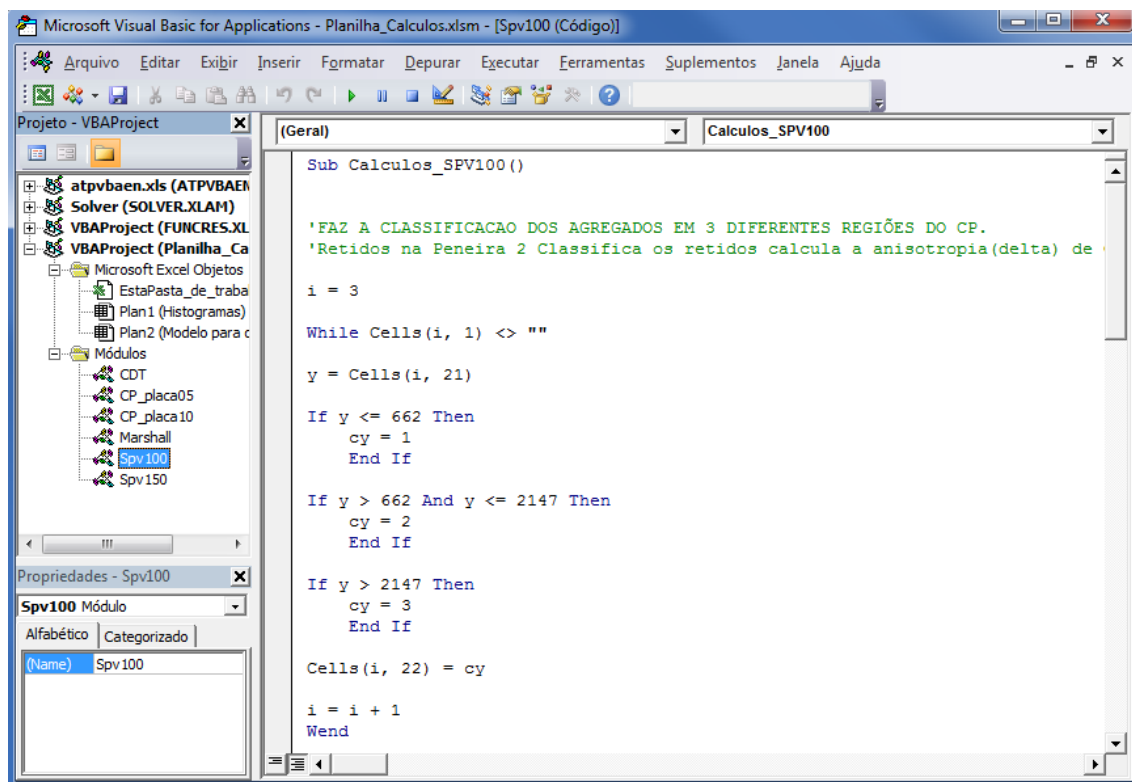
Caso seja necessário abrir os códigos no arquivo Excel, basta seguir uma sequência de passos.

Com o arquivo Excel aberto, pressione “ALT + F11” e uma nova janela se abrirá:



Basta clicar duas vezes no módulo desejado(CDT, CP_placa05, CP_placa10, Marshall, Spv100 ou Spv150) para abrir o código da macro:

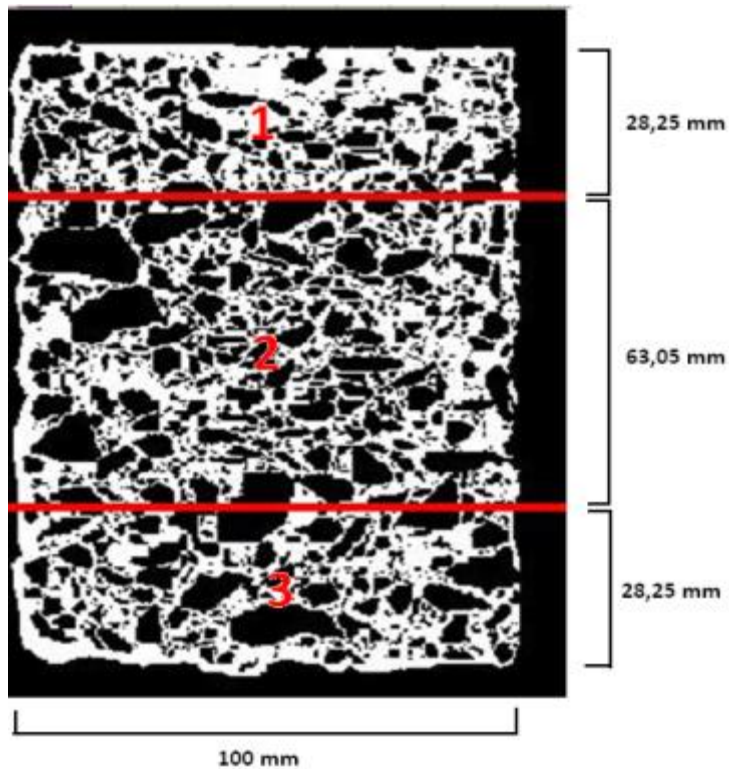




4.1 Superpave 100 mm



Corte transversal do Superpave 100mm



Divisão do CP em 3 regiões distintas após processar a imagem digitalmente

Código da Macro "Cálculos_SPV100":

Sub Calculos_SPV100()

'FAZ A CLASSIFICACAO DOS AGREGADOS EM 3 DIFERENTES REGIÕES DO CP.

'Retidos na Peneira 2. Classifica os retidos calcula a anisotropia(delta) de Oda e Nakayama(massas)

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

Y = Cells(i, 21)

If Y <= 662 Then

cy = 1

End If

If Y > 662 And Y <= 2147 Then

cy = 2

End If

If Y > 2147 Then

cy = 3

End If

Cells(i, 22) = cy

i = i + 1

Wend

'FAZ A CLASSIFICACAO DOS AGREGADOS POR PENEIRA

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

If Cells(i, 13) >= 12500 Then

Cells(i, 23) = Cells(i, 13)

Cells(i, 24) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 23) = ""

End If

If Cells(i, 13) < 12500 And Cells(i, 13) >= 9500 Then

Cells(i, 25) = Cells(i, 13)

Cells(i, 26) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 25) = ""

End If

If Cells(i, 13) < 9500 And Cells(i, 13) >= 4750 Then

Cells(i, 27) = Cells(i, 13)

Cells(i, 28) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 27) = ""

End If

If Cells(i, 13) <= 4750 And Cells(i, 13) >= 2000 Then

Cells(i, 29) = Cells(i, 13)

Cells(i, 30) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 29) = ""

End If

i = i + 1

Wend

' FAZ O CALCULO DA ANISOTROPIA

' O calculo gera um valor de 0-1, sendo 0 para agregados completamente randômicos na distribuição e 1 quando há uma grande orientação

m = 0

soma1 = 0

soma2 = 0

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

If Cells(i, 14) > 90 Then

Cells(i, 14) = Cells(i, 14) - 180

End If

m = m + 1

*soma1 = soma1 + Cos(2 * Cells(i, 14))*

*soma2 = soma2 + Sin(2 * Cells(i, 14))*

i = i + 1

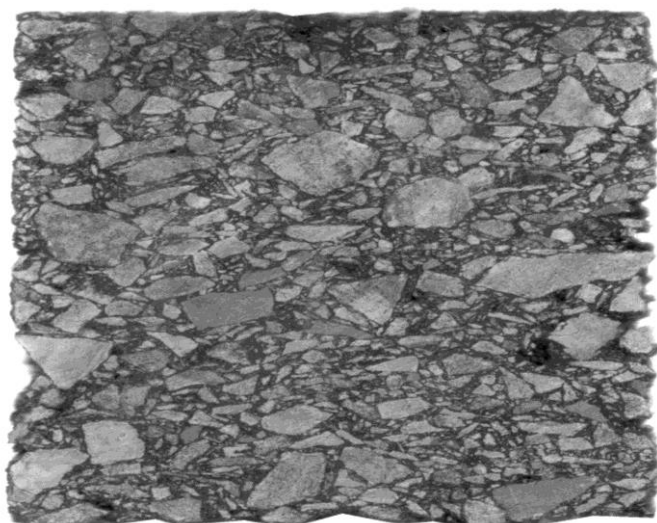
Wend

*Delta = Sqr((soma1 * soma1) + (soma2 * soma2)) / m*

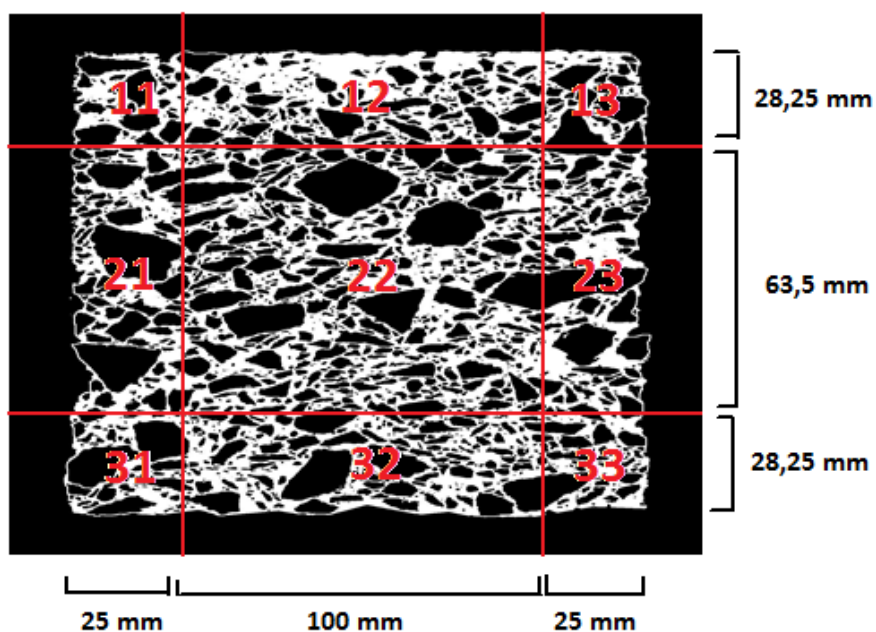
Cells(12, 31) = Delta

End Sub

4.2 Superpave de 150mm



Corte transversal do Superpave de 150 mm



Código da macro "Calculos_SPV150":

Sub Calculos_SPV150()

' FAZ A CLASSIFICACAO DOS AGREGADOS EM 9 DIFERENTES REGIÕES DO CP.

' Retidos na Peneira 2. Classifica os retidos calcula a anisotropia(delta) de Oda e Nakayama(massas)

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

$X = \text{Cells}(i, 20)$

$y = \text{Cells}(i, 21)$

If $y \leq 662$ Then

$cy = 1$

End If

If $y > 662$ And $y \leq 2147$ Then

$cy = 2$

End If

If $y > 2147$ Then

$cy = 3$

End If

If $X \leq 585$ Then

$cx = 10$

End If

If $X > 585$ And $X \leq 2925$ Then

$cx = 20$

End If

If $X > 2925$ Then

$cx = 30$

End If

$\text{Cells}(i, 22) = cx + cy$

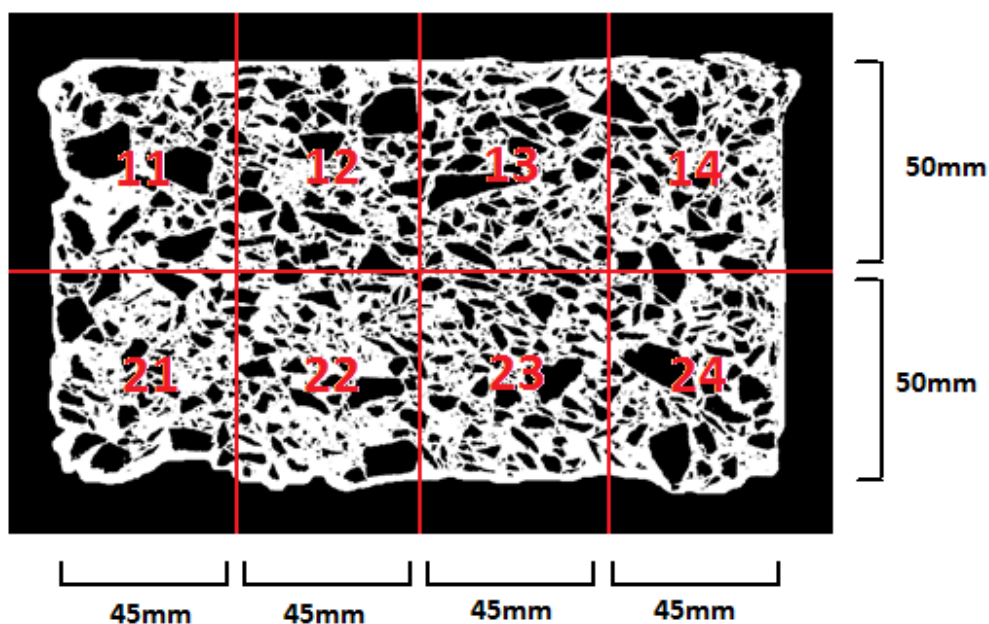
$i = i + 1$

Wend

4.3 Corpo de prova da placa de 10 cm



Corte transversal do CP de 10cm de altura



Código da macro "Calculos_CP_placa10":

Sub Calculos_CP_placa10()

'FAZ A CLASSIFICACAO DOS AGREGADOS EM 8 DIFERENTES REGIÕES DO CP.

'Retidos na Peneira 2. Classifica os retidos calcula a anisotropia(delta) de Oda e Nakayama(massas)

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

X = Cells(i, 20)

y = Cells(i, 21)

If y <= 1170 Then

cy = 1

End If

If y > 1170 Then

cy = 2

End If

If X <= 1053 Then

cx = 10

End If

If X > 1053 And X <= 2106 Then

cx = 20

End If

If X > 2106 And X <= 3159 Then

cx = 30

End If

If X > 3159 Then

cx = 40

End If

Cells(i, 22) = cx + cy

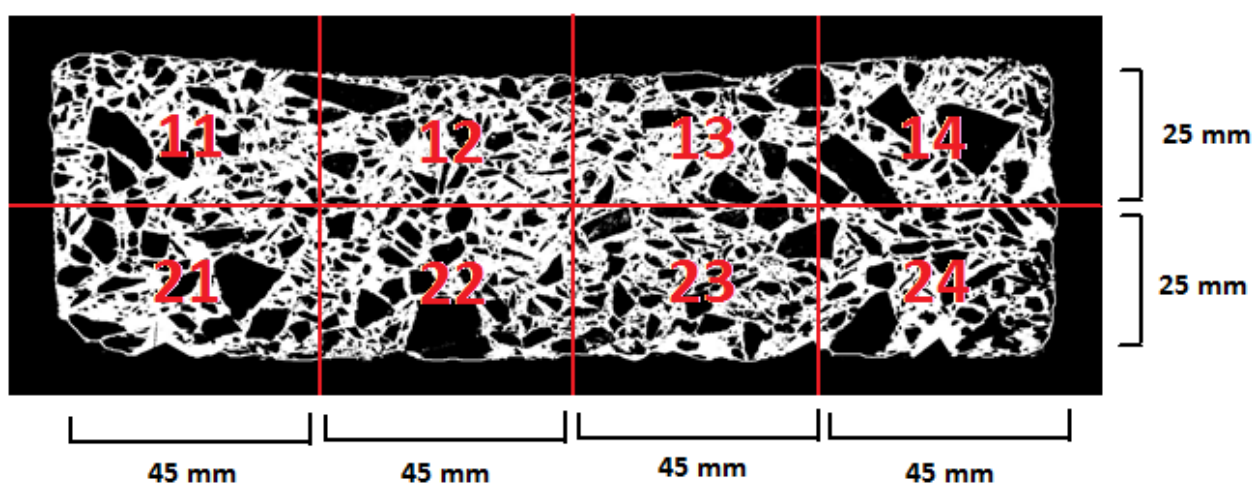
i = i + 1

Wend

4.4 Corpo de prova da placa de 5 cm



Corte transversal no corpo de prova da placa de 5cm



Código da macro "Calculos_CP_placa05":

Sub Calculos_CP_placa05()

'FAZ A CLASSIFICACAO DOS AGREGADOS EM 8 DIFERENTES REGIÕES DO CP.

'Retidos na Peneira 2. Classifica os retidos calcula a anisotropia(delta) de Oda e Nakayama(massas)

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

X = Cells(i, 20)

y = Cells(i, 21)

If y <= 585 Then

cy = 1

End If

If $y > 585$ Then

$cy = 2$

End If

If $X \leq 1053$ Then

$cx = 10$

End If

If $X > 1053$ And $X \leq 2106$ Then

$cx = 20$

End If

If $X > 2106$ And $X \leq 3159$ Then

$cx = 30$

End If

If $X > 3159$ Then

$cx = 40$

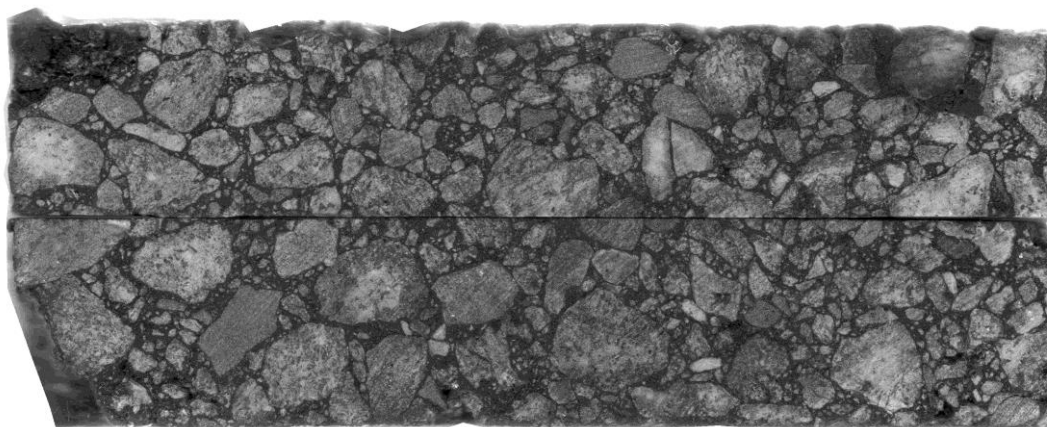
End If

$Cells(i, 22) = cx + cy$

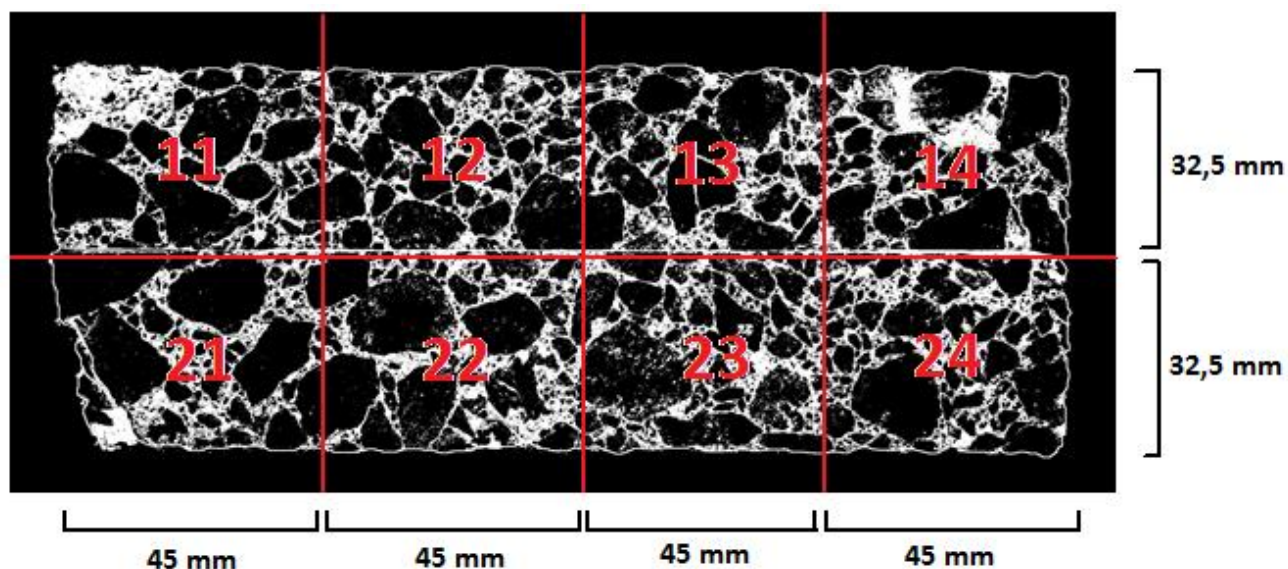
$i = i + 1$

Wend

4.5 Corpo de prova CDT



Corte transversal do corpo de prova CDT que foi seccionado ao meio.



Código da macro "Calculos_CDT":

Sub Calculos_CDT()

'FAZ A CLASSIFICACAO DOS AGREGADOS EM 8 DIFERENTES REGIÕES DO CP.

'Retidos na Peneira 2. Classifica os retidos calcula a anisotropia(delta) de Oda e Nakayama(massas)

i = 3

While Cells(i, 1) <> "

X = Cells(i, 20)

y = Cells(i, 21)

If y <= 761 Then

cy = 1

End If

If y > 761 Then

cy = 2

End If

If X <= 1053 Then

cx = 10

End If

If X > 1053 And X <= 2106 Then

cx = 20

End If

If X > 2106 And X <= 3159 Then

cx = 30

End If

If X > 3159 Then

cx = 40

End If

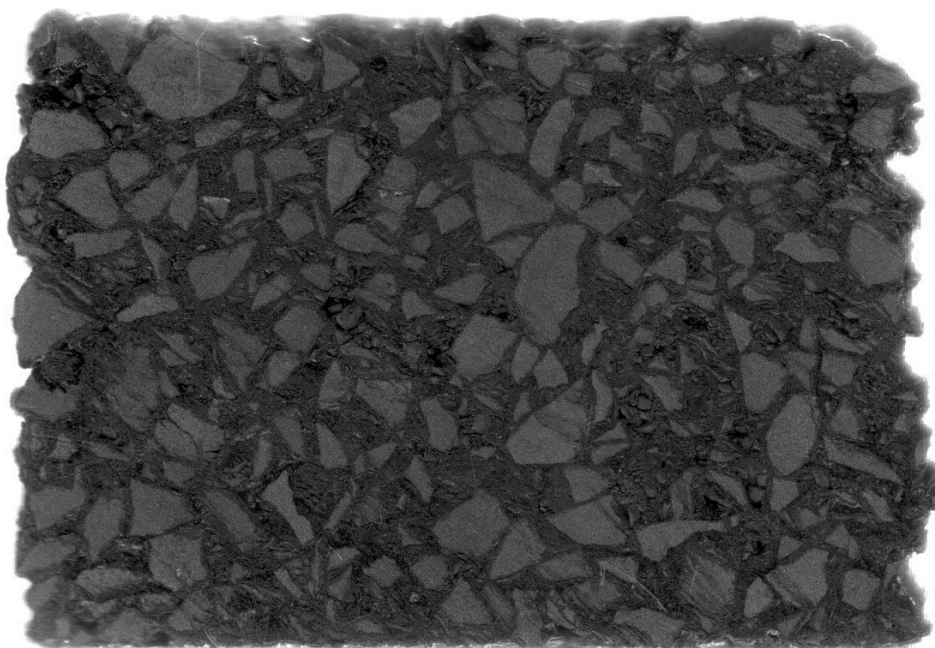
Cells(i, 22) = cx + cy

i = i + 1

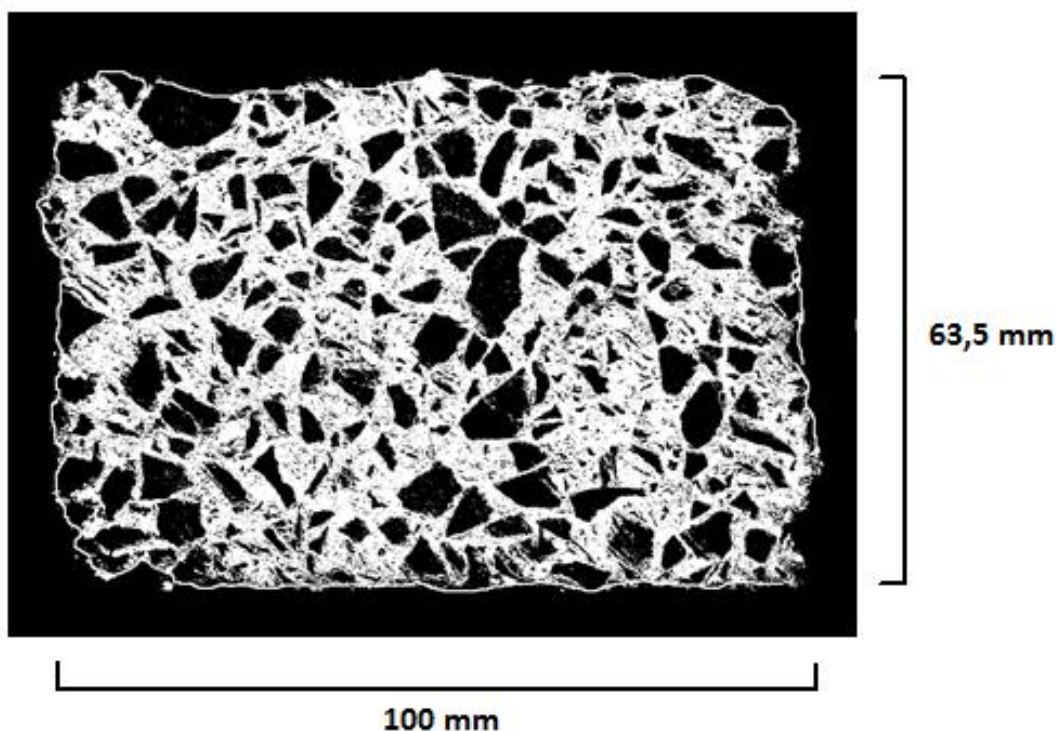
Wend

4.6 Corpo de prova Marshall

Corte transversal do corpo de prova Marshall



Devido às dimensões do corpo de prova Marshall serem reduzidas, não há a necessidade de subdividi-lo. Logo a distribuição de agregados será avaliada na área transversal como um todo.



Como não existem subdivisões não haverá uma macro que calcule a distribuição de agregados por área. Logo, seu código se resume à distribuição por peneira e ao cálculo da Anisotropia.

Cálculo da macro "Calculos_Marshall":

Sub Calculos_Marshall()

'FAZ A CLASSIFICACAO DOS AGREGADOS POR PENEIRA

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

If Cells(i, 13) >= 12500 Then

Cells(i, 23) = Cells(i, 13)

Cells(i, 24) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 23) = ""

End If

If Cells(i, 13) < 12500 And Cells(i, 13) >= 9500 Then

Cells(i, 25) = Cells(i, 13)

Cells(i, 26) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 25) = ""

End If

If Cells(i, 13) < 9500 And Cells(i, 13) >= 4750 Then

Cells(i, 27) = Cells(i, 13)

Cells(i, 28) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 27) = ""

End If

If Cells(i, 13) <= 4750 And Cells(i, 13) >= 2000 Then

Cells(i, 29) = Cells(i, 13)

Cells(i, 30) = Cells(i, 22)

Else

Cells(i, 29) = ""

End If

i = i + 1

Wend

' FAZ O CALCULO DA ANISOTROPIA

' O calculo gera um valor de 0-1, sendo 0 para agregados completamente randômicos na distribuição e 1 quando há uma grande orientação

m = 0

soma1 = 0

soma2 = 0

i = 3

While Cells(i, 1) <> ""

If Cells(i, 14) > 90 Then

Cells(i, 14) = Cells(i, 14) - 180

End If

m = m + 1

*soma1 = soma1 + Cos(2 * Cells(i, 14))*

*soma2 = soma2 + Sin(2 * Cells(i, 14))*

i = i + 1

Wend

*Delta = Sqr((soma1 * soma1) + (soma2 * soma2)) / m*

Cells(12, 31) = Delta

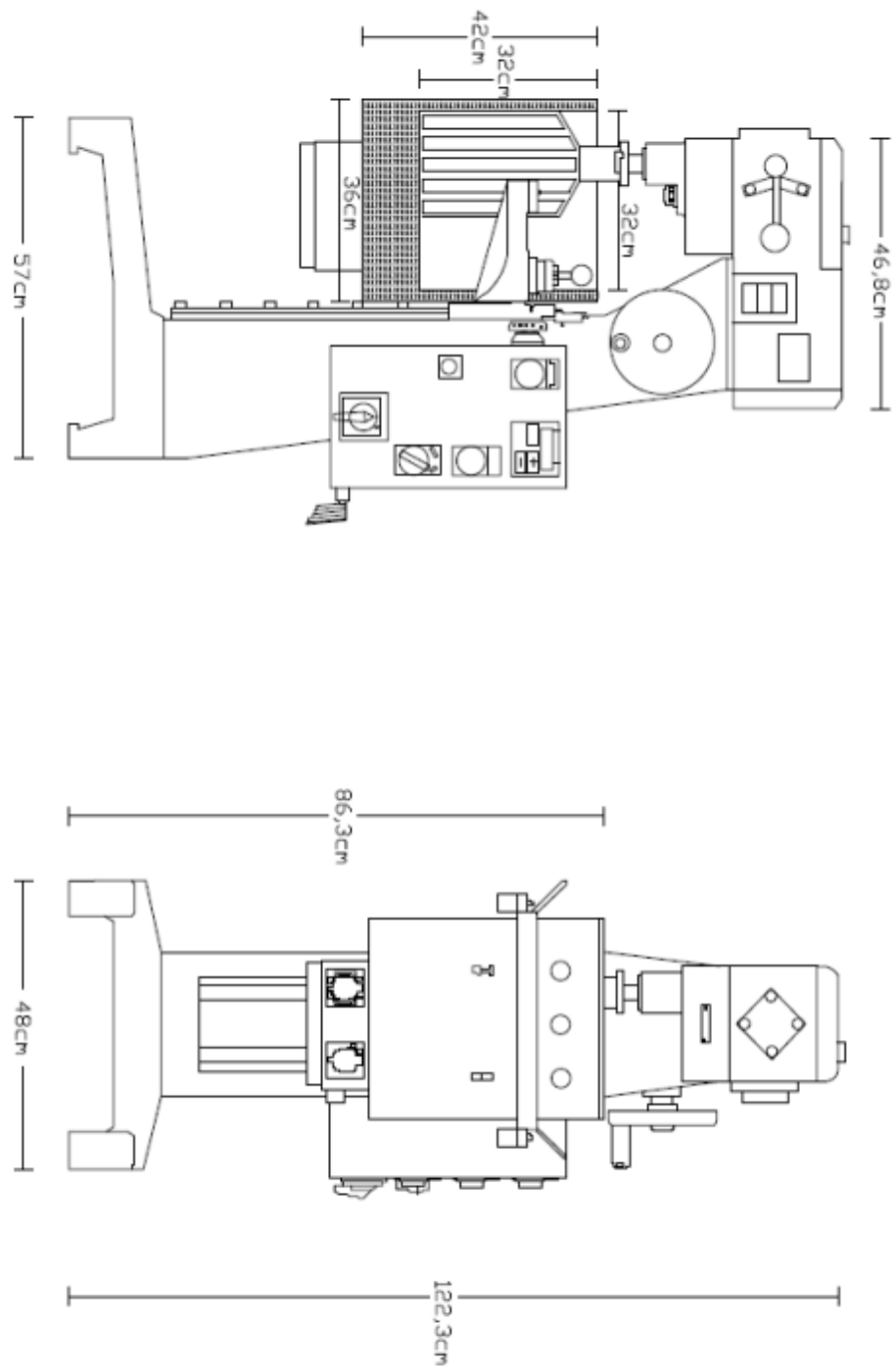
End Sub

Este manual faz parte do projeto 04, Auto Pista Régis Bittencourt – Desenvolvimento de equipamento simulador de tráfego de laboratório para previsão de desempenho de misturas asfálticas. Desenvolvido com Recursos para Desenvolvimento Tecnológico – RDT/ANTT

CDT – ARTERIS

LTP – USP

ANEXO 3 – MISTURADORA



CDT-CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
ARTERIS
HOMOGENIZADORA DE MISTURAS ASFÁLTICAS
PROJETISTA: IRMÃOS AMADIO LTDA

ANEXO 4 – MESA COMPACTADORA (PROTÓTIPO)

COMPACTADOR DE MISTURAS ASFÁLTICAS

(Projeto detalhado)

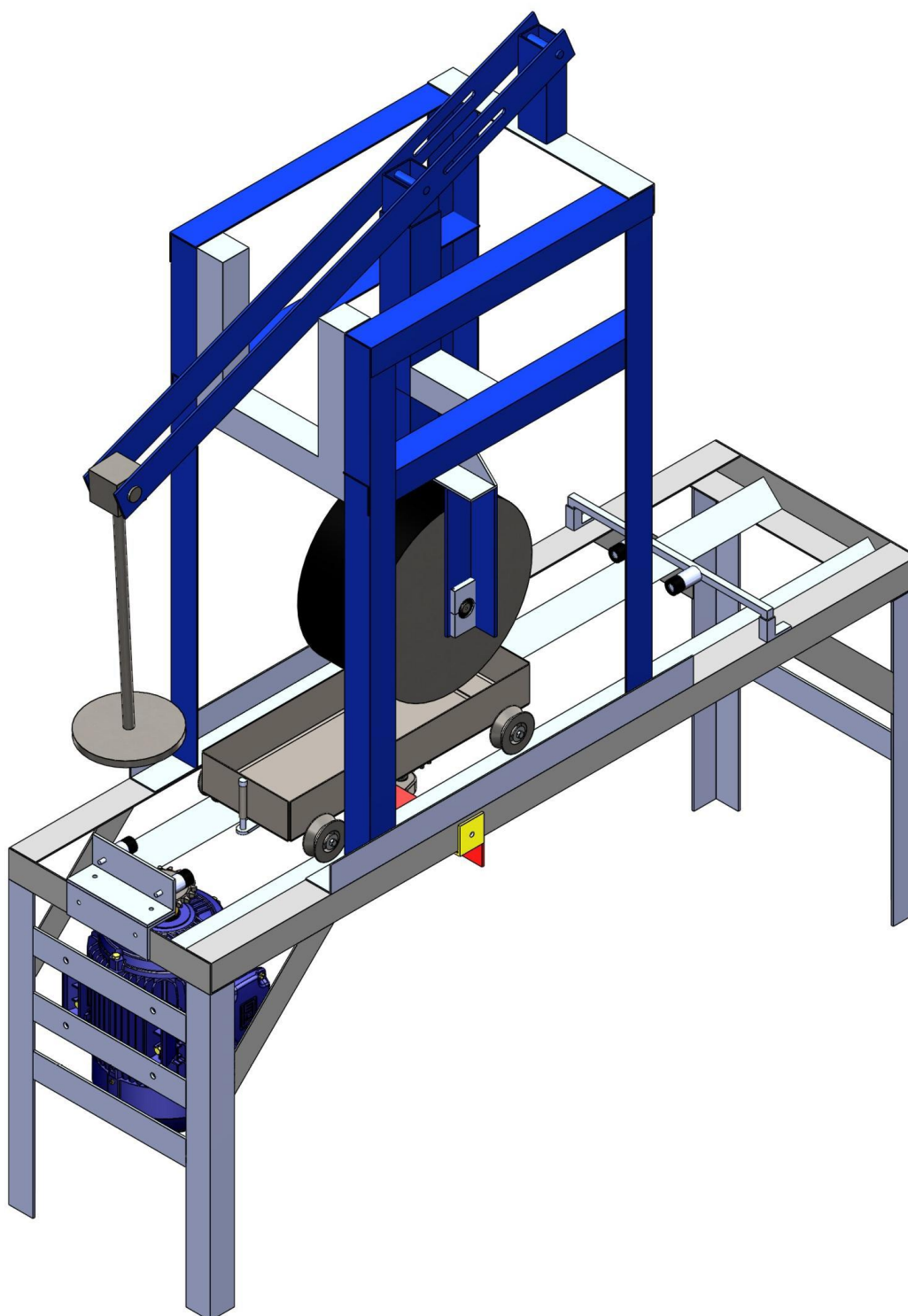
Introdução

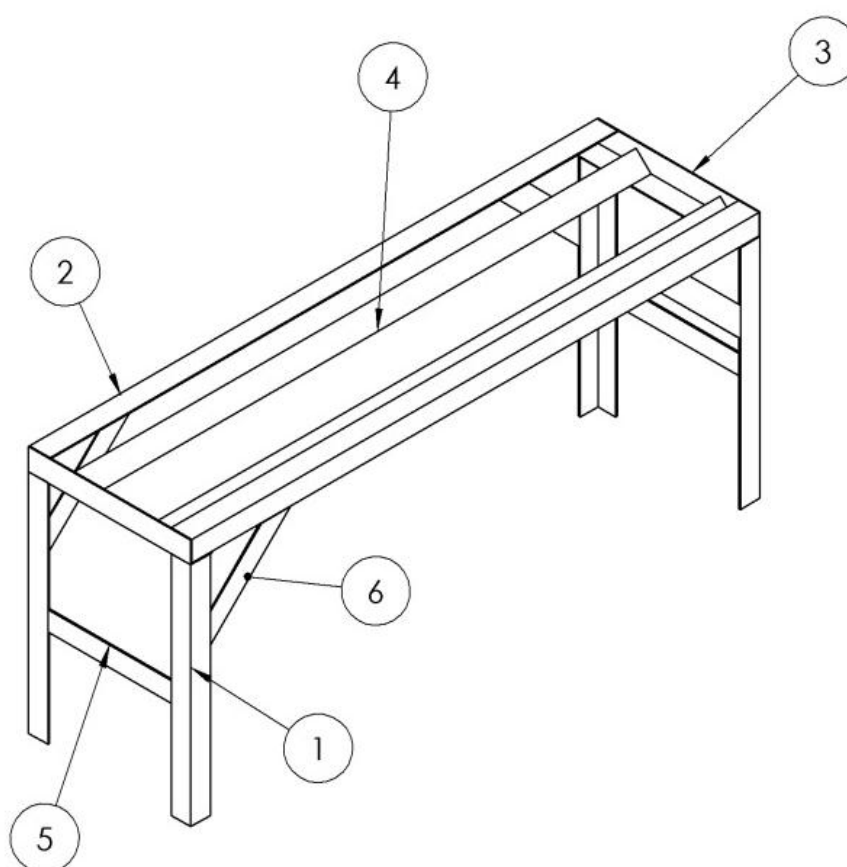
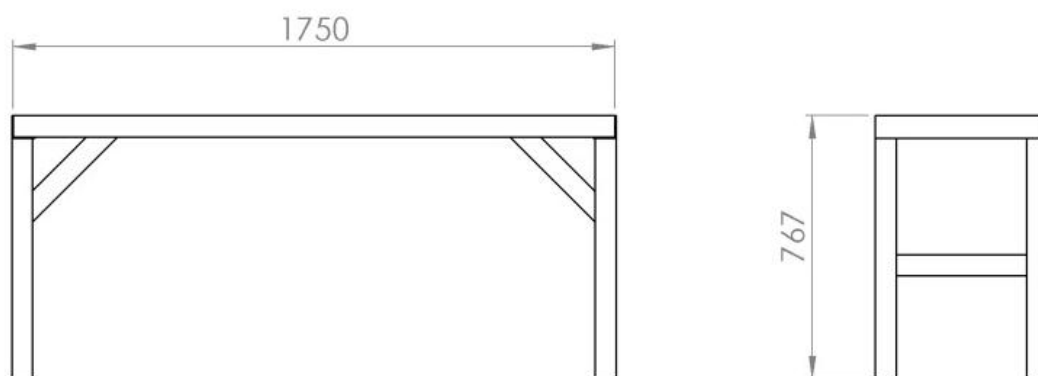
Neste documento encontra-se os desenhos e montagens de todas as peças mecânicas do protótipo criado sob encomenda para a empresa Paulista Infra-estrutura assim como suas medidas e especificações.

Os desenhos deste projeto estão dispostos nos módulos seguintes.

- Base Compactador
- Modulo Superior
- Motor e Coroa
- Coroa 2
- Carrinho
- Montagem Rolo
- Parada auxiliar 1
- Parada auxiliar 2

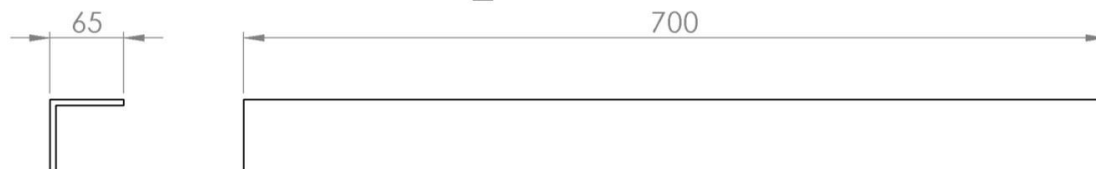
Índice de peças: Nº	Nº DA PEÇA	QDT.
DO ITEM		
1	pé	4
2	base_barra_lateral	2
3	base_barra_frontal_tra seira	2
4	base_trilho	2
5	base_chapa_reforço1	2
6	base_chapa_reforço2	4
7	stop2_suporte	2
8	stop_parafuso	4
9	stop1_aparador	4
10	stop1_suporte	1
11	stop1_base	2
12	carrinho1	1
13	eixorodinhas1	2
14	parafuso1	4
15	rodizio_carrinho	4
16	pino_carrinho	1
17	suporte_corrente	1
18	barra 4 superior	1
19	barra 1 superior	4
20	barra 2 superior	4
21	barra 3 superior	1
22	barra 5 superior	2
23	barra 6 superior	1
24	barra 7 superior	1
25	barra 8 superior	1
26	barra_sustentacao_pe so	1
27	lateral 1 suporte roda	1
28	lateral 2 suporte roda	1
29	suporte roda	1
30	tubo_fixacao	1
31	sustentacao suporte peso	2
32	rolacao	1
33	eixo_do_rol	1
34	rolamento	2
35	suporte rolamento rolo	4
36	Motorr	1
37	suporte motor	2
38	coroa_motor	1
39	bucha_motor	1
40	suporte_mancal	1
41	mancal	1



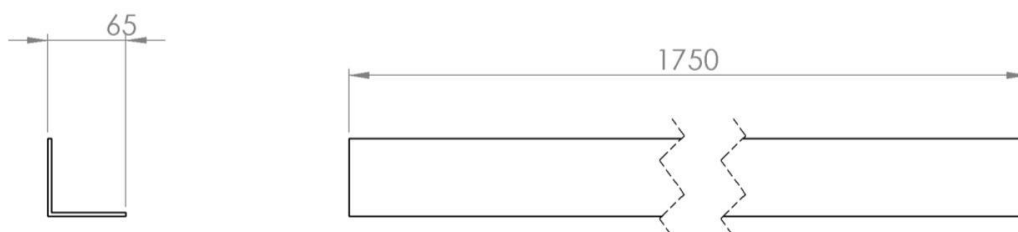


Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.
1	pé	4
2	base_barra_lateral	2
3	base_barra_frontal_traseira	2
4	base_trilho	2
5	base_chapa_reforço1	2
6	base_chapa_reforço2	4

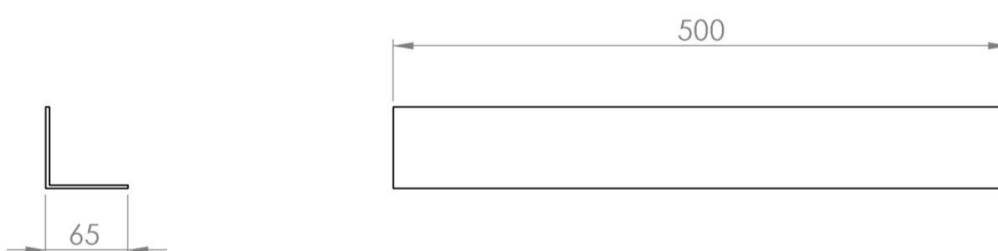
pé



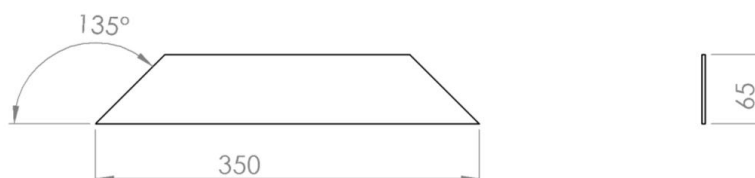
Base_barra lateral



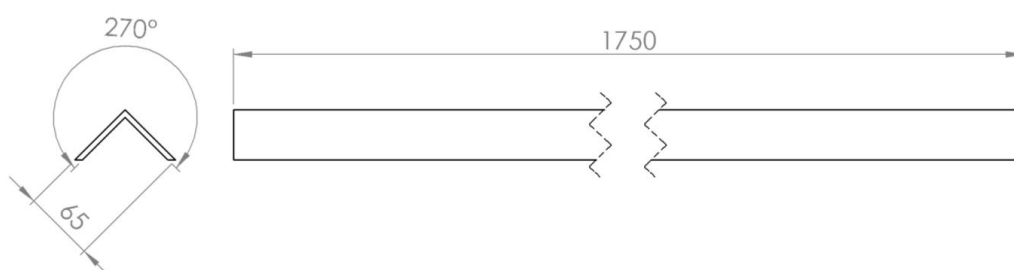
Base_barra Frontal



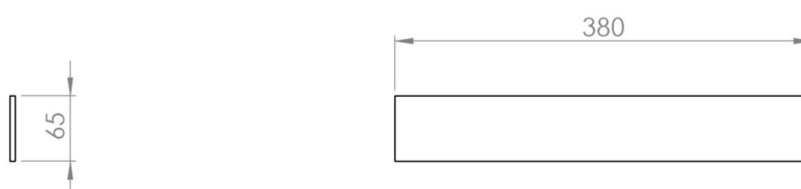
Base_chapa reforço 2

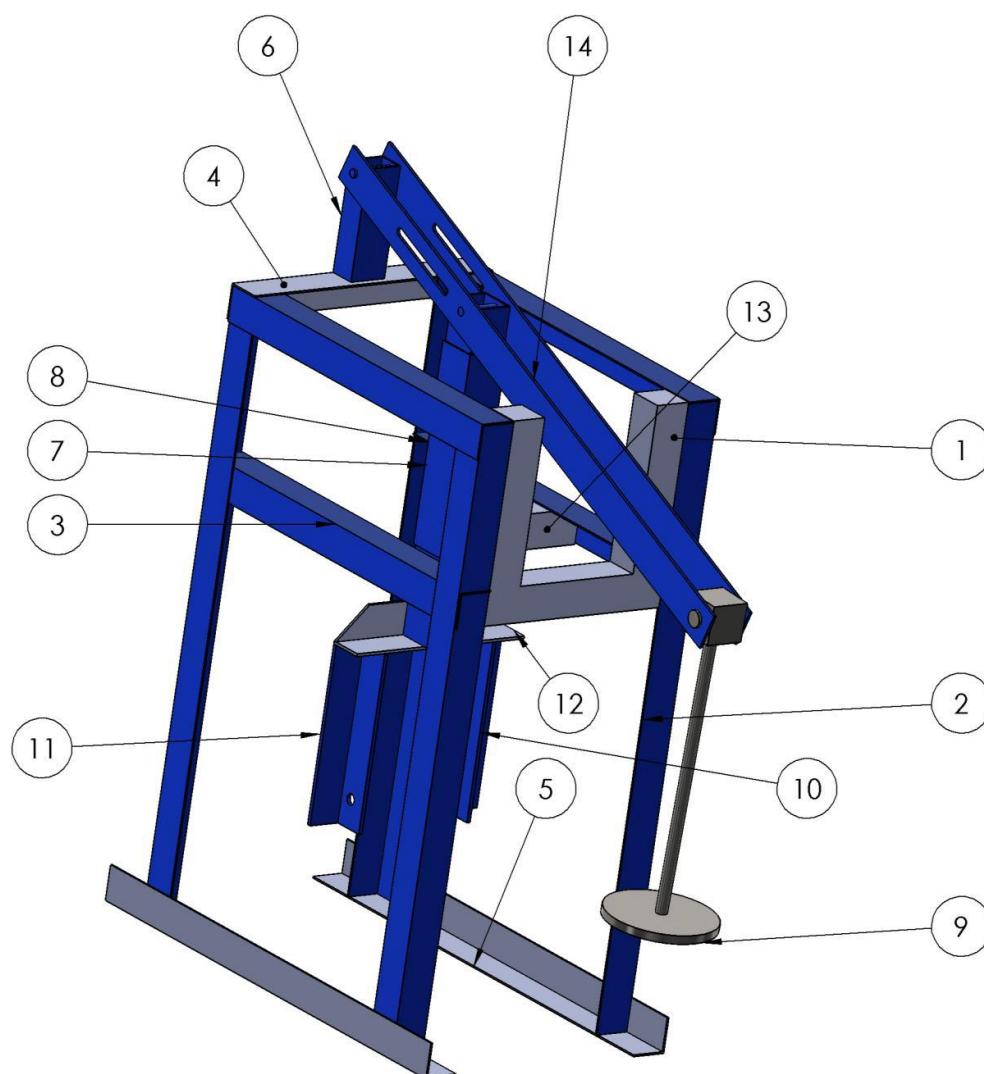


Trilho



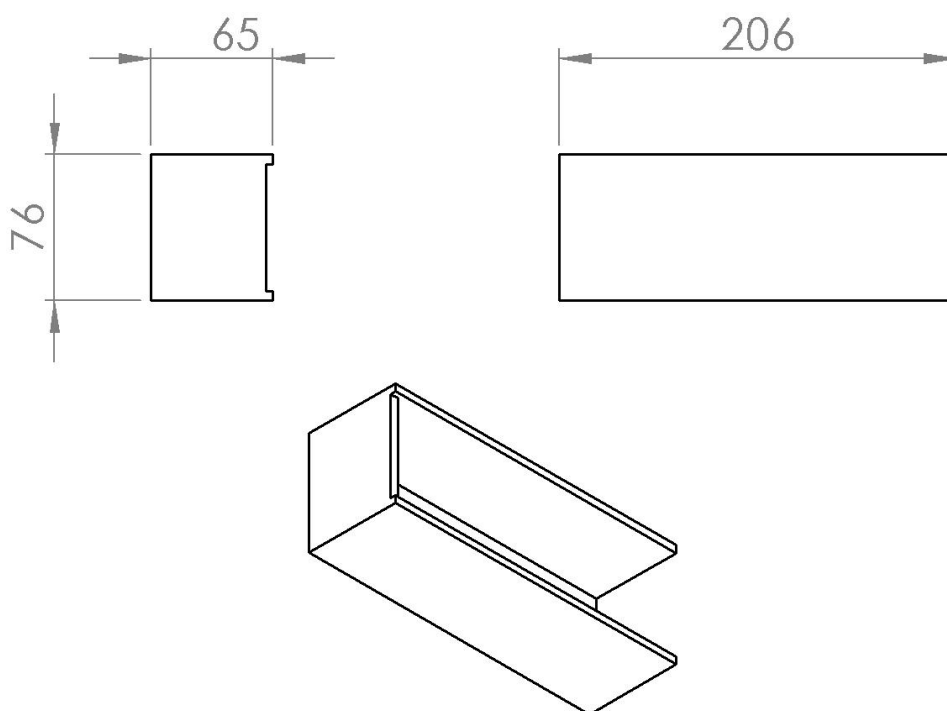
Base Chapa Reforço 1



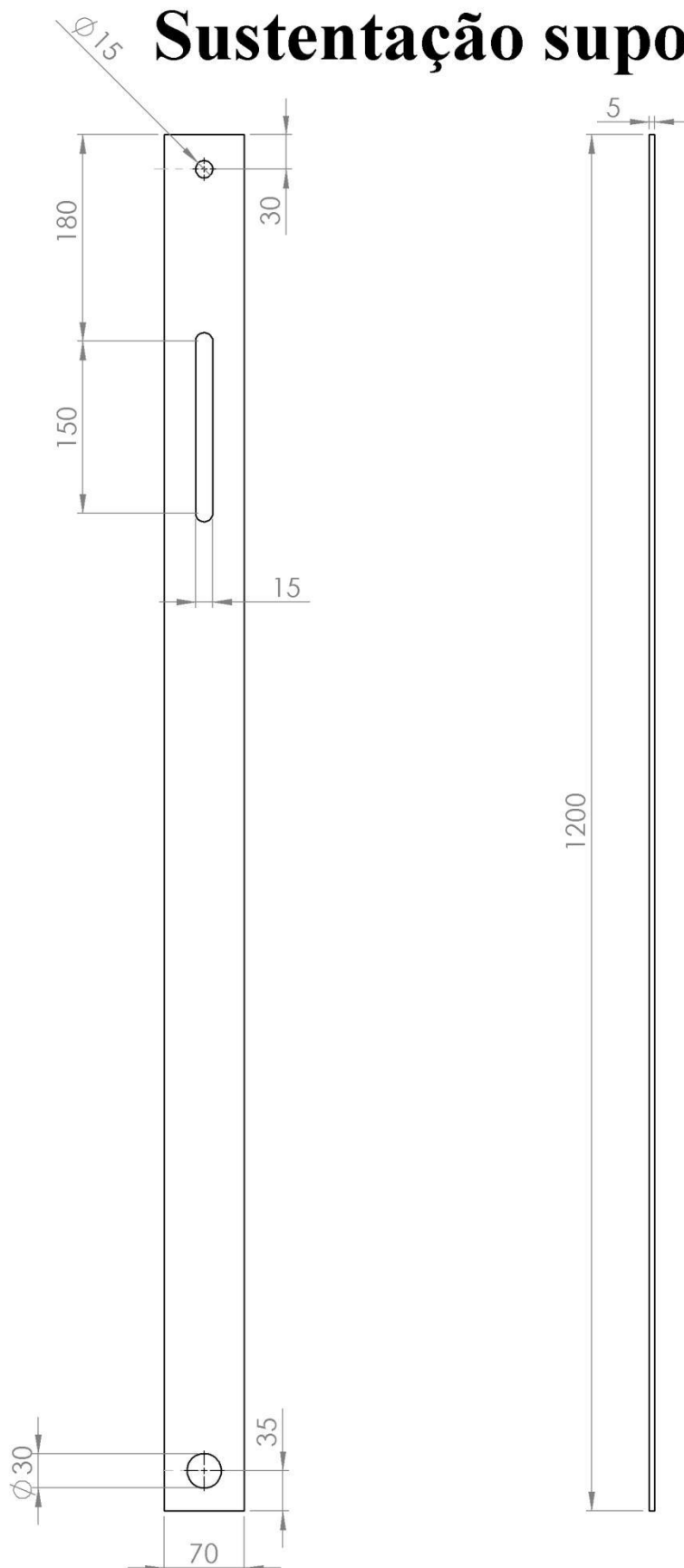


Nº DO ITEM	QDT.	Nº DA PEÇA
1	1	barra 4 superior
2	4	barra 1 superior
3	4	barra 2 superior
4	1	barra 3 superior
5	2	barra 5 superior
6	1	barra 6 superior
7	1	barra 7 superior
8	1	barra 8 superior
9	1	barra_sustentacao_peso
10	1	lateral 1 suporte roda
11	1	lateral 2 suporte roda
12	1	suporte roda
13	1	tubo_fixacao
14	2	sustentação suporte peso

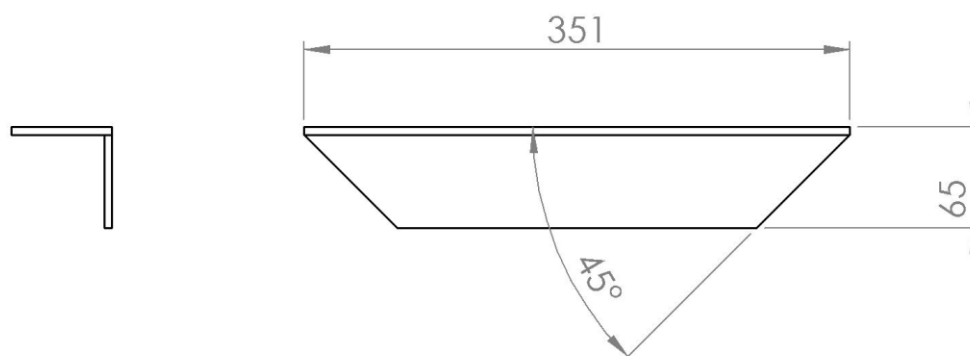
tubo fixação



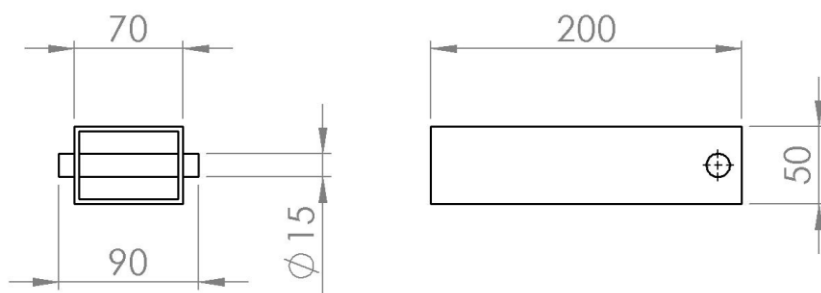
Sustentação suporte peso



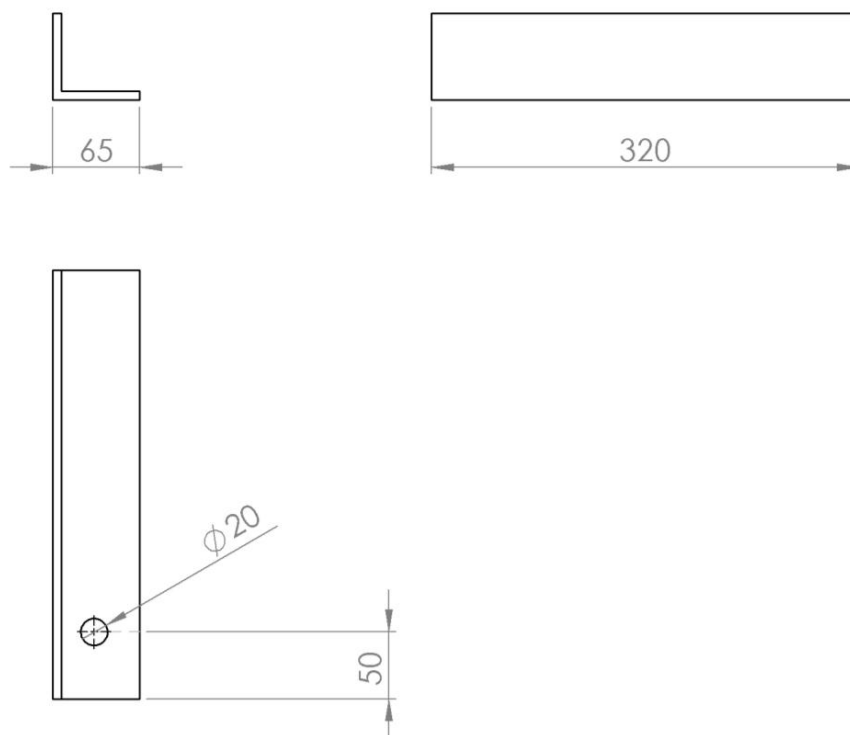
Suporte roda



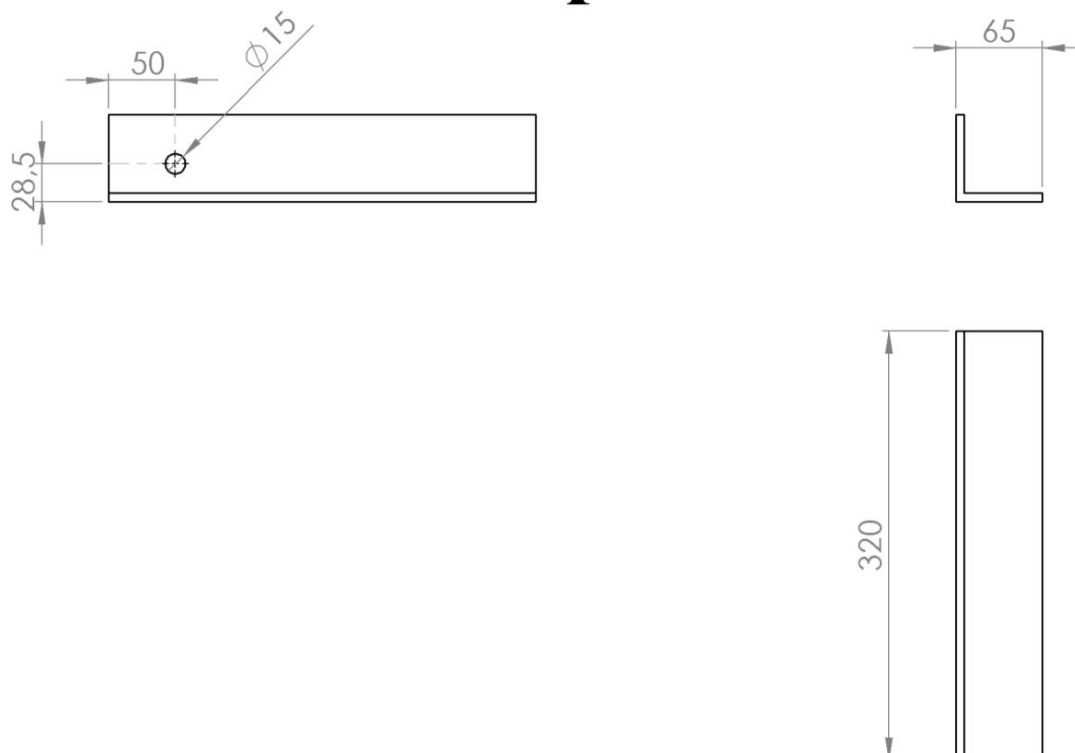
Barra 6 superior



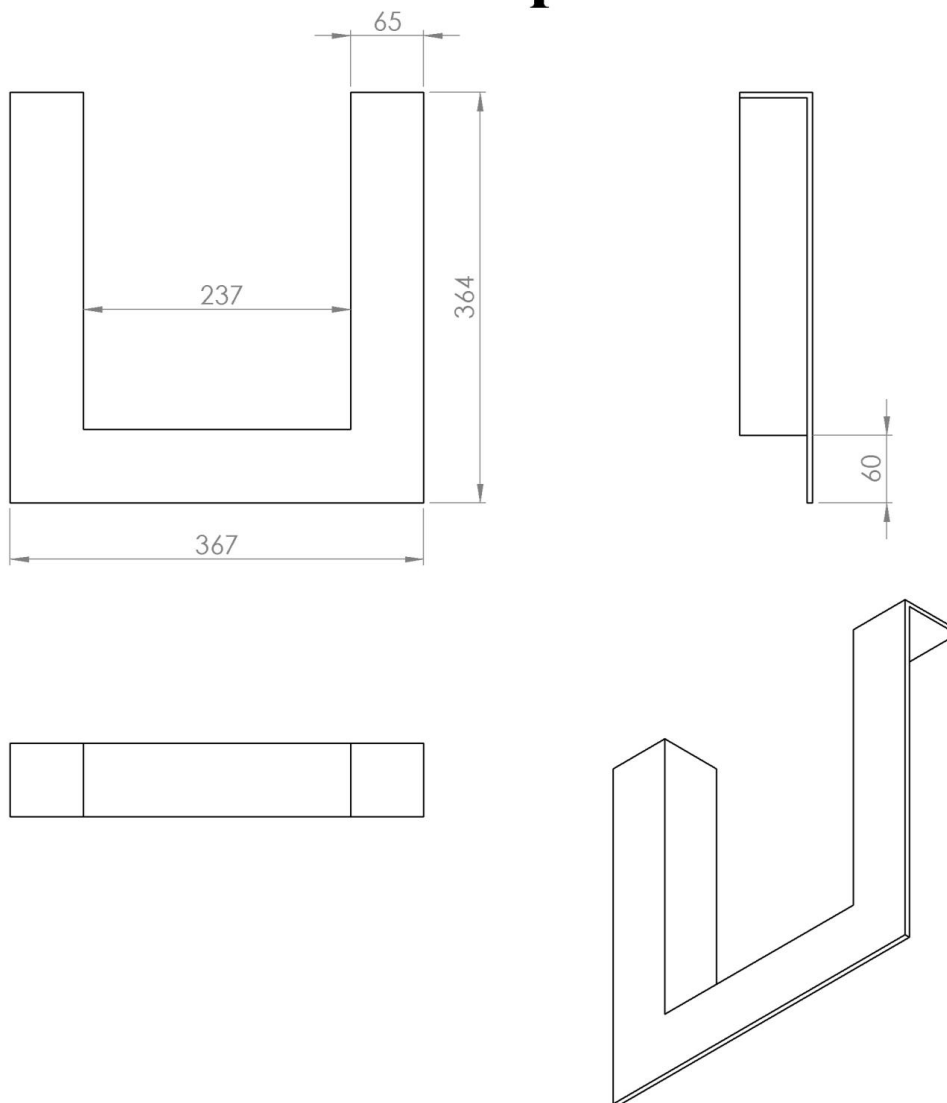
Lateral 2 suporte roda



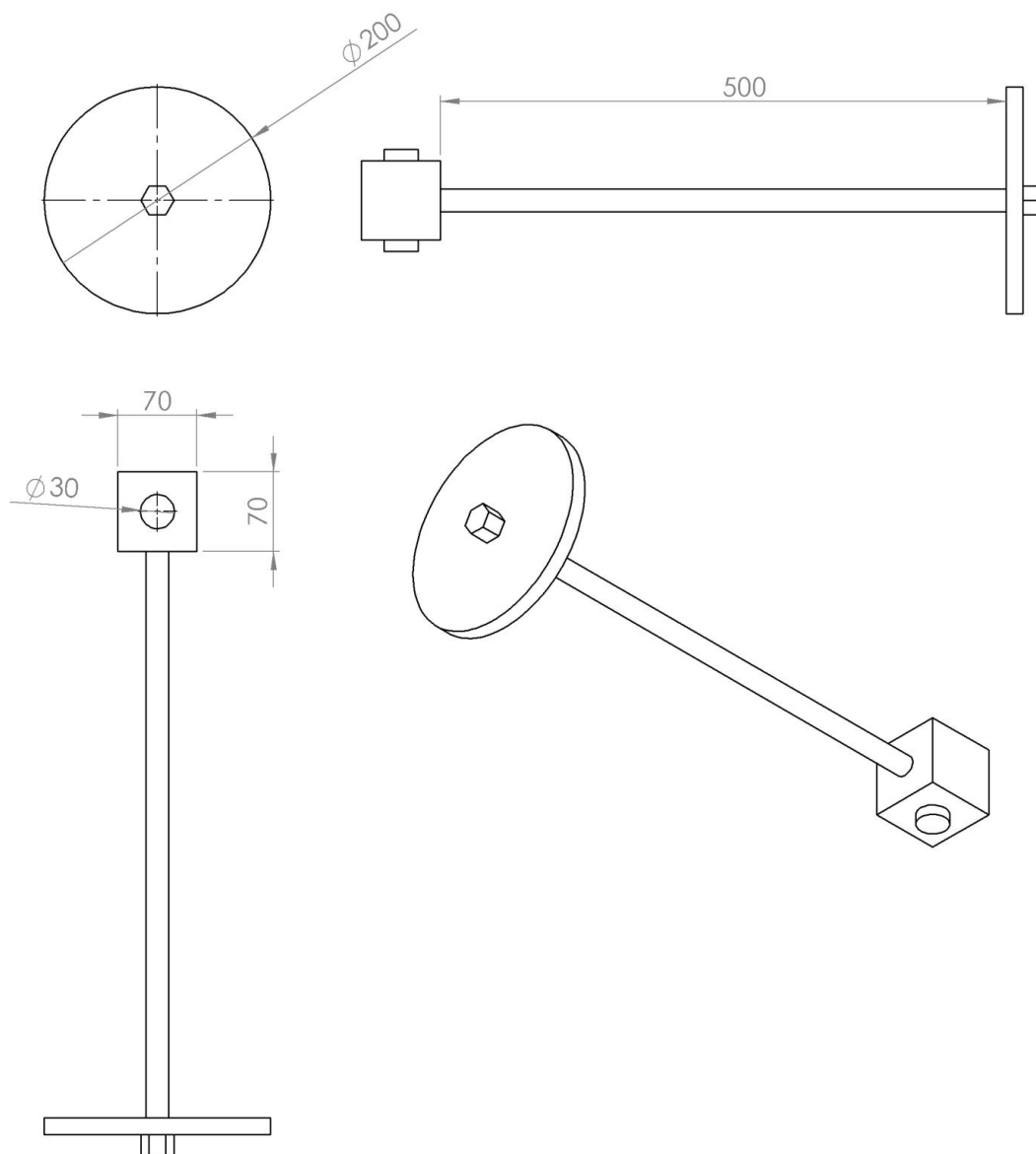
Lateral 1 suporte roda



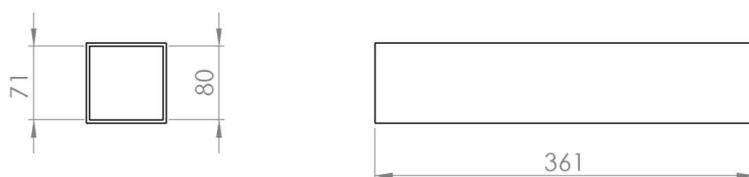
Barra 4 superior



Barra Sustentação peso



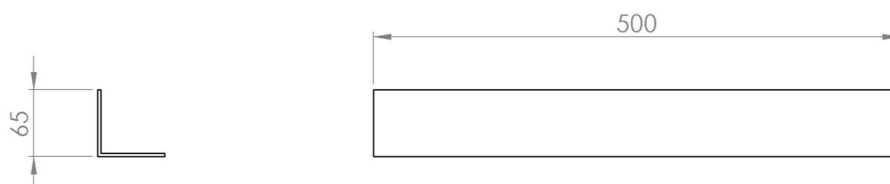
Barra 8 superior



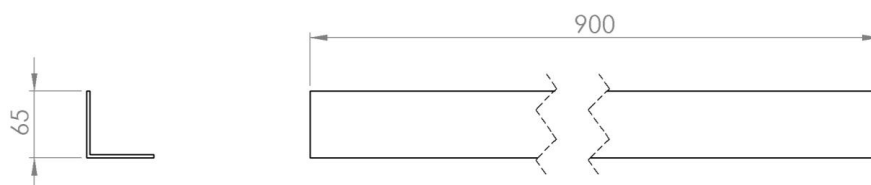
Barra 7 superior



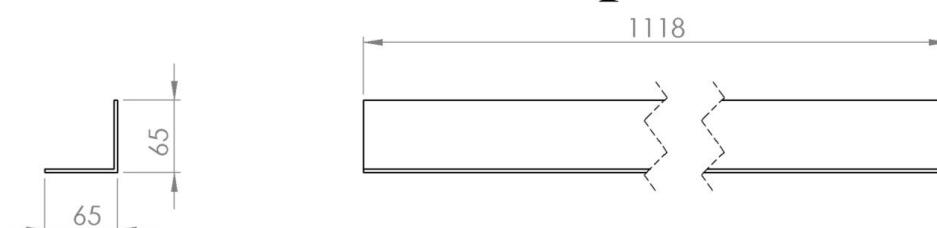
Barra 3 superior



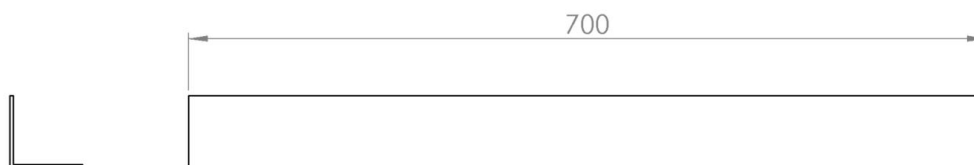
Barra 5 superior



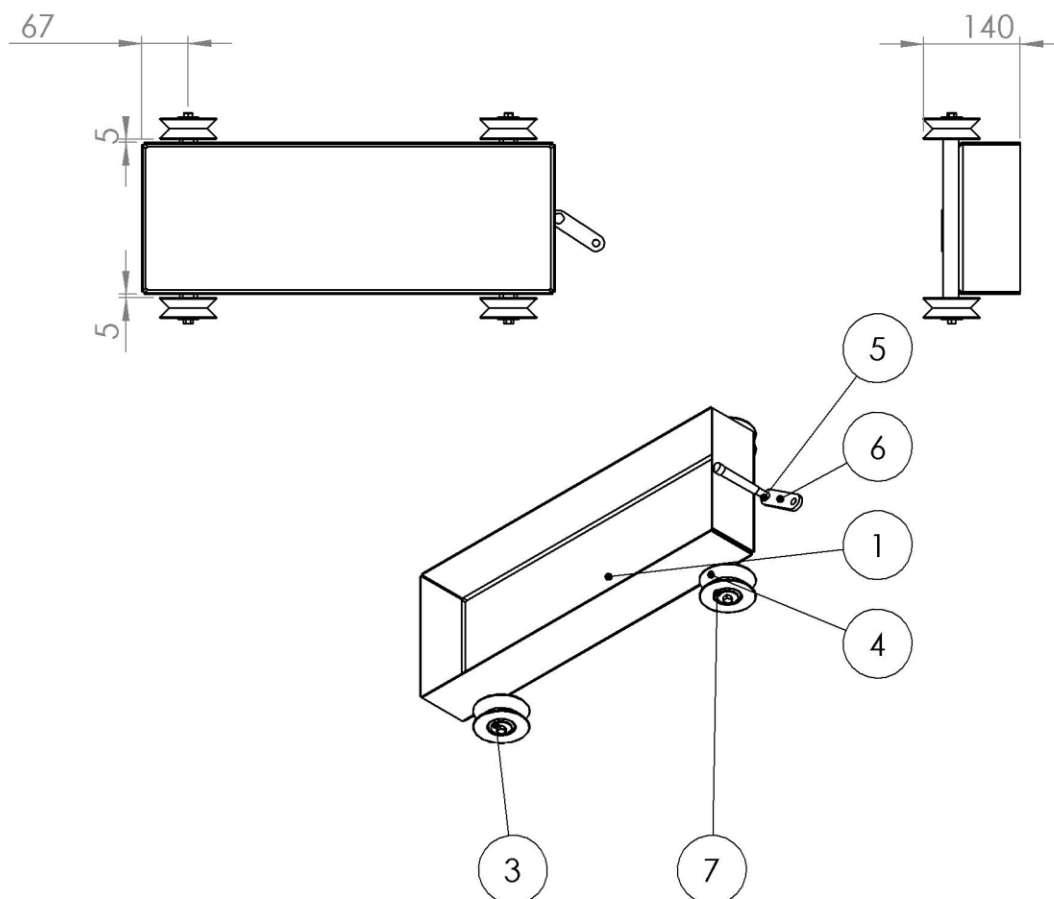
Barra 1 superior



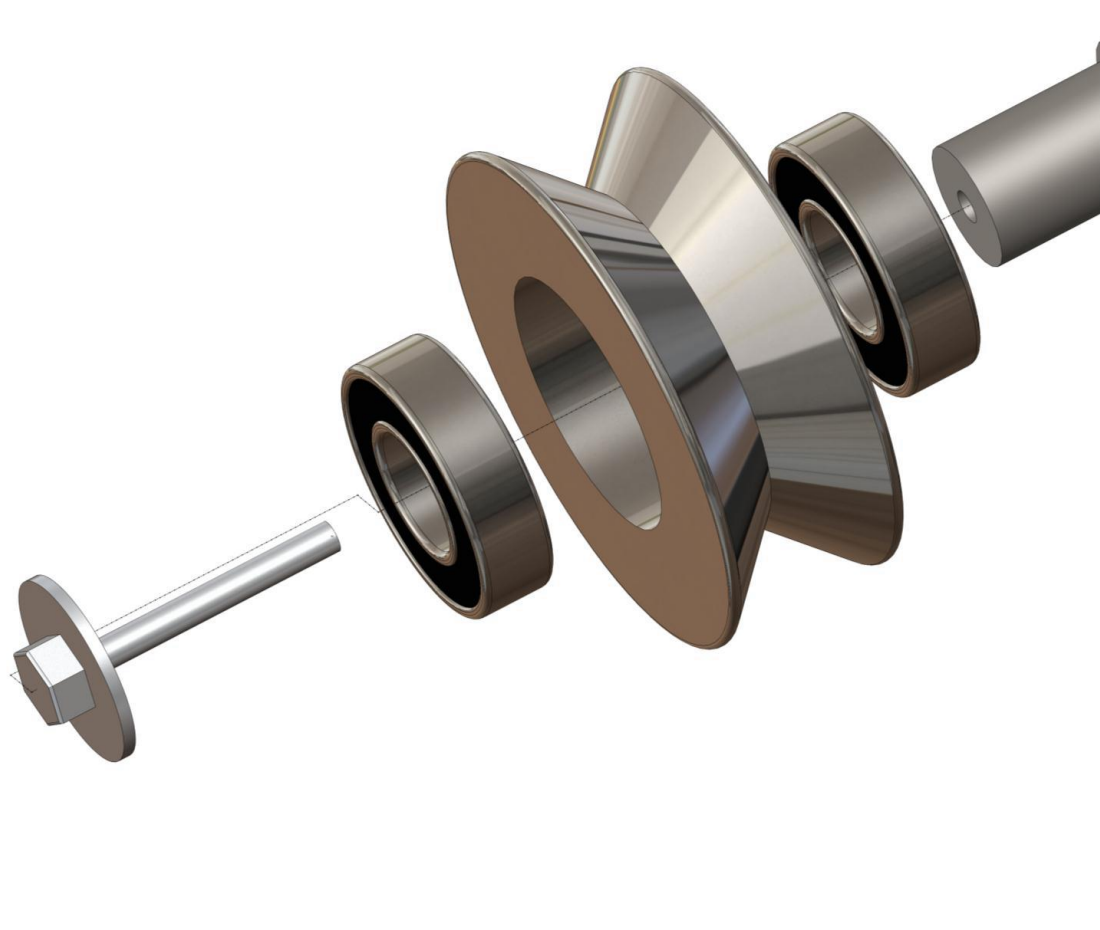
Barra 2 superior



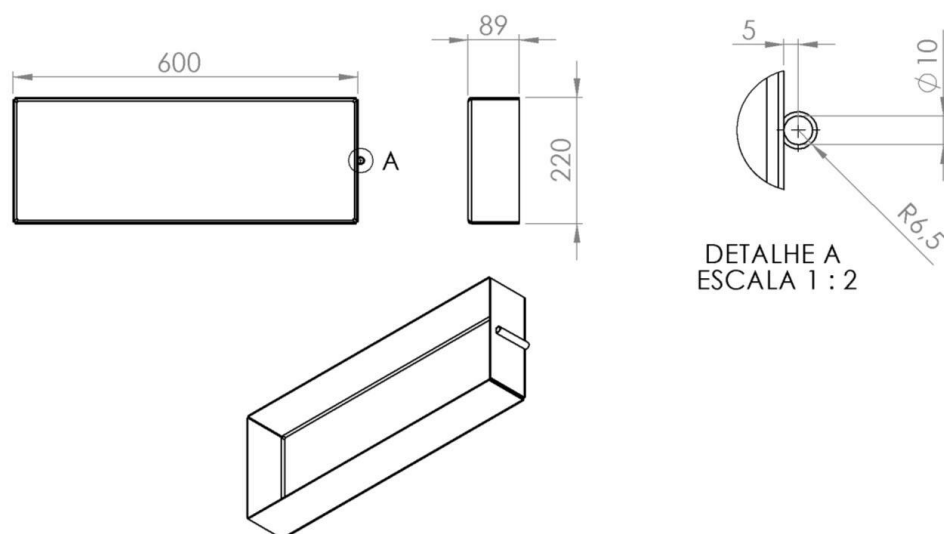
Base Carrinho



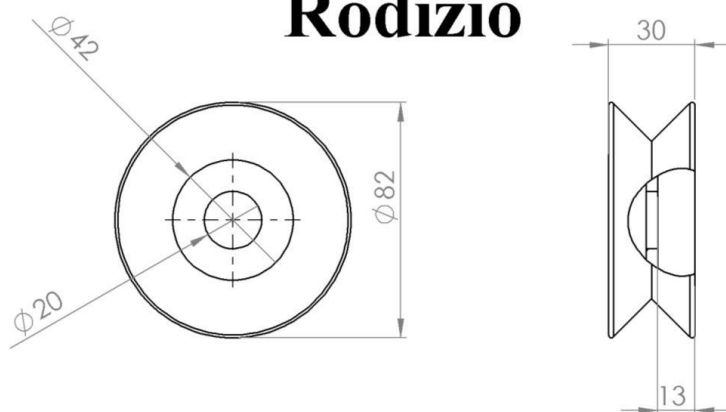
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.
1	carrinho1	1
2	eixorodinhas1	2
3	parafuso1	4
4	rodizio_carrinho	4
5	pino_carrinho	1
6	suporte_corrente	1
7	rolamento_carrinho	8



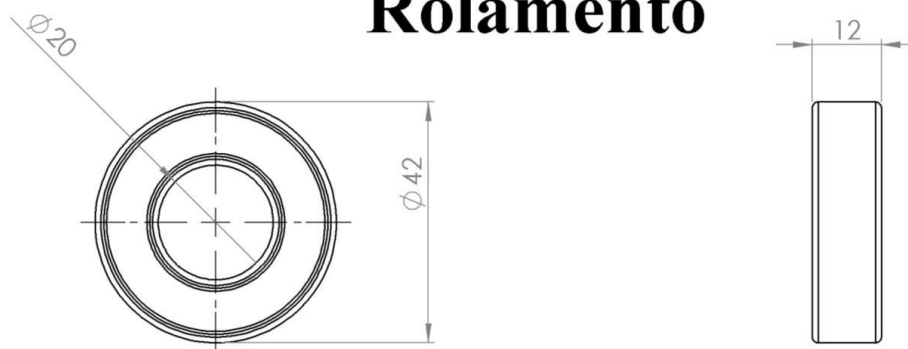
Carrinho 1



Rodizio



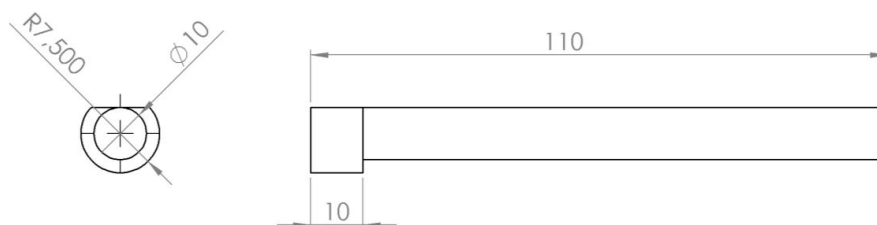
Rolamento



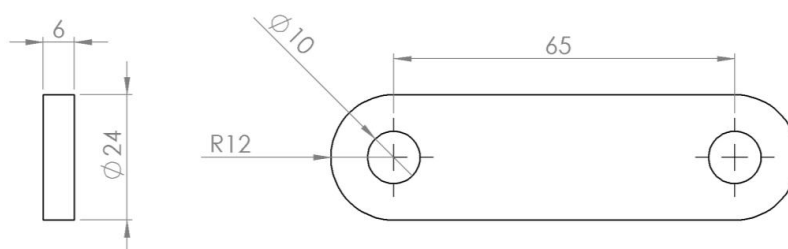
Eixo rodinhas

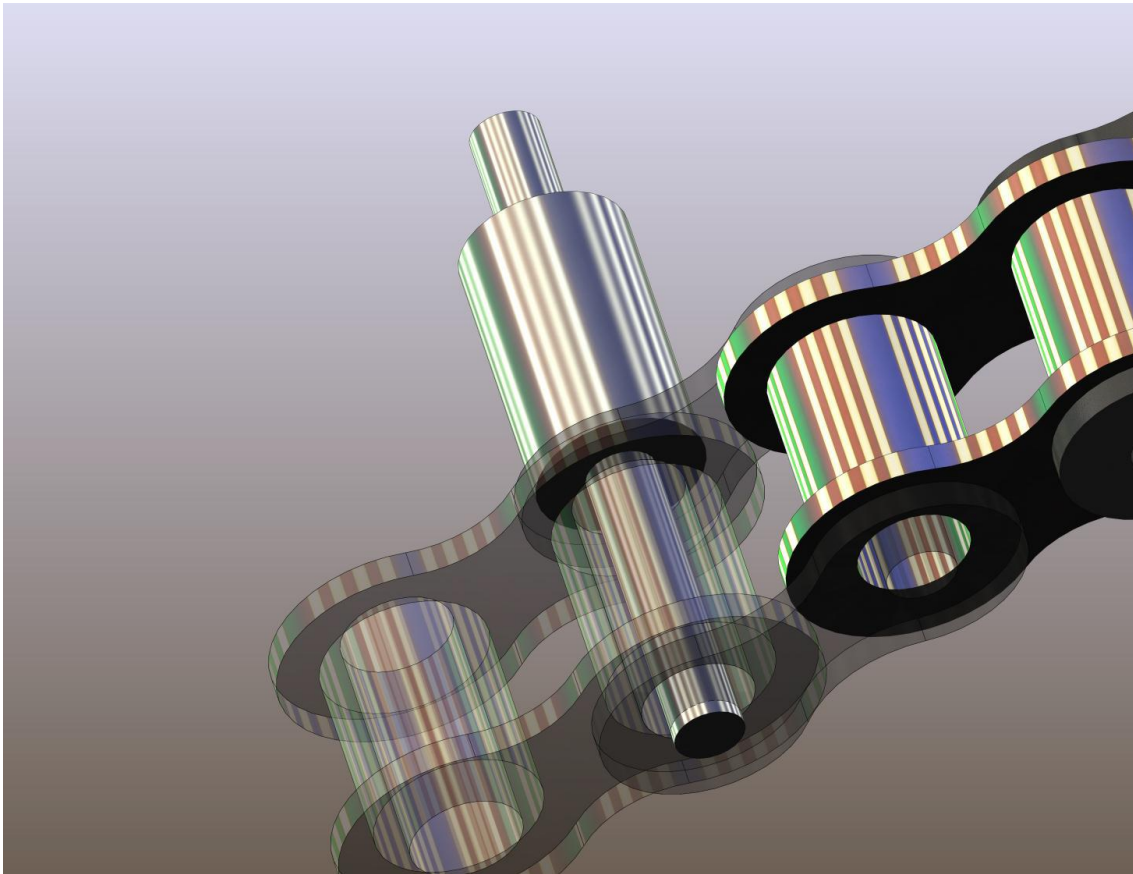


Pino Carrinho

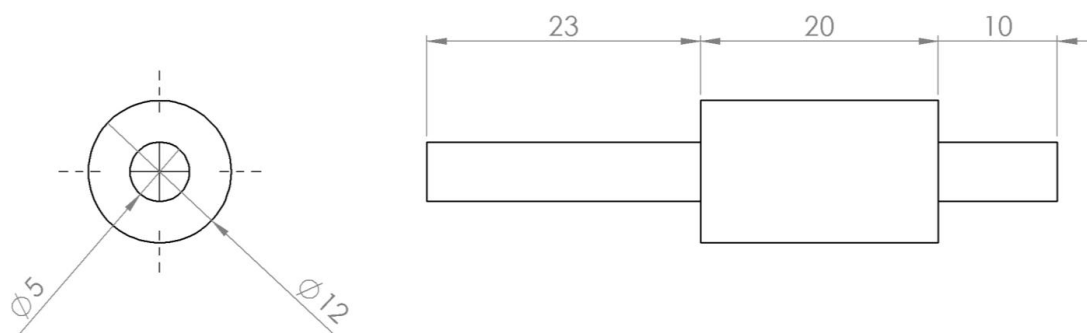


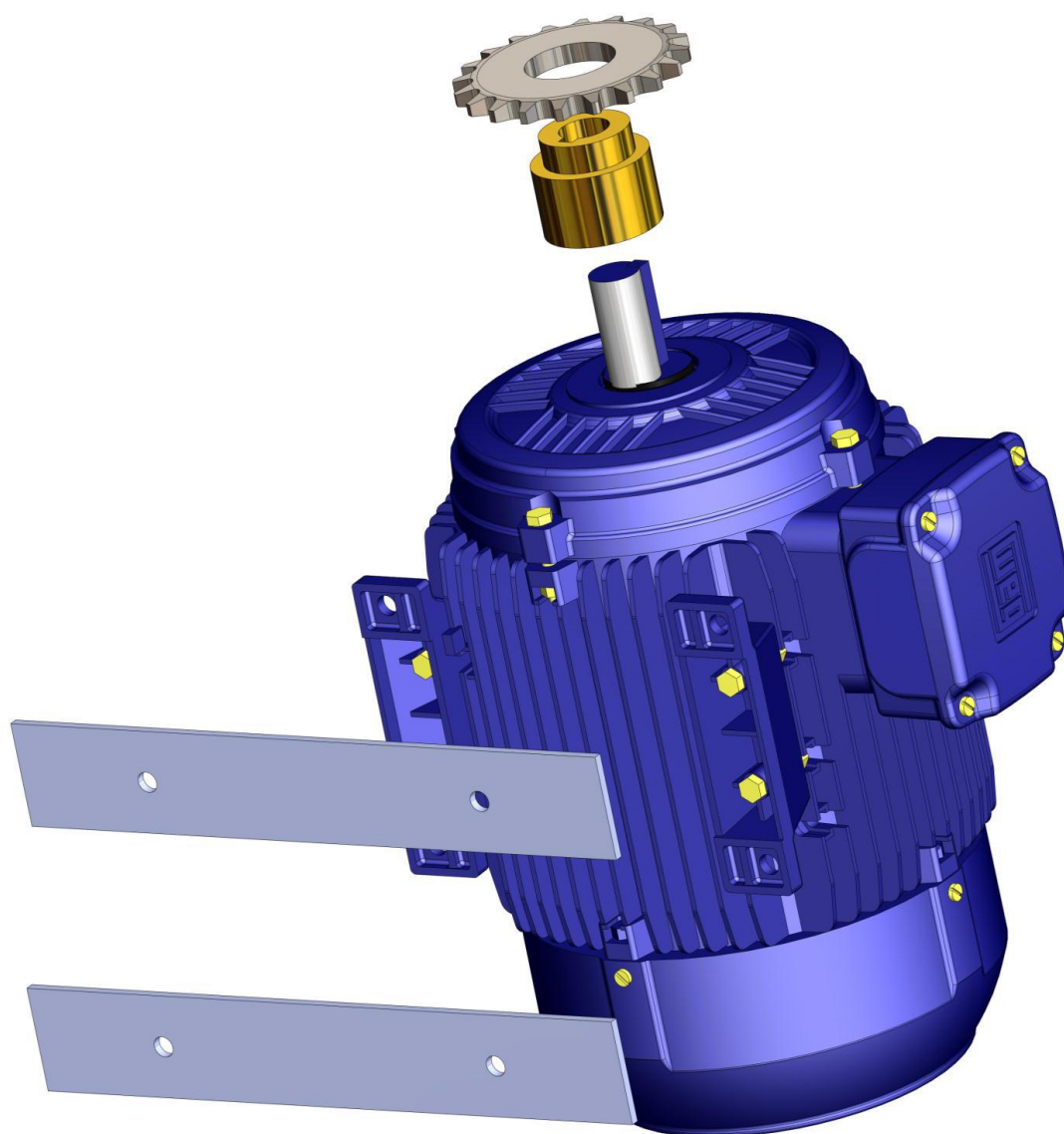
Suporte corrente



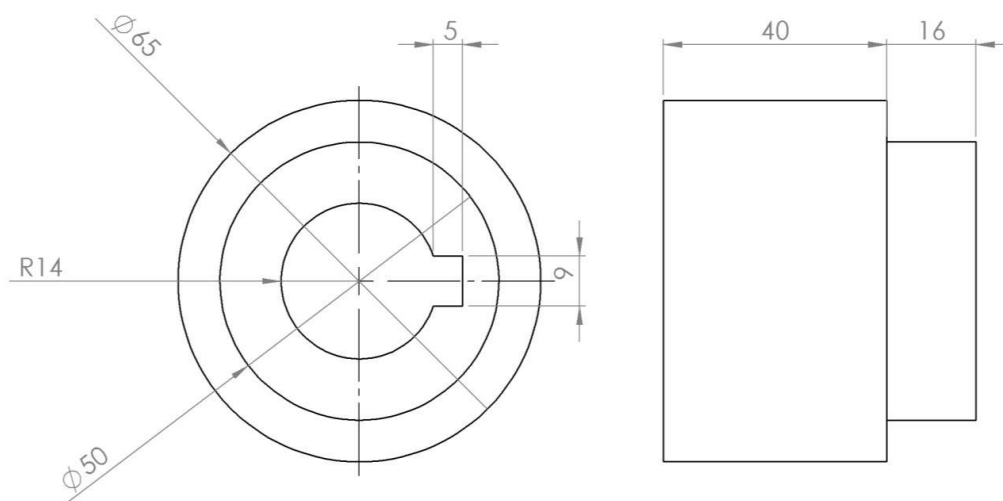


Pino Corrente

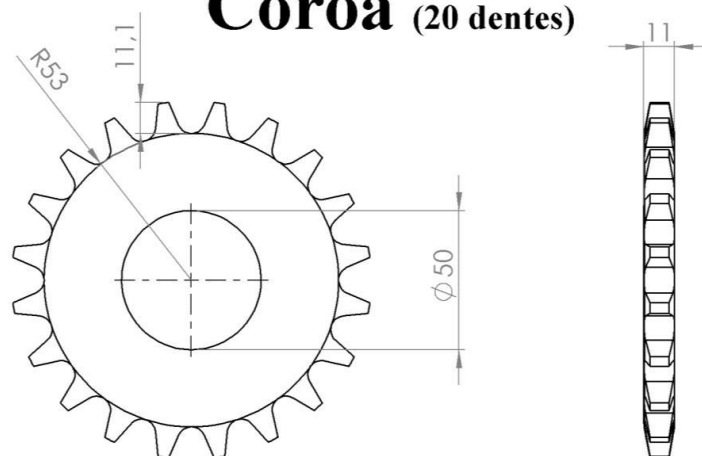




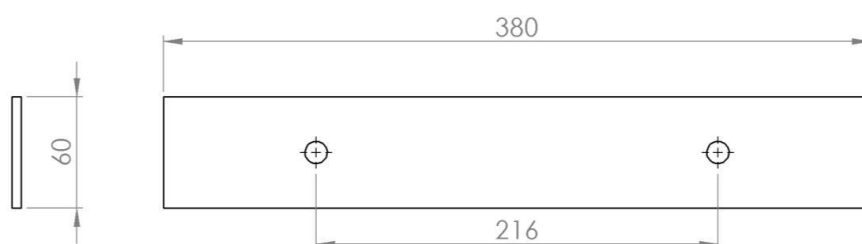
Bucha motor

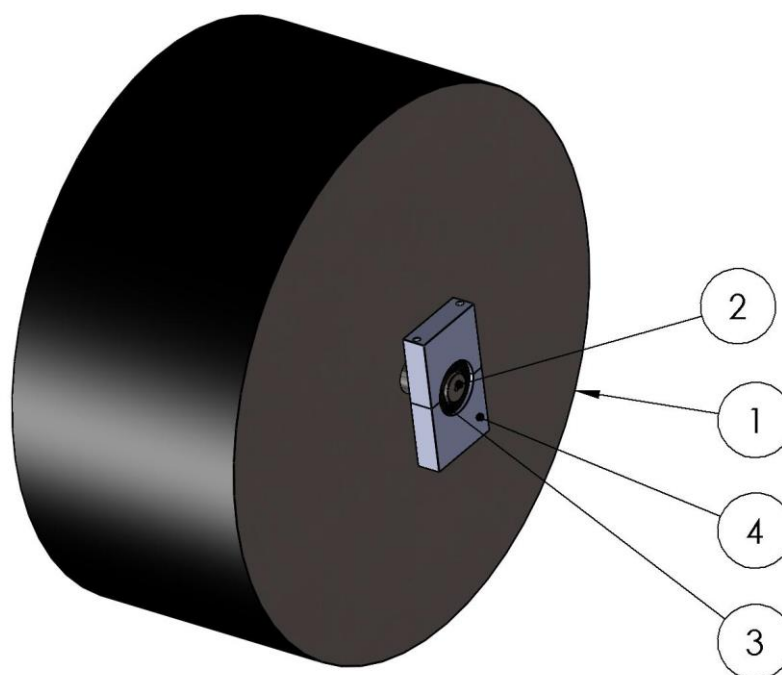


Coroa (20 dentes)



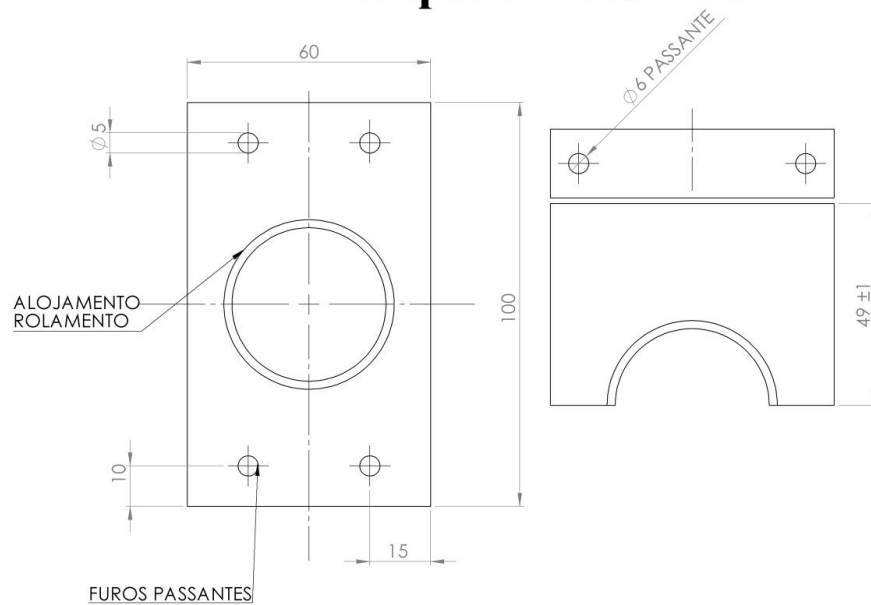
Suporte fixação motor



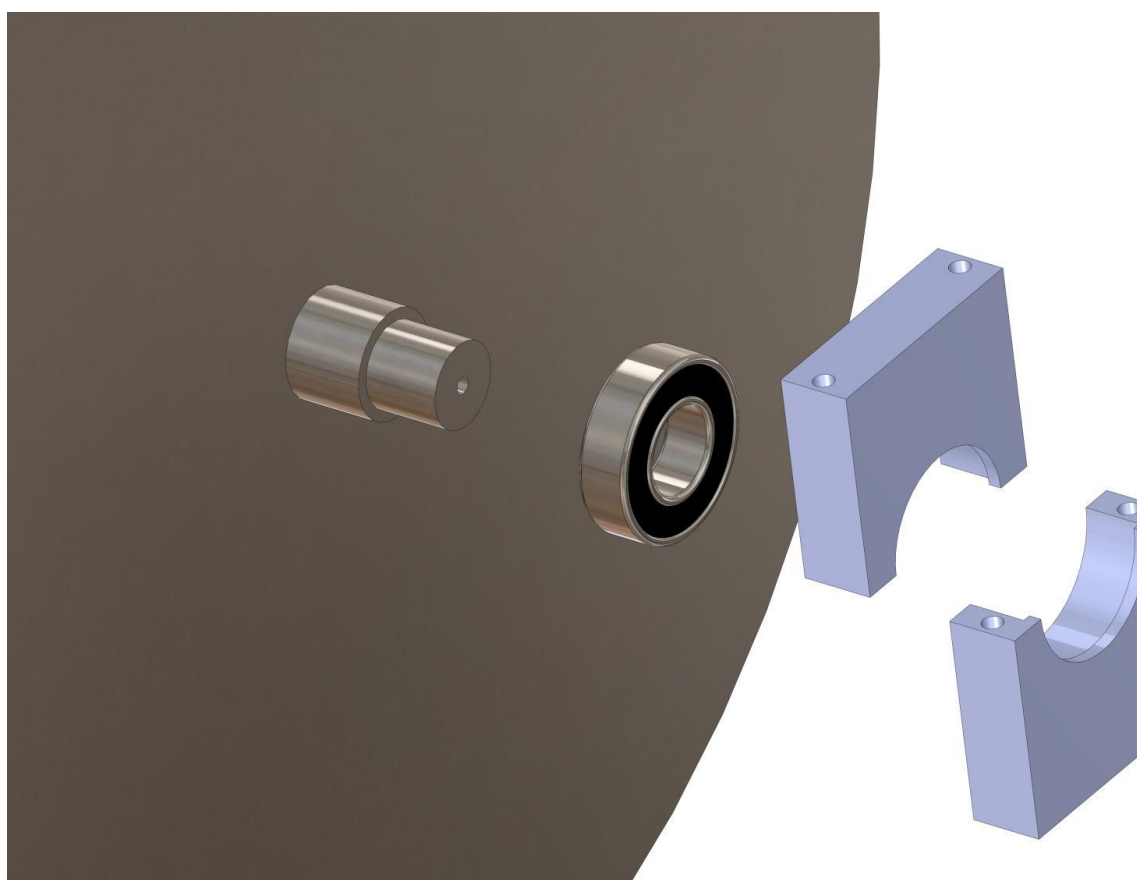


Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.
1	roloaco	1
2	eixo_do_rola	1
3	rolamento	2
4	suporte rolamento rolo	4

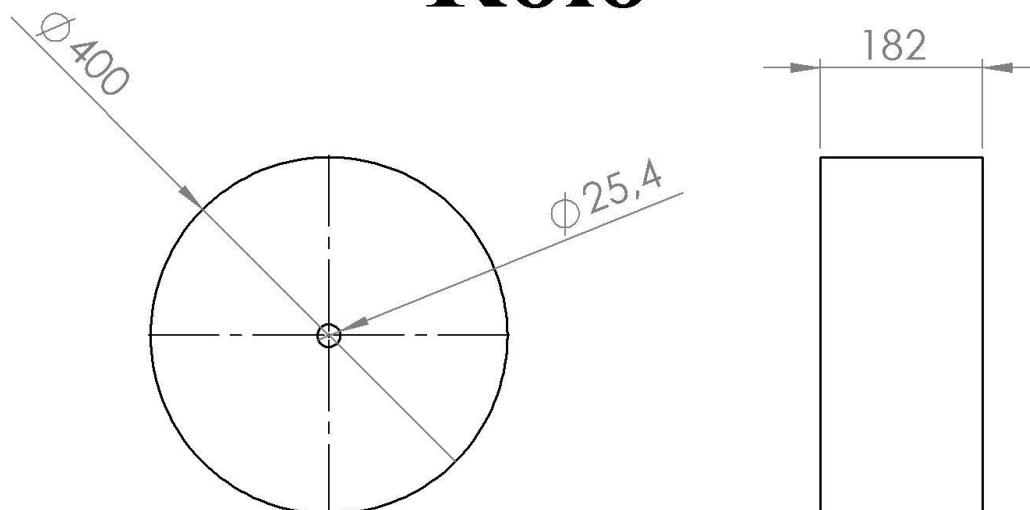
Suporte rolamento



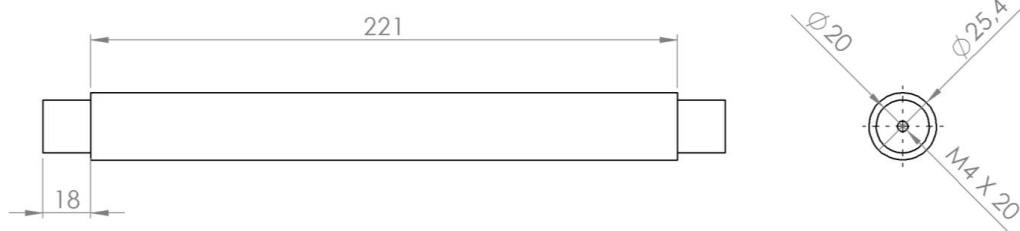
2 peças

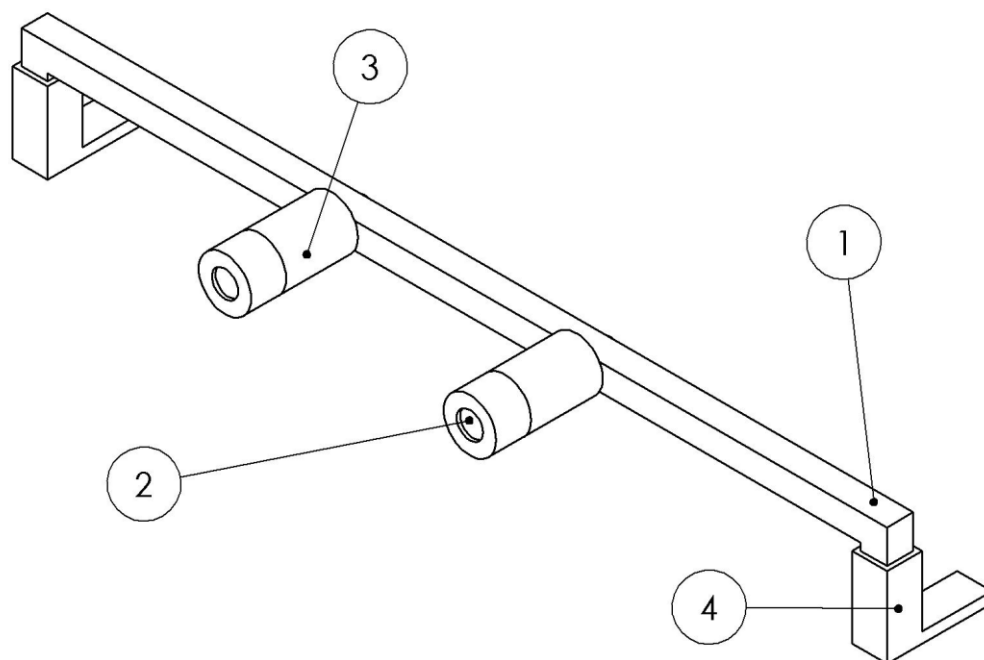


Rolo



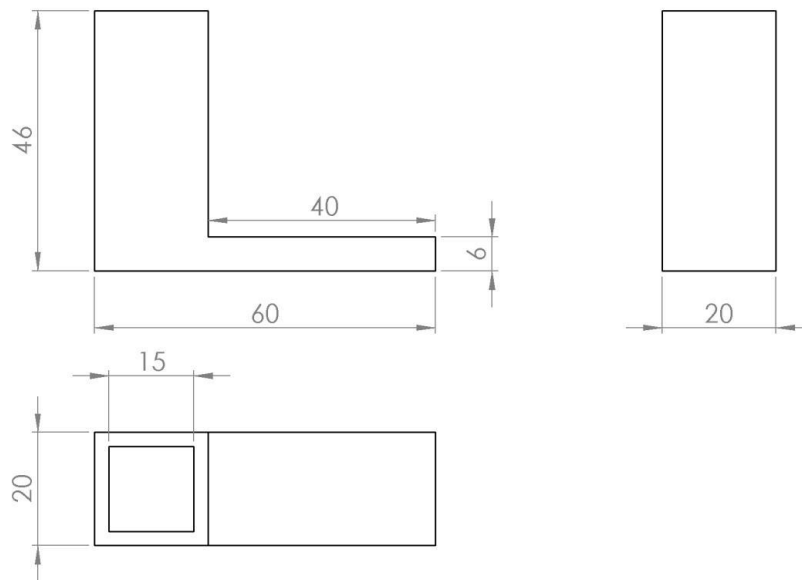
Eixo do rolo



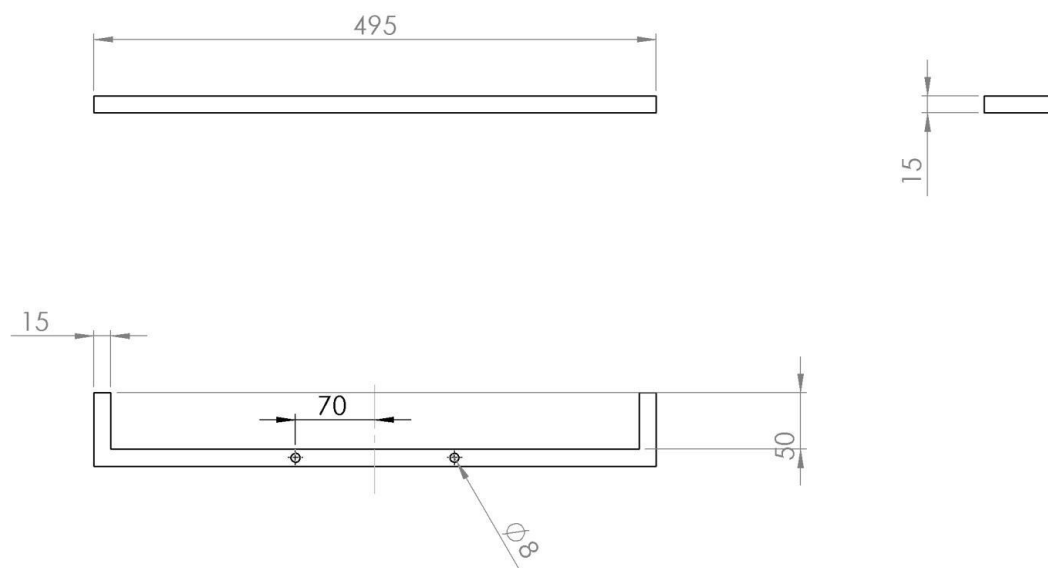


Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.
1	stop1_suporte	1
2	stop_parafuso	2
3	stop1_aparador	2
4	stop1_base	2

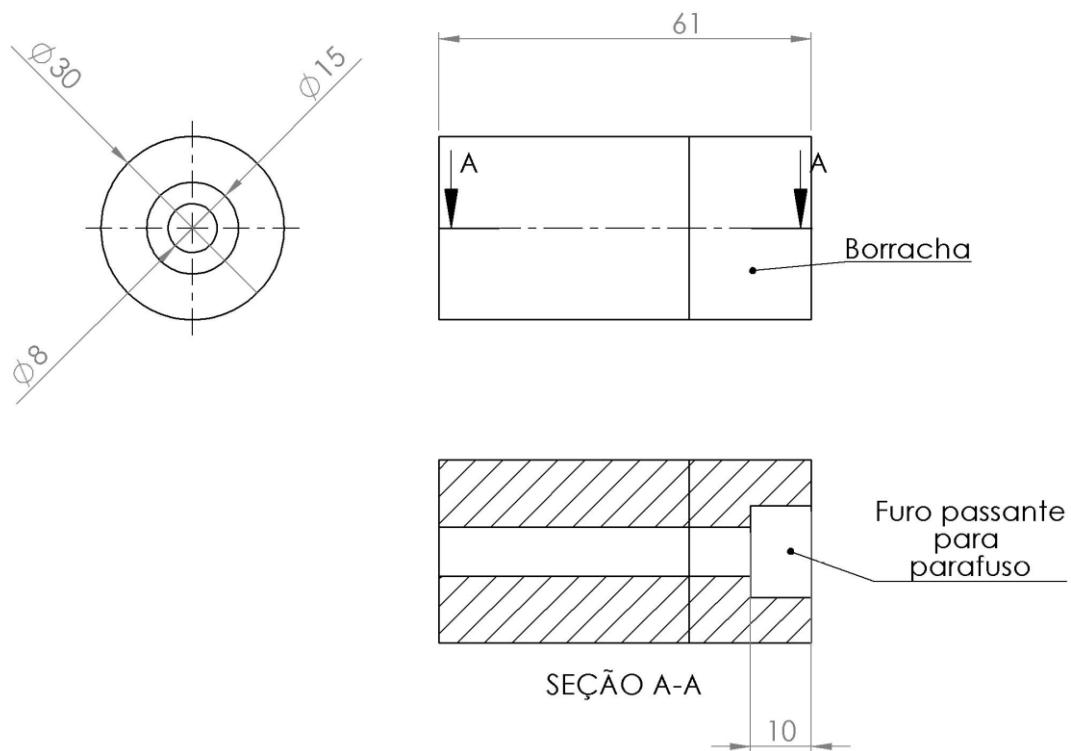
Stop Base 1

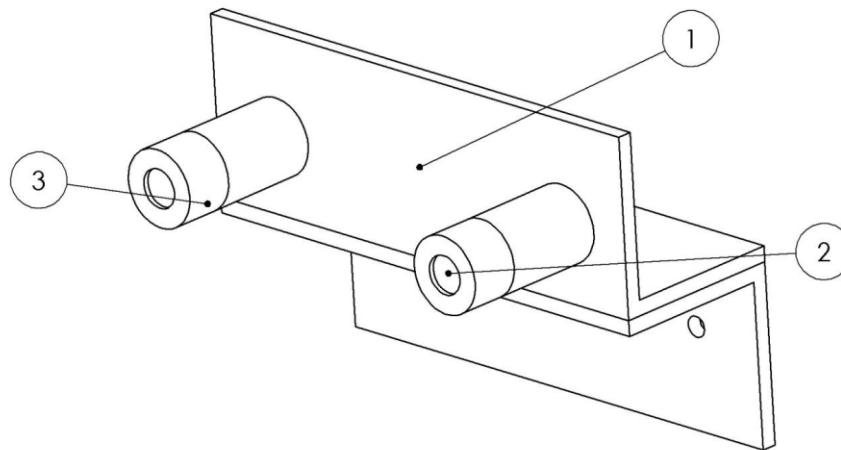


Stop1 suporte

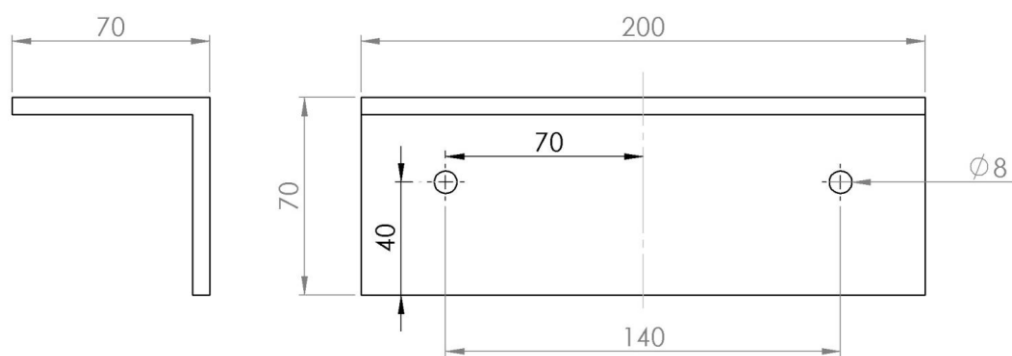


Batente stop (stop aparador)

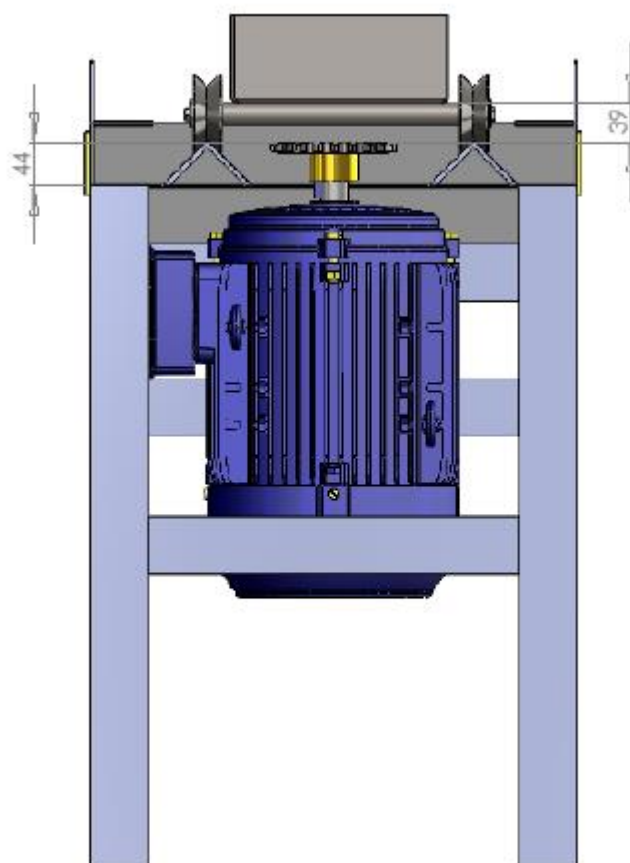


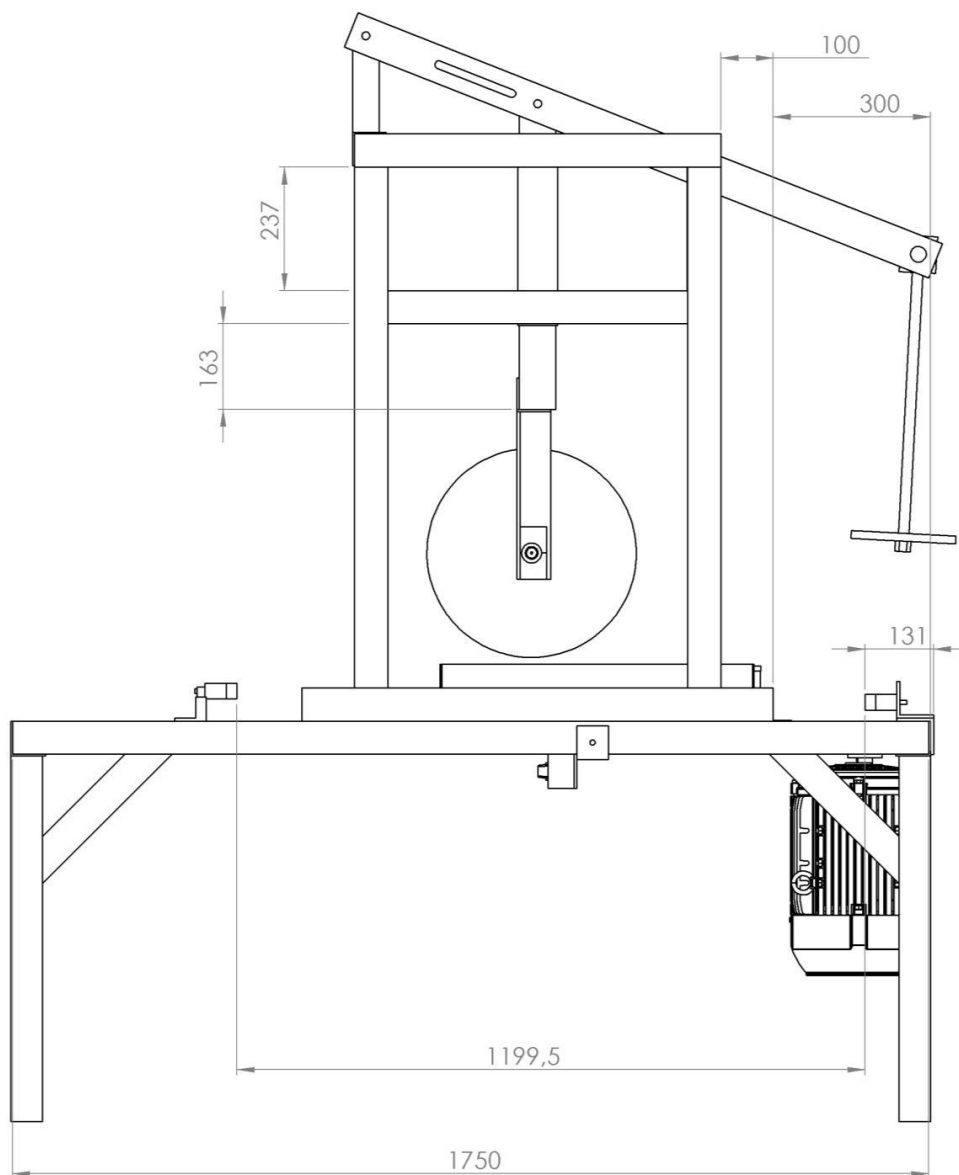


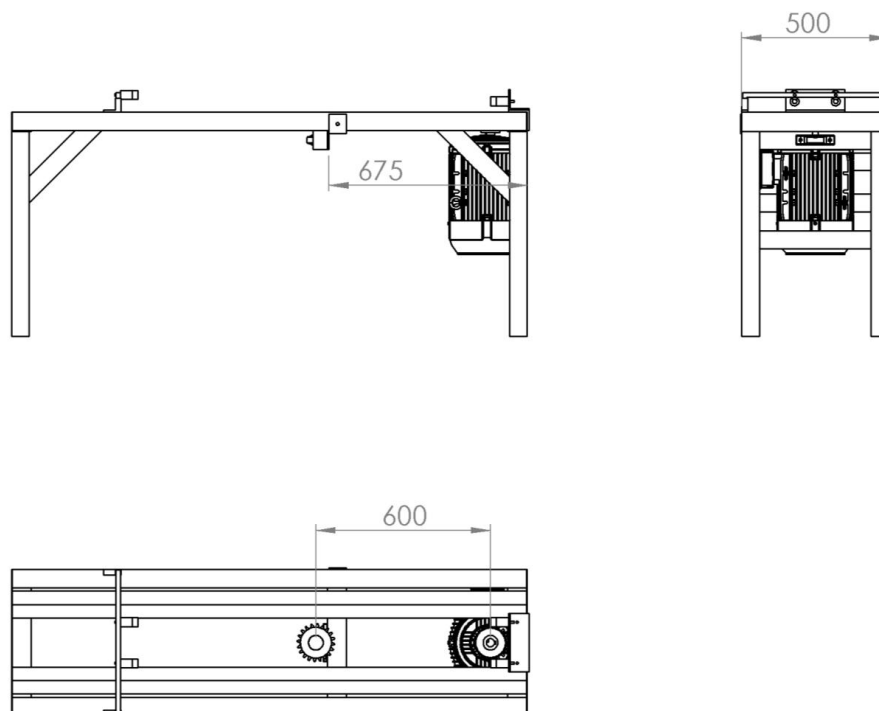
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.
1	stop2_suporte	2
2	stop_parafuso	2
3	stop1_aparador	2



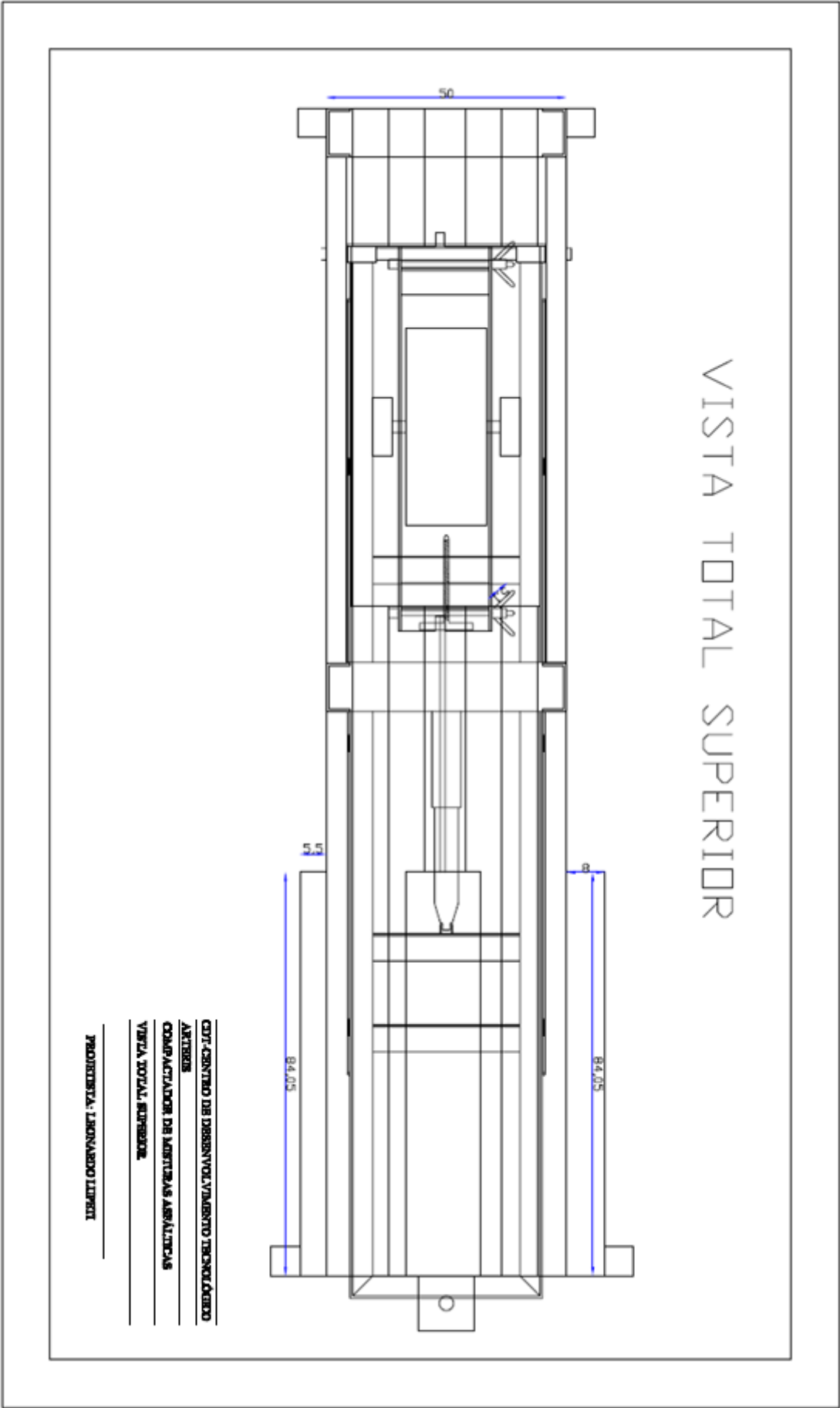
DETALHES POSICIONAMENTO PEÇAS

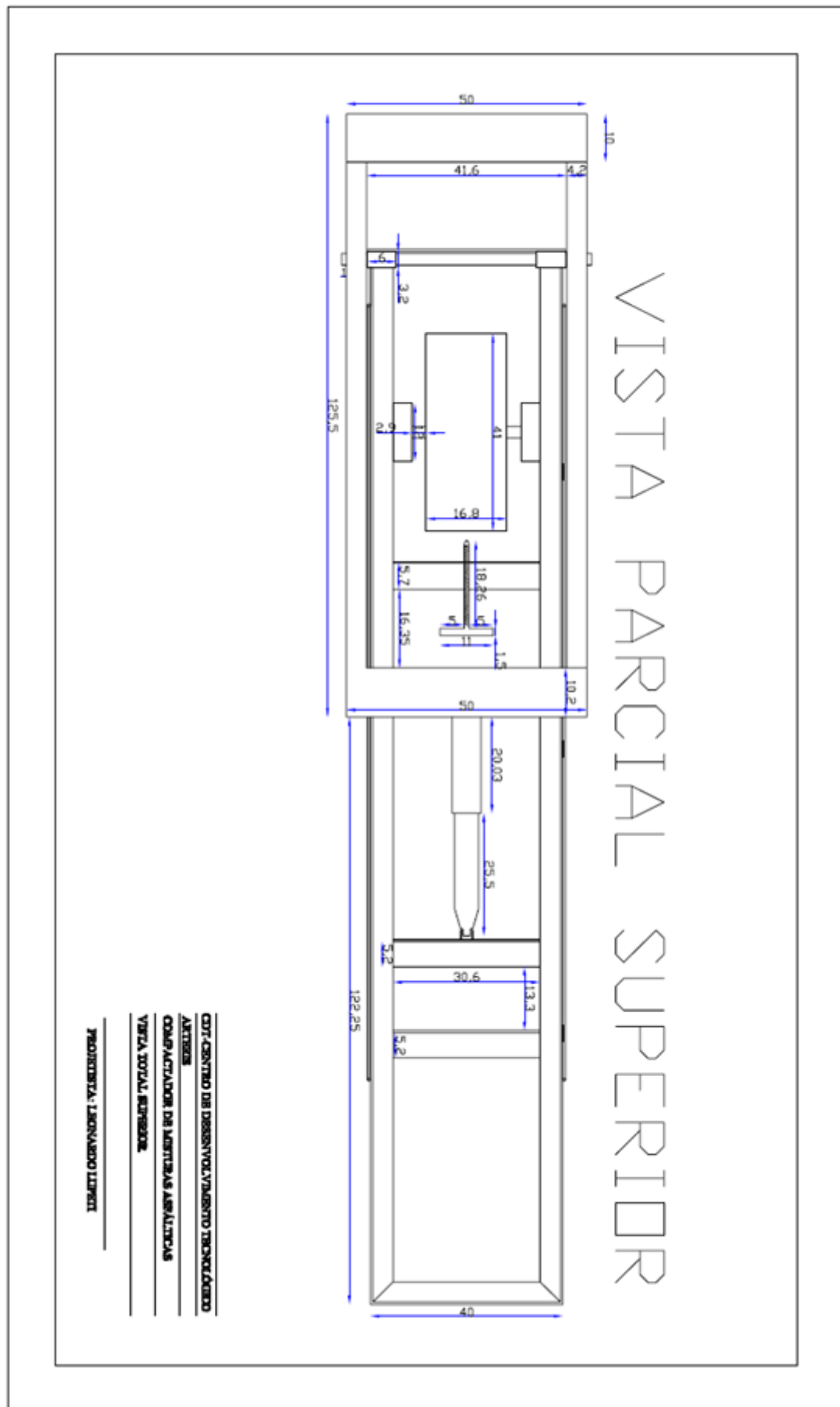


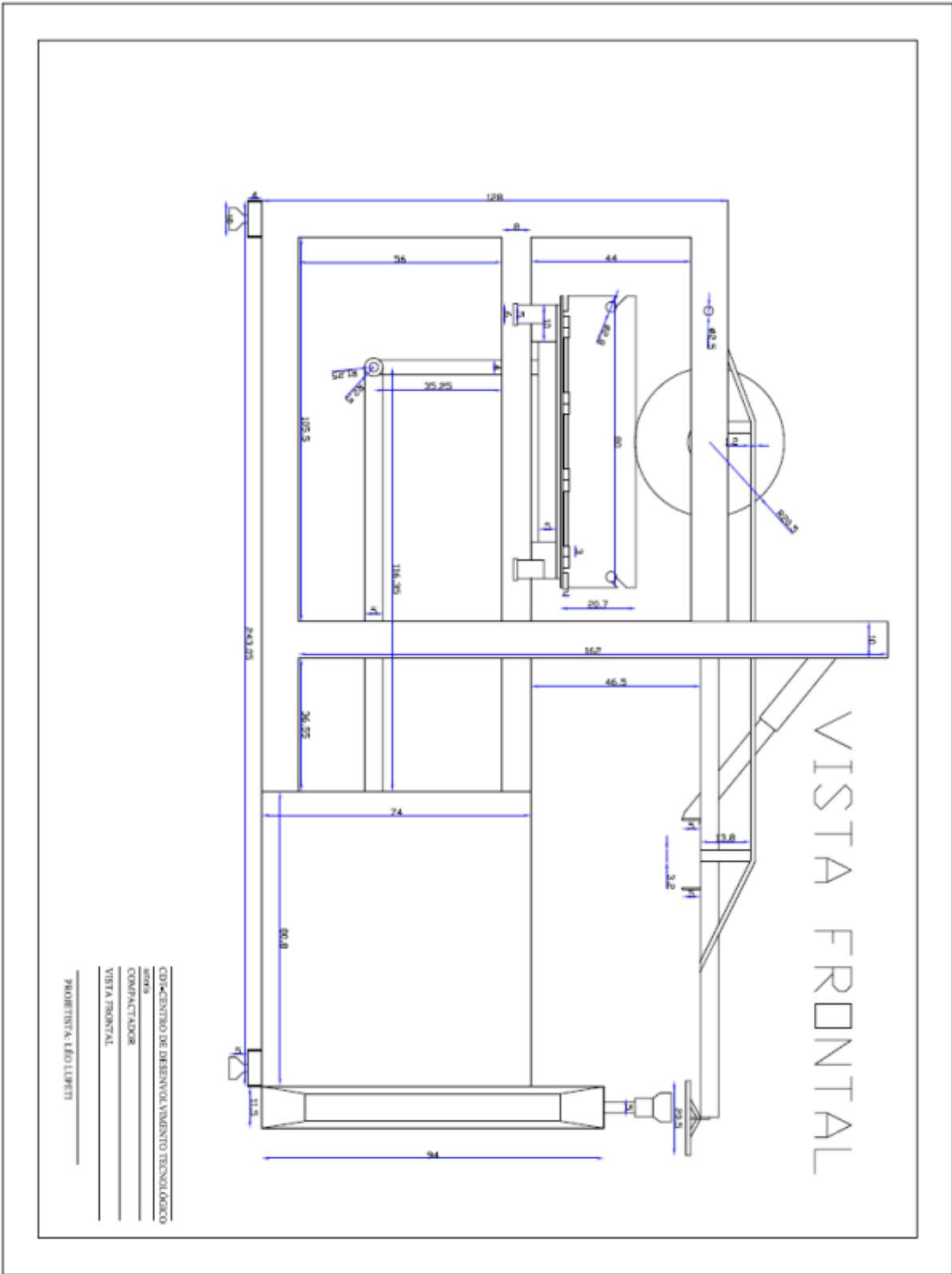


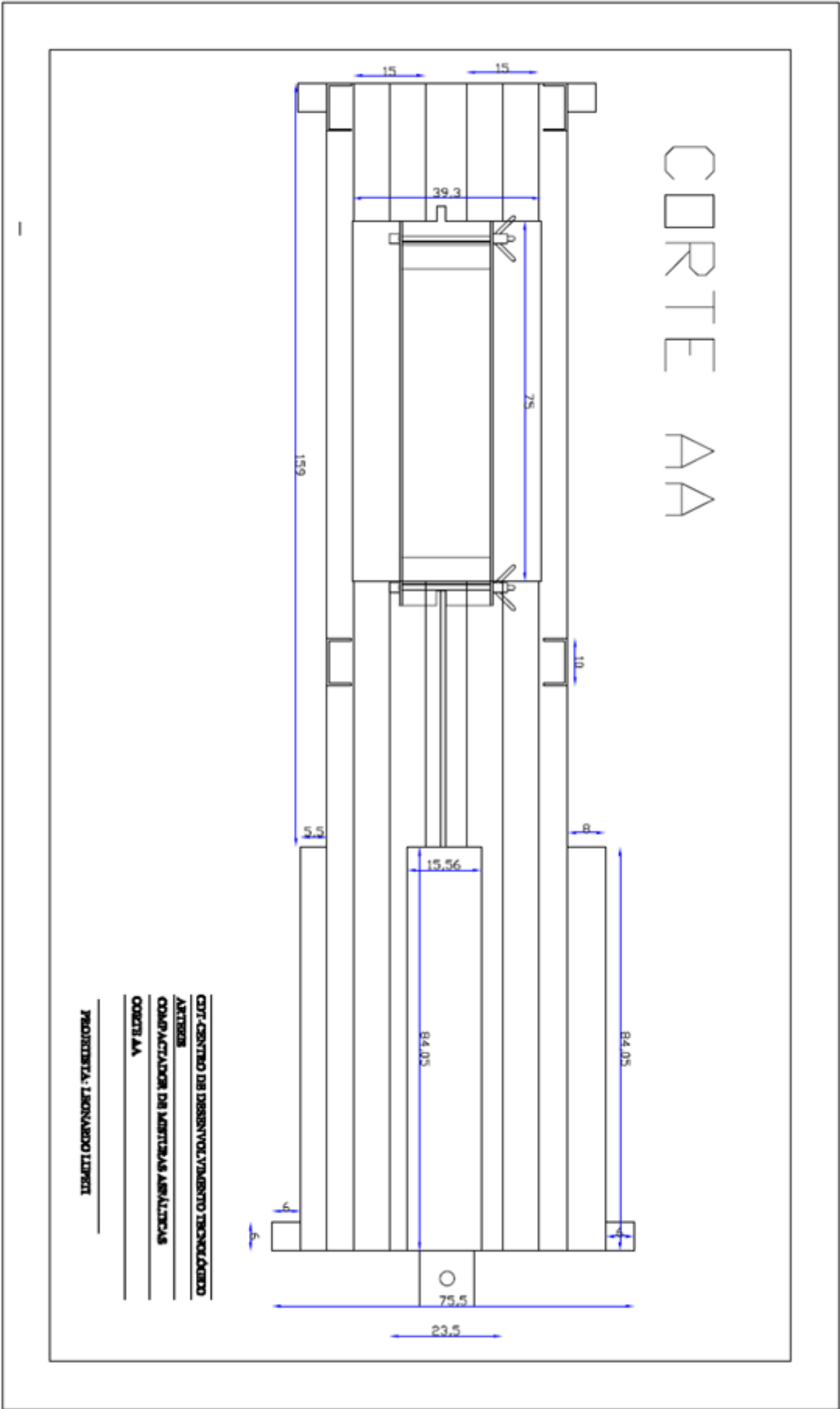


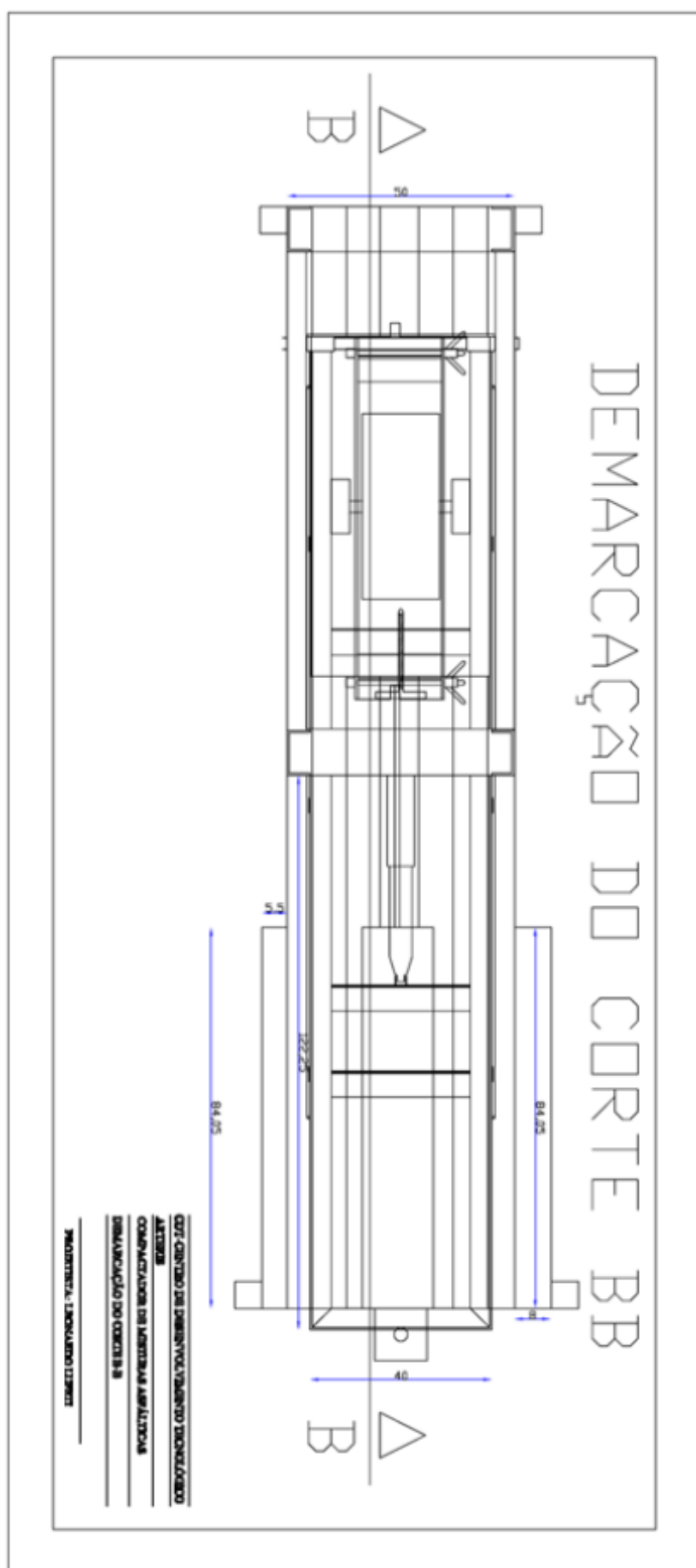
ANEXO 5 – MESA COMPACTADORA (PROJETO EXECUTIVO)

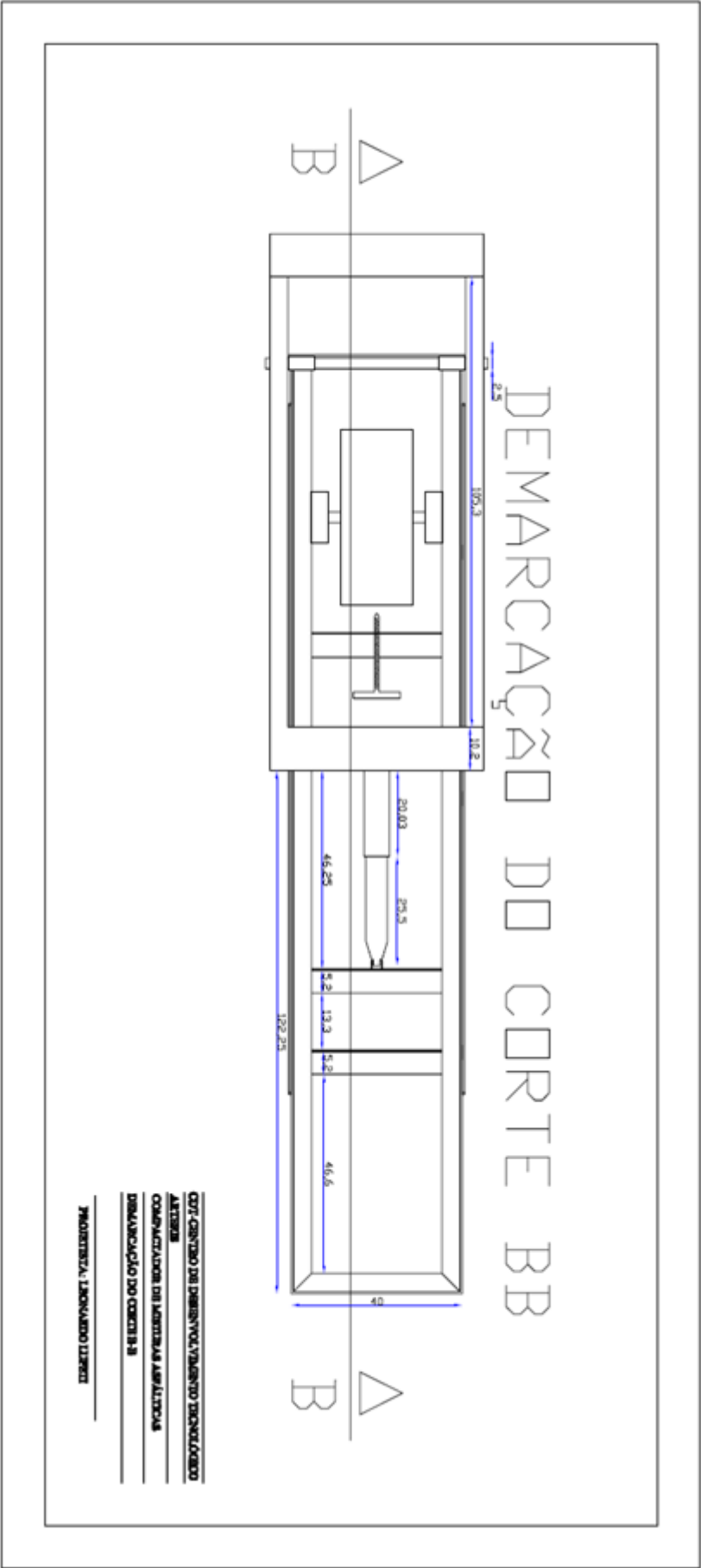


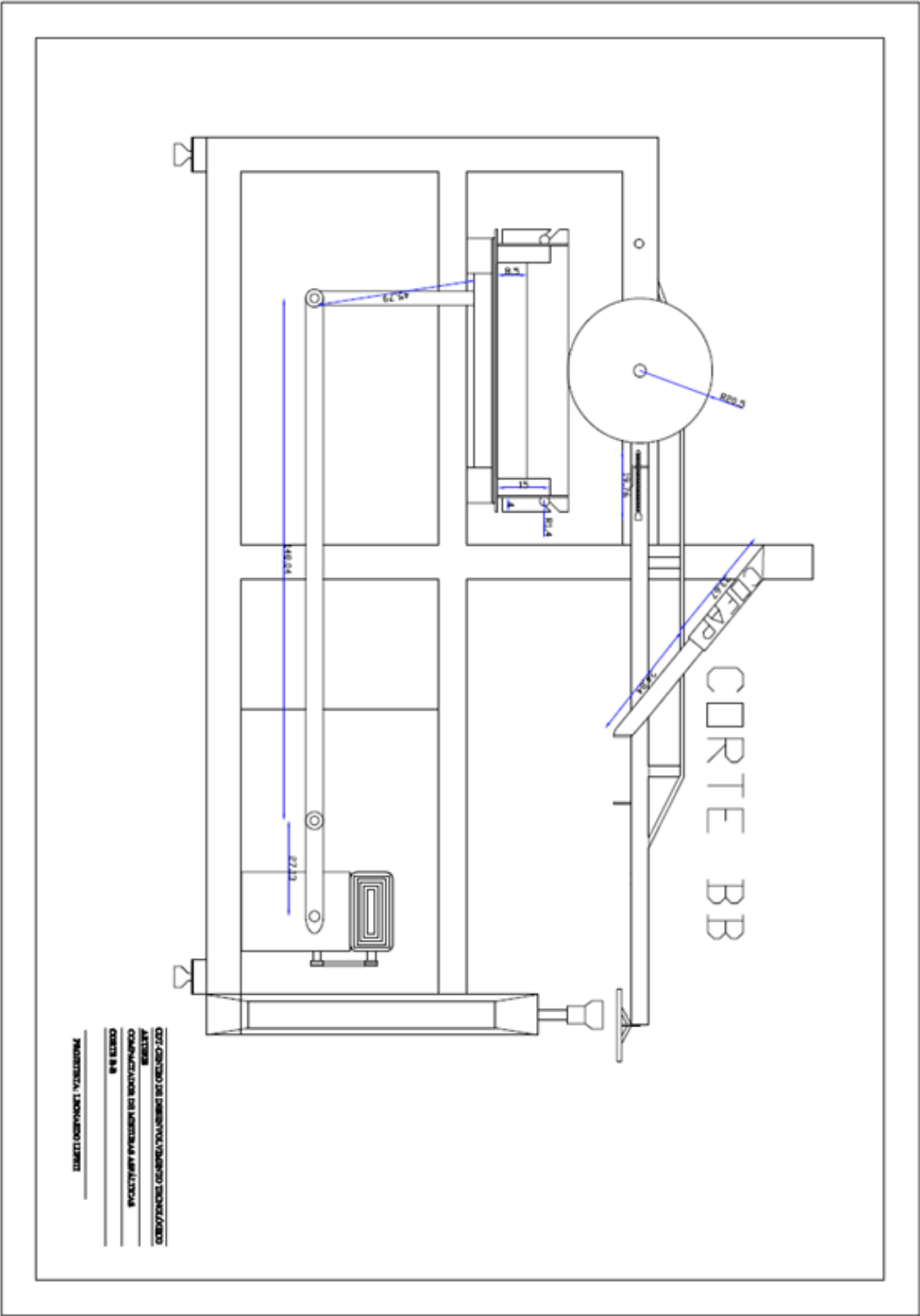


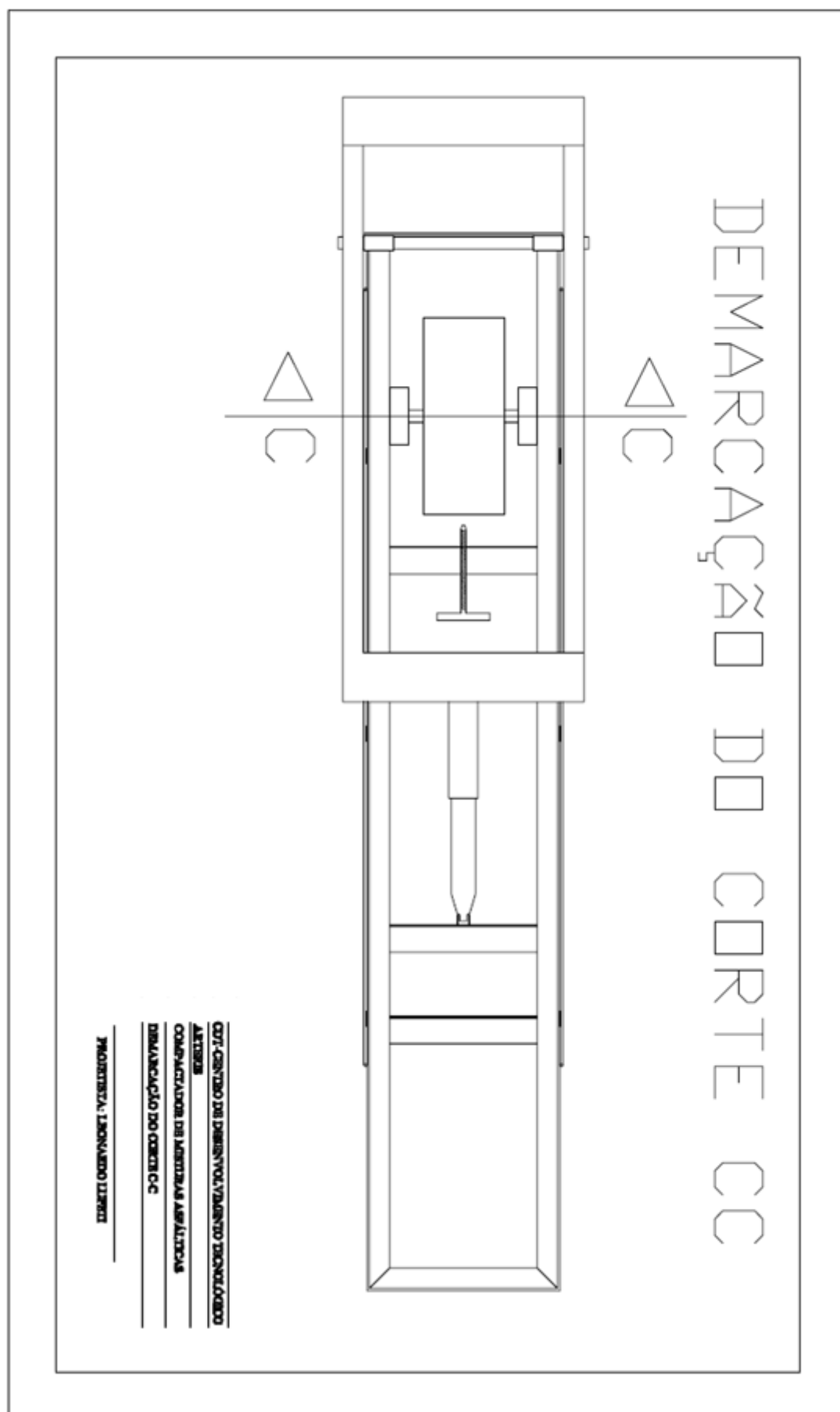




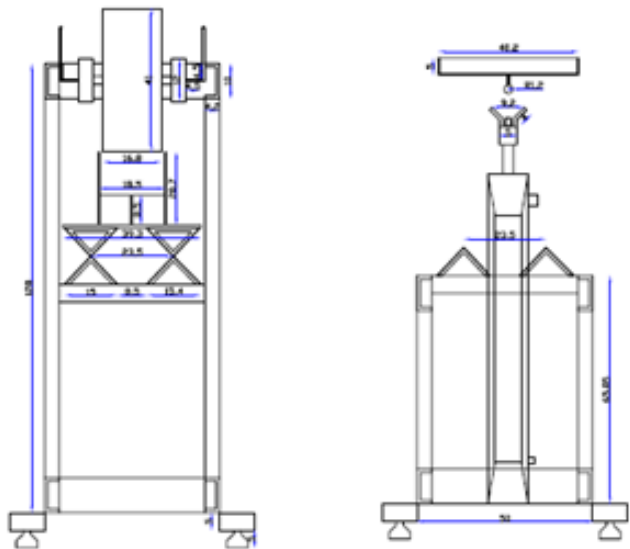








CORTE CC CORTE DD



CIVIL CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
ARTES
COMPACTADOR DE MISTURAS ASFÁLTICAS
CORTE C-C E D-D
PROJETO: LINDALDO CORREIA

ANEXO 6 – SIMULADOR DE TRÁFEGO (MOLDE)

