

Yader Alfonso Guerrero Pérez

**Estudo da Aplicabilidade do Ultra-Som na Avaliação das Propriedades
do Concreto Asfáltico**

**Florianópolis;
2009**

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

G934e Guerrero Pérez, Yader Alfonso

Estudo da aplicabilidade do ultra-som na avaliação das propriedades do concreto asfáltico [dissertação] / Yader Alfonso Guerrero Pérez ; orientador, Leto Momm. - Florianópolis, SC, 2009.

182 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Misturas asfálticas. 3. Ultra-som. I. Momm, Leto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

Yader Alfonso Guerrero Pérez

**Estudo da Aplicabilidade do Ultra-Som na Avaliação das Propriedades
do Concreto Asfáltico**

**Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina, como
parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.**

**Professor Orientador
Leto Momm
Professor Co-orientador
Ivo Padaratz**

**Florianópolis;
2009**

Dedico este pequeno passo a Deus e a minha família por todo o apoio e compreensão nos momento mais difíceis da minha vida.

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento; Porque é melhor a sua mercadoria do que artigos de prata, e maior o seu lucro que o ouro mais fino”.

Provérbios 3.13

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu Pai Carlos Alfonso Guerrero, uma pessoa exemplar em cada um dos seus comportamentos, a minha mãe Marina Rosa Pérez, quem desde a distancia sempre nos cuida com as suas orações, aos meus irmãos Guber, Beto e Ana, que com seu apoio oferecem forças adicionais para continuar a jornada.

Agradeço ao Prof. Leto Momm, uma pessoa com incrível disposição e meu amigo desde a minha chegada ao Brasil. Aos colegas do Laboratório de Pavimentação Breno, Márcio, Carlos entre outros.

Ao Prof. Ivo José Padaratz, pela sua orientação na interpretação dos resultados.

Agradeço aos amigos, Joe, Daniel, Marcelo, França, Daniela Karina, Cesar, Marcelo Martins, Luiz Henrique etc. com os quais sempre posso contar.

Agradeço a CAPES, que financia o aperfeiçoamento de pessoal de nível superior, pela bolsa de estudos.

SUMARIO

	Pg.
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.1 1.2 OBJETIVOS	3
1.2 1.2.1 Geral	3
1.2.2 Específicos	3
1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	3
1.3.1 Ensaio Pelo Método Direto	4
1.3.2. Ensaio pelo método indireto	5
1.4. JUSTIFICATIVA	7
1.5. LIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA	7
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	8
CAPÍTULO 2	
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS USADOS EM ENGENHARIA	10
2.1 O DEFLECTÓGRAFO	10
2.2 FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)	10
2.3 O VIBRADOR GOODMAN (VIBRADOR LÉGER)	12
2.4 O COLÔMETRO	13
2.5 O COLÔGRAFO	13
2.6 COLIBRI	13
2.7 ECO-IMPACTO (IMPACT-ECHO)	14
2.8 TERMOGRAFIA INFRA-VERMELHA	16
2.9 RADAR	16
2.10 ULTRA-SOM	18
2.10,1 Propagação das ondas ultrasônicas	18
2.10,2 O Ultra-som como ensaio não destrutivos	20
2.10.4 Fatores independentes das propriedades do material	36
2.10.5 Uso do ultra-som sem contacto pela aplicação em materiais de concreto asfáltico.	37

CAPÍTULO 3	
FORMULAÇÃO DAS MISTURAS (METODOLOGIA FRANCESA)	42
3.1 ESCOLHA DO NÍVEL DA PROVA DE FORMULAÇÃO	43
3.1.1 O nível 1	44
3.1.2 O nível 2	45
3.1.3 O Nível 3	45
3.1.4 O Nível 4	45
3.2 DESENVOLVIMENTO DAS MISTURAS	46
3.2.1 Ensaio utilizados	46
3.3 CORTE	62
3.4 TRIAGEM DOS CORPOS DE PROVA TRAPEZOIDAIS	63
CAPÍTULO 4	
DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E DO EQUIPAMENTO UTILIZADOS	65
4.1 MATERIAIS ACOPLANTES E EQUIPAMENTOS QUE FORAM USADOS NOS ENSAIOS	65
4.1.1 Equipamentos	65
4.1.2 Acoplantes	67
4.2 MATERIAS USADOS NOS ENSAIOS DA PESQUISA DE ASTRANA 2006.	70
4.2.1 Brita	70
4.2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	71
4.2.3 Curvas granulométricas e teor de cap.	73
4.3 MATERIAIS QUE FORAM USADOS NA PESQUISA DE BARRA 2009	75
4.3.1 Brita	75
4.3.2 Calcário	76
4.3.3 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	77
4.3.4 Granulometria	78
4.4 MATERIAIS QUE FORAM USADOS PARA A ELABORAÇÃO DA BASE DE BRITA GRADUADA E REVESTIMENTO EM LABORATÓRIO	79
4.4.1 Brita graduada	79
4.4.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	80
CAPÍTULO 5	
PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO E RESULTADOS	82

5.1 PROVAS INICIAIS	82
5.1.1 Ensaio de ultra-som pelo método direto	86
5.1.2 Ensaio de ultra-som pelo método indireto	86
5.2 ENSAIOS DE ULTRA-SOM PELO MÉTODO DIRETO	87
5.3 ENSAIOS PELO MÉTODO INDIRETO EM PLACAS DE CAMADAS SUPERPOSTAS	95
5.4 ENSAIOS PELO MÉTODO INDIRETO NA ESTRUTURA DE PAVIMENTO SIMULADA	99
5.4.1 Etapa construtiva	99
5.4.2 Bateria de ensaios de ultra-som pelo método indireto	102
5.5 ENSAIOS DE ULTRA-SOM NO LIGANTE E NA ROCHA MÃE	103
CAPÍTULO 6	
EXPLORAÇÃO DE RESULTADOS	105
6.1 PROVAS INICIAIS	105
6.1.1 Modo de transmissão direto	105
6.1.2 Modo de transmissão indireto	108
6.2 ENSAIOS DE ULTRA-SOM PELO MÉTODO DIRETO	109
6.3 ENSAIOS DE ULTRA-SOM PELO MÉTODO INDIRETO	141
6.4 ENSAIOS PELO MÉTODO INDIRETO NA ESTRUTURA DE PAVIMENTO SIMULADA	148
6.5 ENSAIOS DE ULTRA SOM NO LIGANTE E NA ROCHA MÃE	149
CAPÍTULO 7	
CONSIDERAÇÕES FINAIS	150
CAPÍTULO 8	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1.1- <i>Matriz</i> de ensaios 6	1
Figura 2.1. Princípio de funcionamento do Falling Weight Deflectometer.	11
Figura 2.2 Princípio de medida do sistema COLIBRI, exemplo do sinal de força e de aceleração.	15
Figura 2.3 Princípio de funcionamento do eco-impacto.	15
Figura 2.4. Princípio de funcionamento do radar em modo monostático	17
Figura 2.5. Resultante da campanha RAD-BHP: perfil radar longitudinal	17
Figura 2.6Tipos de ondas-Tensão	19
Figura 2.7 Aplicação de ensaio ultra-sônico em argamassa de cimento e sua representação esquemática mostrando os dois pares de transdutores	21
Figura 2.8 Redução da velocidade longitudinal em função do carregamento axial.	24
Figura 2.9 Redução da velocidade transversal em função do carregamento axial.	25
Figura 2.11. Esquema de funcionamento do ensaio de ultra-som. a) Método direto. b) Método indireto. c) Método semi direto .	27
Figura 2.11 Modo de transmissão indireto.	28
Figura 2.12 Princípio de funcionamento do método indireto	28
Figura 2.13 Curva tempo de propagação da onda (t) versus distância (d) para obtenção da velocidade e detecção da fenda.	29
Figura 2.14 Influência do tipo de agregado na relação entre V e resistência à compressão do concreto.	32
Figura 2.15 Exemplo de transmissão sem contato.	39
Figura 2.16 Corte da mesa de ultra-som e arranjo típico.	41
Figura 2.17 Exemplo do arranjo do espécime.	41
Figura 3.1. Resumo dos diferentes níveis de formulação de ensaios.	44
Figura 3.2 Exemplo de interpretação do ensaio na PCG.	45

Figura 3.3 Esquema geral de desenvolvimento das misturas asfálticas segundo a metodologia francesa	46
Figura 3.4 (a) Prensa de Compactação Giratória (PCG tipo 3) e (b) princípio do processo de compactação das misturas asfálticas.	47
Figura 3.5. Moldes de aço para compactação das misturas asfálticas.	49
Figura 3.6 Processos de (a) compactação por duplo pistão e, de (b) desmoldagem dos corpos de prova.	49
Figura 3.7 Corpos de prova condicionados em câmara térmica (18°C e umidade relativa do ar a 50% ± 10%).	50
Figura 3.8 Corpo de prova durante o processo de ruptura à compressão simples.	50
Figura 3.10 Curvas isócronas do módulo complexo.	55
Figura 3.11. Curva de equivalência frequência-temperatura ($T_R = 10^\circ\text{C}$)	55
Figura 3.12 Plano Cole-Cole do módulo complexo e função <i>Damping</i> .	56
Figura 3.13 Espaço de Black do módulo complexo.	57
Figura 3.14 Sinal de deformação longitudinal medido na base da camada	58
Figura 3.15 Evolução da força durante um ensaio executado com o controle do deslocamento.	59
Figura 3.16 Evolução do deslocamento durante um ensaio executado com o controle da força.	60
Figura 3.17 Representação gráfica de uma curva de fadiga calculada conforme os procedimentos normativos franceses.	61
Figura 3.18 Protótipo inicial da primeira máquina de fadiga e do módulo complexo do Brasil, desenvolvida no laboratório de pavimentação da UFSC.	61
Figura 3.19 Equipamento de corte e mesa deslizante.	62
Figura 3.20 Lógica de corte das placas	63
Figura 4.1 Processo de calibração do aparelho com o PUNDIT 6.	66
Figura 4.2 Efeitos da vaselina no Corpo de Prova testado.	67
Figura 4.3 Visualização dos efeitos da vaselina no Corpo de Prova testado após o corte.	67

Figura 4.4 Localização do CP trapezoidal nas placas secundárias procedentes do CP testado inicialmente.	68
Figura 4.5 Tentativa de Proteção do CP com o plástico fino.	69
Figura 4.6 Bentonita usado como material acoplante nos ensaios. (a) Em pó. (b) Misturada com água.	70
Figura 4.7 Curva de viscosidade dos ligantes CAP 50/70 e AMB (15%)	73
Figura 4.8 Curva granulométrica da misturas Dmáx=12,5mm,n=0,48	73
Figura 4.9 Curva granulométrica das misturas drenantes	75
Figura 4.10 Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70 (LUBNOR).	78
Figura 4.11 Curva granulométrica teórica usada na pesquisa	79
Figura 4.12 Especificação para brita graduada simples.	80
Figura 4.13 Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70	81
Figura 5.1 Malha feita no CP em cada face para medidas de Ultra-Som e esquema representativo do procedimento do ensaio.	83
Figura 5.2 Malha feita cada 5 cm no CP para medidas de Ultra-Som com o transdutor de 54 Khz	84
Figura 5.3 Malha feita cada 2 cm no CP para medidas de Ultra-Som com o transdutor de 200 Khz	84
Figura 5.4 Procedimento para o ensaio do método direto com ultra-som com o transdutor de 200 kHz	85
Figura 5.5 Localização dos transdutores para o ensaio de Ultra-Som (transdutor de 54 Khz)	87
Figura 5.6 Gabarito utilizado para a localização dos transdutores nos ensaios de ultra-som pelo modo de transmissão direto.	88
Figura 5.7 Gabarito utilizado para a medição das espessuras das placas de concreto asfálticos.	89
Figura 5.8 Processo de ensaio pelo método indireto	97
Figura 5.9 Granulometria dos materiais usados na Brita Graduada Simples (BGS)	100
Figura 5.10 Granulometria dos materiais usados na Brita Graduada Simples (BGS)	100
Figura 5.11 Gráfico para a determinação da umidade ótima.	101

Figura 5.12 Processo de compactação da brita graduada simples	102
Figura 5.14 Ensaios de ultra-som na rocha mãe.	103
Figura 5.15 Ensaios de ultra-som no ligante.	104
Figura 6.1 Esquema de localização de coordenadas dos tempos e das velocidades no corpo de prova	106
Figura 6.2 Curvas de igual tempo geradas no CP para o transdutor de 54KHz.	107
Figura 6.3 Vista isométrica da tramóia gerada para as curvas de igual velocidade no corpo de prova para o transdutor de 200 KHz.	108
Figura 6.4 Gráfico Tempo vs. distancia com o ensaio de ultra-som pelo método indireto com o transdutor de 54 kHz.	109
Figura 6.5 Visualização da placa CTB1 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	111
Figura 6.6 Visualização da placa CTB2 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	112
Figura 6.7 Visualização da placa CTB3 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	113
Figura 6.8 Visualização da placa CTB4 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	114
Figura 6.9 Visualização da placa CTB5 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	115
Figura 6.10 Visualização da placa CTBPC1 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	116
Figura 6.11 Visualização da placa CTBPC2 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	117
Figura 6.12 Visualização da placa CTBPC3 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	118

Figura 6.13 Visualização da placa CTBPC4 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	119
Figura 6.14 Visualização da placa CTBPC5 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.	120
Figura 6.15. Cortes de velocidades nos CP 1,1 (a) e 1,17 (b) da placa CTB1.	122
Figura 6.16 Representação da medição direta na placa.	133
Figura 6.17 Regressão linear para as placas CTB	134
Figura 6.18. Regressão linear para as placas CTBPC	136
Figura 6.19. Regressão lineal para todas as placas CTB (a) e CTBPC (b), agrupadas	138
Figura 6.20 (a) Área na média vs. C.V. da velocidade (b) C.V. das densidades dos C.P. trapezoidais vs. C.V. da velocidade	139
Figura 6.21 Distancia vs. tempo nos corpos de prova.	142
Figura 6.22 Esquema da medição dos corpos de prova	145
Figura 6.23 Gráfico tempo vs. distancia	146
Figura 6.24 Gráficos de distancia vs. tempo (a) e tempo vs. distancia (b)	148

LISTA DE TABELAS

	Pg.
Tabela 2.1. Comportamento da onda ultra-sônica em diferentes meios	20
Tabela 2.2. Classificação do concreto com base na velocidade de pulsos ultra-sônicos.	30
Tabela 2.3. Intervalo de velocidades de onda ultra-sônica para alguns tipos de rocha	32
Tabela 3.1 Diferentes ensaios de módulo complexo.	54
Tabela 4.1 Características do CAP 50-70.	71
Tabela 4.2 Características do CAP modificado por borracha moída de pneu (15%)	71
Tabela 4.3. Especificações do CAP modificado por polímero SBS	72
Tabela 4.4 Granulometria das misturas da mistura de concreto asfáltico	73
Tabela 4.5. Granulometria das misturas de concreto asfáltico drenante.	75
Tabela 4.6 Principais características do ligante betuminoso .	77
Tabela 4.7 Composição das frações dos granulares da curva teórica CT2 .	78
Tabela 4.8 Especificação para brita graduada simples.	80
Tabela 4.9 Principais características do ligante betuminoso.	81
Tabela 5.1 Tabela de espessuras das faces da placa de concreto asfáltico feita por ASTRANA	84
Tabela 5.2 Tempos de percurso de onda na placa de ASTRANA (2006) com o transdutor de 54 KHz.	86
Tabela 5.3 Tempos de percurso de onda pelo método indireto (transdutor de 200 kHz).	88
Tabela 5.4 Resumo resultados % de vazios e Densidade aparente para placa CTB e CTBPC	90
Tabela 5.5 Corpos de prova de concreto asfáltico, espessuras das camadas e materiais de mistura	96
Tabela 5.6 Resultados do ensaio de ultra-som pelo método indireto em placas de camadas superpostas.	98
Tabela 5.7 Granulometria dos materiais usados na Brita Graduada Simples (BGS).	99

Tabela 5.8 Tempos de percurso para o ensaio de ultra-som pelo modo de propagação indireto.	103
Tabela 5.9 Tempos de percurso de onda para a rocha mãe e o ligante asfáltico.	104
Tabela 6.1 Velocidades de onda com o transdutor de 54 kHz.	106
Tabela 6.2 Medidas de dispersão comparativas dos transdutores para o ensaio	106
Tabela 6.3 Resumo dos valores médios das velocidades obtidas para cada placa.	110
Tabela 6.4 Intervalos de velocidades para cada uma das placas estudadas	121
Tabela 6.5 Áreas encontradas em cada um dos intervalos para as placas estudadas.	121
Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC	123
Tabela 6.7 Resumo dos resultados das áreas da análise grupal nas placas	140
Tabela 6.8 Resumo das velocidades dos corpos de prova.	145
Tabela 6.9 Velocidades da rocha mãe e do ligante asfáltico.	149

RESUMO

O ensaio do ultra-som faz parte dos ensaios não destrutivos de análise das propriedades dos materiais, que vem sendo usado comumente em diversas áreas da engenharia civil, devido à facilidade da operação, ao seu relativo baixo custo, rapidez na execução dos testes e à ausência de danos no material analisado. Estas condições permitem que o ensaio do ultra-som ofereça a viabilidade para que seja usado na realização de testes *in situ*. Neste trabalho, foi utilizado o ensaio de ultra-som pelo modo de transmissão indireta para estimar a espessura da camada de concreto asfáltico em 6 placas compactadas em camadas superpostas. O método ultra-sônico tem dado bons resultados para estimar espessuras de peças de concreto com cimento Portland, porém a mesma qualidade não foi obtida neste trabalho para concreto asfáltico. A velocidade de propagação da onda na camada superficial pode ser determinada com o uso deste ensaio. Na metodologia francesa, dois dos ensaios mais importantes na preparação das misturas de concreto asfáltico são: o ensaio de fadiga e o ensaio do módulo complexo. Estes ensaios são realizados com corpos de prova trapezoidais extraídos de placas, previamente compactadas, quer sejam extraídas de campo ou preparadas em laboratório, as quais devem apresentar uniformidade na distribuição dos granulares e homogeneidade dos vazios. Geralmente, o método para avaliação da homogeneidade na placa é o Gamadensimétrico Nuclear, contudo, este equipamento não está disponível. Por esta razão, busca-se com a técnica de ultra-som encontrar uma maneira de avaliar a homogeneidade nas placas que atenda as limitações de precisão e estatística indicadas nas normas dos ensaios de módulo complexo e fadiga. O trabalho avalia o uso do método de ultra-som, pelo modo de transmissão direto, em 10 placas de concreto asfáltico para a determinação da velocidade de propagação da onda. Um dos critérios de seleção dos corpos de prova trapezoidais a utilizar nos ensaios de fadiga e do módulo complexo é a porcentagem de vazios. Os valores resultantes das porcentagens de vazios dos corpos de prova trapezoidais foram comparados com as velocidades de onda obtidas nos ensaios com ultra-som. Com a finalidade de facilitar a análise dos dados, os resultados são apresentados de forma gráfica (curvas de igual velocidade, em três dimensões e em cortes). Este estudo verificou que,

ainda que o ensaio de ultra-som possa detectar a variação na homogeneidade das placas de concreto asfáltico, o nível de precisão do aparelho utilizado ainda não permite que o ensaio seja usado com o objetivo de seleção de placas para a realização dos ensaios de fadiga e módulo complexo, já que a triagem dos corpos de prova finais é bastante rigorosa.

Palavras-chave: Concreto asfáltico, Ultra-som, método indireto, método direto.

ABSTRACT

The ultrasound is a non destructive testing method that has been widely used in the construction industry, due to its portability, be easily operated, has low cost and does not cause damages on the surface materials under test. These conditions allow in practice to ultrasound be used as a reliable testing for in situ applications. In this research ultrasound has been used in its indirect mode of transmission to estimate the thickness of asphalt concrete layers. There were used a total of 6 slabs All of them were compacted as overlapped layers. It is known that ultrasound has successfully been used to estimate Portland cement concrete layers however, in this research using asphalt concrete the tests has not shown good results. The speed propagation of the wave in the surface layer can be determined with the use of this test. In the French methodology context, there are two important tests used in the asphalt mixes formulation, such as: complex modulus and fatigue tests. These tests are made with specimens of trapezoidal geometry, which are extracted from slabs previously compacted in the field or in laboratory. These slabs must have a uniform distribution of the granular particles and homogeneity related to the air void contents. Generally, the Nuclear Gammadensimetric is the device used to attest the homogeneity of slabs, however, it is not available in Brazil nowadays. Taking into account this fact, the ultrasound technique comes out as a way to attest the homogeneity of the asphalt mix slabs, according to the statistical and accurate limits indicated by the French standardized specifications concerning the complex modulus and fatigue tests. Hence, this paper evaluates the use of the ultrasound technique, in the indirect method of measurement of a total of 10 asphalt mix slabs, in order to determine the speed propagation of the wave. One of the criteria used for selecting the trapezoidal specimens is regarding the air void content. The values obtained from these air void contents were compared to the speeds of the waves determined by the ultrasound tests. In order to become easier the data analysis, the results are presented in charts (equal speed curves, in three dimensions and with details of the cross sections of the slabs). This research verified that even the ultrasound test can detect the variations concerning the homogeneity of the asphalt mix slabs, the level of accuracy of the device used is not recommendable for

measurements viewing to select slabs for complex modulus and fatigue tests, due the selecting process specified by the French methodology be very rigorous.

Keywords: asphalt concrete, Ultrasound, indirect method, direct method.

Capítulo 1.

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A necessidade do deslocamento de bens, produtos e usuários, à medida que a sociedade e a tecnologia avançam, torna o nível de exigência da qualidade das rodovias cada vez maior, devido à sociedade atualmente representar uma contínua e progressiva demanda relacionada à utilização da malha viária.

Particularmente no Brasil, o modelo é realizado majoritariamente pelo modal rodoviário, o que obriga os engenheiros e pesquisadores a projetar e construir estruturas de pavimentos cada vez melhores e com maior durabilidade mantendo os padrões de conforto e segurança, no menor custo de construção e manutenção.

Na metodologia francesa, os ensaios de fadiga e do módulo complexo se destacam pela importância que possuem no processo de seleção das misturas asfálticas, a fim de que reúnam as características necessárias para serem utilizadas na composição das estruturas de pavimentos. Os critérios rigorosos adotados para a triagem dos corpos de prova que são utilizados nos ensaios têm em conta a porcentagem de vazios e as dimensões. Logo, a placa da qual os corpos de prova são obtidos deve possuir uma boa homogeneidade, a fim de que possa ter um aproveitamento em larga escala das amostras. Atualmente, o ensaio gamadensimétrico é especificado pela metodologia francesa para executar esta verificação, contudo não se encontra disponível no Brasil no momento, havendo a necessidade de se estudar outro procedimento técnico que permita oferecer resultados pertinentes a este tipo de variável, isto é, a homogeneidade do material.

Diversos tipos de ensaios não destrutivos têm sido empregados no meio científico- tecnológico para o desenvolvimento de uma vasta linha de pesquisas, tais como: esclerometria, gamagrafia, pacometria, penetração de pinos, eco-impacto e ultra-som entre outros. O ultra-som vem sendo usado como um dos ensaios não destrutivos mais explorados, devido à sua facilidade de uso, baixo

custo, rapidez na execução dos testes e à ausência de danos causados nos materiais analisados. Estas condições permitem que o ensaio ofereça viabilidade para execução de ensaios também *in situ*.

O ensaio por ultra-som, de maneira geral, consiste em medir a velocidade de transmissão alcançada pelas ondas ultra-sônicas através de um dado material. Esta velocidade, porém, depende das propriedades do material analisado e não da sua geometria (BUNGEY, 1989).

O ultra-som de contato, o qual é definido quando o transdutor tem contato físico com o material a ser medido, tem sido usado para a inspeção do concreto de cimento Portland por muitos anos, porém para os concretos asfálticos o seu uso é ainda escasso.

O princípio teórico dos ensaios de ultra-som oferece perspectivas para a utilização nos concretos asfálticos devido às suas características. Neste trabalho, foi usado o ensaio pelo método direto para a estimativa da homogeneidade das placas moldadas de acordo com a metodologia de compactação francesa, a fim de comparar os resultados das velocidades de onda obtidas na placa original, considerando as densidades e as percentagens de vazios dos corpos de prova trapezoidais finais em consonância com a respectiva localização na placa. O método indireto também foi uma alternativa estudada, com o intuito de estimar no laboratório a espessura em placas de camadas superpostas, uma camada de concreto asfáltico denso e outra de concreto asfáltico drenante.

O controle de qualidade da produção do concreto asfáltico e a subsequente utilização requerem uma extensa pesquisa laboratorial integrada aos processos executivos no campo. Estes aspectos, quando bem conhecidos, determinam o comportamento das misturas asfálticas com uma melhor precisão. Desta forma, tendo-se uma metodologia que possa estimar características importantes das misturas asfálticas (espessura, densidade, homogeneidade, etc.) de forma expedita e com um grau elevado de confiança em campo, haveria a possibilidade de se controlar de maneira eficiente e correta os procedimentos executivos no campo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa é a verificação de uma possível validação do ensaio de ultra-som para a estimativa das propriedades dos concretos asfálticos.

1.2.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos vários objetivos específicos, os quais são:

- Determinar a velocidade de propagação das ondas de ultra-som dos corpos de prova de forma direta;

- Determinar a velocidade de propagação das ondas de ultra-som de forma indireta;

- Avaliar a homogeneidade da densidade de placas com o uso da velocidade de onda ultra-sônica obtido pelo método indireto;

- Verificar se existe correlação das velocidades de propagação das ondas de ultra-som das placas com as propriedades dos corpos de prova finais (densidade e porcentagem de vazios);

- Estimar as espessuras das camadas densas nas placas pelo método indireto no laboratório e,

- Estimar a espessura da camada de revestimento na estrutura do pavimento simulada no laboratório.

1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Com o intuito de aproveitar de melhor forma os recursos e os materiais e otimizar as pesquisas que são desenvolvidas, foram aproveitados corpos de prova elaborados para outras pesquisas e que supriam as necessidades deste projeto.

1.3.1 Ensaio Pelo Método Direto

No laboratório de pavimentação, havia placas que foram usadas para o desenvolvimento da pesquisa de ASTRANA (2006), entre as quais foi encontrada uma placa de mistura asfáltica densa, que apresentava as condições ideais para a realização de ensaios iniciais os quais apontaram dados importantes no desenvolvimento do trabalho investigativo. Nesta placa, foi traçada uma malha para a localização das medições e o material acomplante usado foi vaselina.

No momento da realização da pesquisa, estava em andamento um projeto de pesquisa que incluía os ensaios do módulo complexo e de fadiga baseados na metodologia francesa, o que oferecia uma grande possibilidade para uma análise integral dos resultados. As placas usadas para análise foram compactadas seguindo a metodologia francesa na Universidade de São Paulo (USP) por BARRA (2009), foram compactadas doze placas, sendo dez delas utilizadas nos estudos desta pesquisa. Com o objetivo de fixar as posições dos transdutores no momento das medições com o ultra-som e das espessuras, foi feito um gabarito que permitiu posicionar os dados obtidos em coordenadas. Estas coordenadas foram estabelecidas a cada dois centímetros, e numeradas no eixo X, de 1 até 27, e no eixo Y da letra A até Q.

Cada uma das placas foi disposta horizontalmente e foram tomadas as medições da espessura em cada posicionamento. Antes do começo das seqüências de ensaios, foram feitas as respectivas calibrações do aparelho de ultra-som (PUNDIT 6.0) na barra de metal de referência com o tempo de percurso conhecido.

Para se ter acesso às duas faces das placas, foram postas de maneira vertical, colocando as guias na coordenada a ser medida e com os transdutores em contraposição para obter o tempo de percurso de onda em cada ponto. Com o tempo e a espessura, é possível o cálculo da velocidade da onda. Logo que são feitas as leituras, as placas são cortadas em corpos de prova trapezoidais, nos quais foram calculadas a porcentagem de vazios, as densidades e as dimensões para a triagem de seleção. Nos corpos de prova trapezoidais, foram ensaiados a fadiga e o módulo complexo na pesquisa de BARRA (2009).

No total, nesta etapa da pesquisa, foram utilizadas um total de 11 placas, 10 das quais foram serradas para a obtenção de corpos de prova trapezoidais.

1.3.2. Ensaio pelo método indireto

Esta etapa da pesquisa foi dividida em duas fases, uma fazendo uso de placas já compactadas e outra numa simulação das camadas do pavimento em laboratório com o uso da máquina compactadora de placas.

Ensaio pelo método indireto em placas

Para o desenvolvimento do trabalho, foram testadas um total de 6 placas, que foram empregadas na pesquisa de ASTRANA (2006), as quais apresentavam uma camada de concreto asfáltico denso e outra de concreto asfáltico drenante. Inicialmente foram feitas as medições de ultra-som sobre as placas com a camada de concreto asfáltico drenante localizada na superfície. Após estas leituras, foram feitas as medições sobre a camada de concreto asfáltico denso.

Ensaio pelo método indireto sobre a estrutura do pavimento simulada

Com o objetivo de tentar simular uma estrutura de pavimento de concreto asfáltico em campo, foi projetada uma estrutura de duas camadas, as quais foram feitas utilizando a máquina compactadora de placas. A camada de base foi feita de brita graduada simples (BGS) e foi compactada seguindo a norma francesa AFNOR NF T 98-250-2. A curva granulométrica usada para a mistura de concreto asfáltico assim como o teor de betume foi tomada da pesquisa de BARRA (2009).

Para obter a umidade ótima de compactação para a Brita Graduada Simples, foi feito o ensaio de Proctor (NBR 7182). No momento da compactação e com a finalidade de evitar ao máximo erros de leitura no ensaio de ultra-som, foi feito um molde em madeira, no qual foram compactadas as camadas de base em Brita Graduada Simples em uma espessura aproximada de 10 cm, e a camada de revestimento em concreto asfáltico de 5 cm

aproximadamente. Após o fim do procedimento de compactação, realizaram-se as medições de tempo das ondas acústicas.

Na figura 1.1 é apresentada a matriz de ensaios realizados para cumprir o objetivo da pesquisa no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

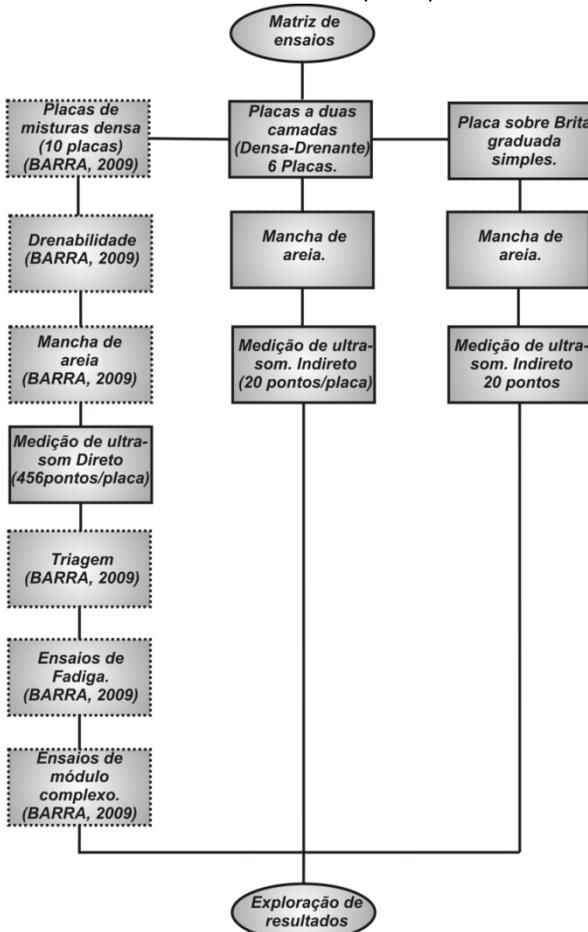


Figura 1.1- Matriz de ensaios

1.4. JUSTIFICATIVA

Neste momento, as pesquisas desenvolvidas na França, em relação à concepção mecanicista dos pavimentos, têm sido bem aceita

pela comunidade científica do mundo. Atualmente, encontra-se em etapa de estudos no Brasil, e gradualmente está abrindo mercado para este tipo de tecnologia no país. Na metodologia francesa, os ensaios de maior importância para a determinação da mistura asfáltica a ser usada são o ensaio de fadiga e do módulo complexo. Os corpos de prova com que são feitos os ensaios provêm de placas de 40cmx60cmx10 a 15cm.

O critério de seleção das placas realizados na metodologia francesa é restrito por um método chamado gamadensímetro, mas este equipamento não é muito popular e nem disponível nos centros de pesquisa no Brasil. Por este motivo, se faz necessária a procura de um teste que substitua o ensaio, e os princípios nos quais está baseado o ensaio de ultra-som indicam que este pode cumprir o requerimento de seleção de placas.

Antes de aplicar qualquer tipo de teste ao campo, é preciso ter certeza do seu comportamento em laboratório, onde podem se ter as condições controladas para poder estabelecer a sua vulnerabilidade ante diferentes fatores que podem de certa maneira afetar e/ou influenciar as medições e a funcionalidade do material e do próprio ensaio. Fundamentado nisto, foram feitos testes no laboratório com o ensaio de ultra-som pelo método indireto para avaliar a sua possível utilização em campo.

1.5. LIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA

As limitações são derivadas dos materiais presentes no laboratório, aos corpos de prova feitos para a pesquisa de BARRA (2009) e ASTRANA (2006), e às derivadas à utilização do equipamento do ensaio de ultra-som.

Foi utilizado o aparelho PUNDIT-6 e PUNDIT-PLUS (*Portable Ultrasonic Non Destrutive Digital Indicating Test*), que mede o tempo decorrido desde a emissão da onda até sua recepção. O tempo gasto no percurso é lido em um mostrador digital do aparelho.

Entre os diversos fatores que podem influenciar os resultados de forma direta, estão o bom contato entre o transdutor e o material a ser analisado e a interpretação dos resultados, a qual tem que ser feita por pessoal experiente. (Malhotra,1984, Sturup et al,1984, ACI-364,1993).

Existem alguns parâmetros que podem ocasionar a variação da velocidade de percurso de onda, o que pode afetar no momento de realizar a estimativa da resistência nos “concretos”, entre eles, a presença de fissuras, vazios e descontinuidades do concreto (STURRUP et al,1984).

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Capítulo 1. É explicado o corpo da dissertação assim como as bases sobre as quais realizou-se este trabalho.

Capítulo 2. São descritos alguns ensaios não destrutivos e são explicados os princípios básicos das ondas de ultra-som e dos diferentes tipos de ensaios (método direto, semi direto e indireto), assim como a utilização do ensaio para a obtenção de diferentes parâmetros e diferentes pesquisas desenvolvidas com o uso dos princípios de propagação da onda ultra-sônica.

Capítulo 3. Neste capítulo, é descrito o processo de formulação das misturas asfálticas na metodologia francesa, o processo de corte das placas e a triagem dos corpos de prova trapezoidais.

Capítulo 4. Nele são descritos todos os materiais e os equipamentos utilizados durante a pesquisa, os granulares, e o cimento asfáltico de petróleo CAP, o cimento asfáltico modificado com polímero SBS e modificado com borracha (AMB).

Capítulo 5. Neste capítulo é descrita a metodologia empregada para o desenvolvimento da pesquisa em cada um dos métodos (direto e indireto). E são apresentados todos os resultados obtidos para cada um dos ensaios e placas analisadas.

Capítulo 6. São descritas várias alternativas de apresentação de resultados, assim como a localização dos corpos de prova trapezoidais na placa. Foi realizada uma análise da densidade e a porcentagem de vazios dos corpos de prova trapezoidais finais e a sua

localização na placa, fazendo um comparativo com a velocidade da onda.

Capítulo 7. Baseado na exploração de resultados, são dadas as considerações finais derivadas dos estudos, e algumas recomendações para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS USADOS EM ENGENHARIA

Chamam-se de ensaios não destrutivos (END) os testes que não deixam nenhum tipo de dano ou cujo dano causado é muito pequeno não exercendo nenhuma mudança no comportamento do material. Estes últimos poderiam ser considerados como semi-destrutivos.

Na atualidade, são muitos os ensaios existentes que fazem parte dos ensaios não destrutivos, na área de pavimentação rodoviária. Nos itens seguintes, são descritos alguns deles.

2.1 O DEFLECTÓGRAFO

O primeiro deflectógrafo foi desenvolvido por um engenheiro do LPC, M. Lacroix. (de BOISSOUDY, 1984 apud POUTEAU, 2004). É usado para medir as deflexões verticais de um pavimento sobre a ação de um eixo carregado, e se caracteriza por um conjunto de elementos capazes de medir as deformações elásticas do pavimento na passagem de uma carga determinada.

O princípio de funcionamento é um caminhão que avança a uma velocidade constante e que permite a aplicação da carga de um eixo de 13 toneladas sobre o pavimento. Uma viga de medida é imobilizada sobre o pavimento e registra os valores da deflexão. A interpretação das medidas leva a valores de deflexão e raio de curvatura medida sobre a superfície do pavimento. Mas estes resultados são também influenciados pelas características da estrutura (módulos de elasticidade, espessuras das diferentes camadas da estrutura de pavimento).

2.2 FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

O FWD mede a bacia de deflexões provocada por uma massa que é deixada cair sobre uma placa de 30 cm de diâmetro. É um defletômetro de impacto que simula o efeito da passagem de uma carga de roda em movimento no pavimento. A medida de deflexão é obtida pela queda de um conjunto de massas, a partir de alturas pré-

fixadas, sobre um sistema de amortecedores de borracha. Este sistema foi especialmente projetado para tornar o pulso de carga recebido pelo pavimento, o mais próximo possível de uma senóide. Igualando-se à energia potencial da massa antes de sua queda, com o trabalho desenvolvido pelos amortecedores de borracha depois da queda, pode-se conhecer a força de pico exercida sobre o pavimento, (POUTEAU, 2004):

Os equipamentos que usam o FWD têm o mesmo princípio de operação, mas apresentam diferenças importantes:

- Na forma de geração do pulso (queda de um ou de dois pesos).
- Forma de distribuição de carga na superfície do pavimento.
- Tipo de transdutor usado para captar as deflexões.

O reboque é colocado no ponto de medida, a massa é liberada de uma altura que pode variar de 2 a 40cm, o que provoca uma força variável de 7 a 135kN. A altura da queda e a força aplicada são fixas em função da natureza da estrutura testada. A transmissão da carga faz-se com uma mola cuja constante permite definir a duração do carregamento e os 9 captadores (onde um está ao centro da placa) registram as deformações longitudinais 2 m perto do ponto de aplicação do carregamento (figura 2.1) (INFRALAB, 2009).

Para as estruturas dos pavimentos, as características do carregamento são reguladas de maneira a obter um impulso de duração de 28 μ s, ou seja, cerca de 34Hz, o que corresponde à duração de carga de um veículo pesado que circula a uma velocidade média de aproximadamente 70km/h.

O FWD permite provar o comportamento de uma estrutura de pavimento *in situ*. Na teoria, por analogia entre um cálculo elástico e as medidas do FWD, é possível determinar o estado de calagem entre uma e outra camada. Contudo, nenhum estudo faz referência à eficácia do FWD para caracterizar os descolamentos e em especial os seus limites. (POUTEAU, 2004)

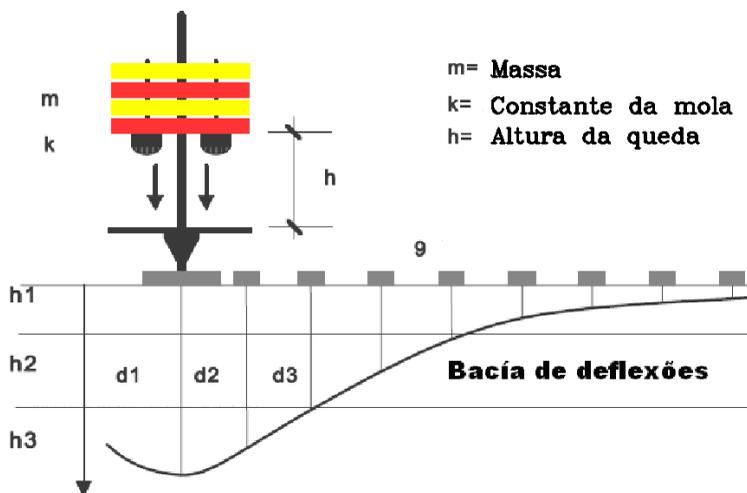


Figura 2.1. Princípio de funcionamento do Falling Weight Deflectometer. (INFRALAB, 2009)

2.3 O VIBRADOR GOODMAN (VIBRADOR LÉGER)

O vibrador Goodman (vibrador léger) é um aparelho que serve para a auscultação dinâmica dos pavimentos. Foi desenvolvido depois de 1961 pelos *Laboratoire des Ponts et Chaussées* (LPC). O princípio do ensaio é baseado na propagação de ondas de superfície, sendo que uma carga vertical senoidal é aplicada à superfície do pavimento e um acelerômetro ou geofone registra a fase da onda de superfície propagando-se na superfície do pavimento. Este captor é afastado progressivamente da excitação para poder determinar o comprimento de onda de superfície, assim como a velocidade da fase. Esta operação é efetuada por várias frequências de excitação para poder determinar a velocidade de fase em função da frequência. O objetivo do ensaio é construir uma curva que dá a velocidade de fase em função da frequência com curva de dispersão. Esta curva nos pode informar sobre as diferentes características dos pavimentos (espessura e módulos de rigidez), assim como o estado das interfaces (POUTEAU, 2004).

2.4 O COLÔMETRO

O Colômetro foi desenvolvido em 1975 e é destinado à investigação e medida de descolamentos. Uma série de choques é aplicada à superfície do pavimento. Se as camadas estão coladas, grande parte da energia é transmitida ao solo, enquanto, se existe um defeito na interface, a energia é refletida à superfície. O colômetro aplica um choque de uma massa sobre a superfície do pavimento, e geofones colocados a 10cm do ponto de impacto medem a resposta da estrutura. O valor aproximado do sinal de velocidade é registrado em cada ponto de medição. Este aparelho foi substituído pelo cológrafo depois de 1976 (POUTEAU, 2004).

2.5 O COLÓGRAFO

O princípio do cológrafo descrito por GRAMSAMMER *et al* (1983), *apud* POUTEAU (2004), é o seguinte: Uma esfera vibrante aplica uma carga senoidal, de 2000 N de amplitude e de frequência 60 Hz na superfície do pavimento. Dois receptores medem o componente vertical da resposta da estrutura. Os sinais são filtrados para reduzir o ruído mecânico. A amplitude da resposta senoidal caracteriza o estado da estrutura do pavimento. Este valor é constante no comprimento de uma secção homogênea e varia com a presença de singularidades. Tal aparelho é usado para a detecção de defeitos na interface por ser mais sensível a este tipo de degradações. (BATS VILLARD,1991 segundo POUTEAU, 2004).

2.6 COLIBRI

O COLIBRI enfoca-se na resposta dinâmica do pavimento, consecutiva a um choque mecânico. O nome do aparelho provém do pássaro do mesmo nome, onde a frequência de batimento das asas ultrapassa a várias centenas de Hertz. (SIMONIN, 2002).

A técnica de auscultação COLIBRI é baseada em um espectro de frequência do pavimento submetido ao golpe. As funções de transferência medidas devem ser sensíveis às variações das camadas no pavimento. É um método de medida de rendimento fraco (1 a 2 pontos de medida por minuto), que necessita de condições

meteorológicas especiais. Contudo, para o operador, preconiza-se a realização de ensaios sob condições meteorológicas favoráveis. (POUTEAU, 2004)

O princípio do sistema de auscultação não destrutivo COLIBRI consiste em dar ao pavimento, com a ajuda de um martelo equipado de um captor de força, uma excitação dinâmica (choque). A medida da resposta, $r(t)$, faz-se por um acelerômetro de posição e tem 10 cm do martelo em contacto com pavimento. A figura 2.2 apresenta o princípio de funcionamento.

2.7 ECO-IMPACTO (IMPACT-ECHO)

O eco-impacto está baseado na análise do espectro de resposta de um elemento submetido a uma excitação mecânica (SANSALONE e CARINO, 1986). Em seguida é gerado um pulso por um impacto mecânico de uma esfera de aço de pequeno diâmetro na superfície do elemento a testar, e uma onda de compressão se propaga no material (Figura 2.3). A reflexão múltipla da onda (sobre uma interface com outro material de características diferentes) provoca uma resposta cíclica amortizada. O sinal é registrado com a ajuda de um captor situado muito perto do ponto do impacto e seguidamente transformado no domínio de frequências. As ondas de compressão chegam primeiramente ao receptor, produzindo o sinal de resposta dominante.

Um descolamento é susceptível de ser detectado pelo eco-impacto, em certas situações. Deve ter uma abertura de 0,1 mm, e sua menor dimensão lateral deve ser superior a 25% do comprimento de onda do pulso produzido pelo choque da esfera. Estas condições são preenchidas geralmente para as estruturas de pavimentos (BUJARD et al, 2001, POUTEAU, 2004).

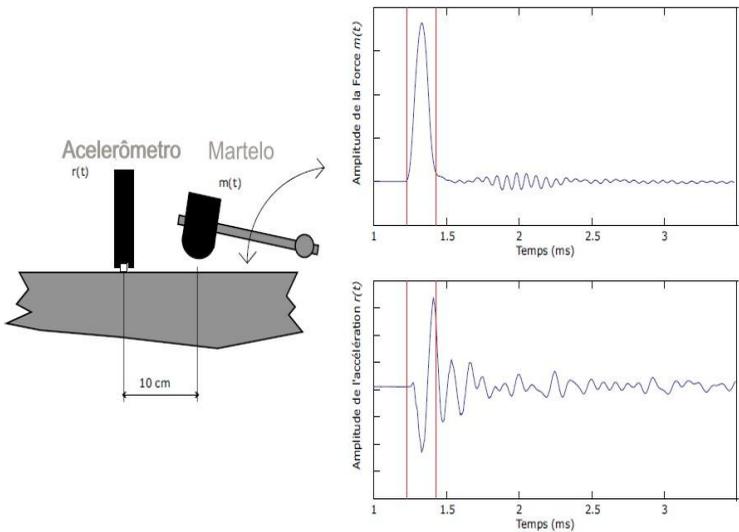


Figura 2.2 Princípio de medida do sistema COLIBRI, exemplo do sinal de força e de aceleração. (POUTEAU, 2004)

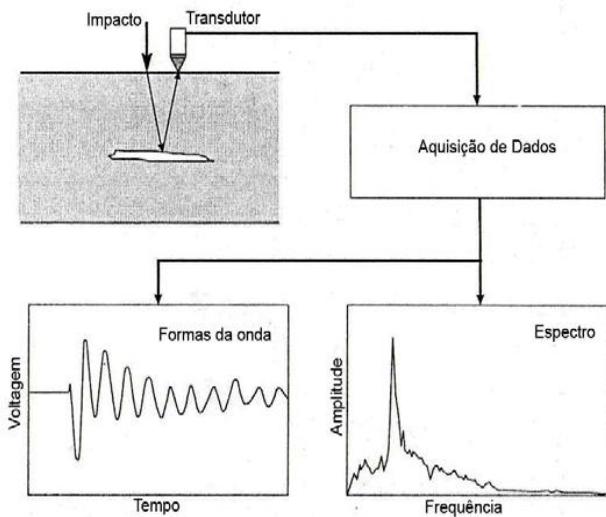


Figura 2.3 Princípio de funcionamento do eco-impacto. (POUTEAU, 2004)

2.8 TERMOGRAFIA INFRA-VERMELHA

A termografia infra-vermelha tem numerosas aplicações incluindo a detecção do descolamento de uma camada asfáltica nos aventais das pontes (SOLOMON, 1987). É fundamentada em um fenômeno simples, ou seja, em uma estrutura, a temperatura da superfície do material varia em função da ciclagem diária de aquecimento e de esfriamento consecutivos à radiação solar e às mudanças na temperatura do ar, quando, por exemplo, os materiais apresentam tendência a se aquecer ou a se resfriar lentamente. No entanto, quando existe uma barreira térmica causada pela perda de coesão na estrutura, o betume, situado entre este defeito e a superfície, é isolado da maior massa da estrutura pela água ou pelo ar presente no defeito. Assim, o exame da temperatura da superfície situada na seqüência da temperatura ambiental permite distinguir as zonas coladas das descoladas (que respondem mais rapidamente a estas mudanças) (POUTEAU, 2004).

2.9 RADAR

Segundo POUTEAU (2004), a técnica de auscultação RADAR segue sobre a percepção dos contrastes de propriedades eletromagnéticas que existem entre cada camada do pavimento. Permite fazer extratos de perfil de alto rendimento (30 a 40 pontos de medida por segundo com os aparelhos tradicionais, e mais de 150 com os modelos mais recentes). Contudo, é impossível realizar medidas em tempo de chuva.

O radar compõe-se de um gerador de impulsos, uma (ou várias) antena(s) emissora(s) e uma (ou várias) antena(s) receptora(s). Gera a intervalos de tempo regulares um impulso elétrico, de uma duração variável (de alguns décimos a várias centenas de nano segundos), para uma antena emissora (figura 2.4). A circulação da corrente sobre os elementos brilhantes da antena cria uma onda eletromagnética que se propaga para o alvo. O campo elétrico desta onda é proporcional à função fonte de corrente $i(t)$, nomeada impulso de Ricker (POUTEAU, 2004).

A duração do impulso é curta e a resolução (dimensão mínima dos defeitos de objetos perceptíveis) será fina; em contrapartida, a profundidade de penetração (profundidade na qual a detecção de um objeto é possível) será mais fraca.

Na campanha de ensaios realizada por POUTEAU (2004) na sua pesquisa, nas quais fez uso do ensaio Radar, encontrou a aplicação do ensaio para localizar descolamentos entre camadas de cimento portland e de cimento asfáltico, o que é apresentado na figura 2.5.

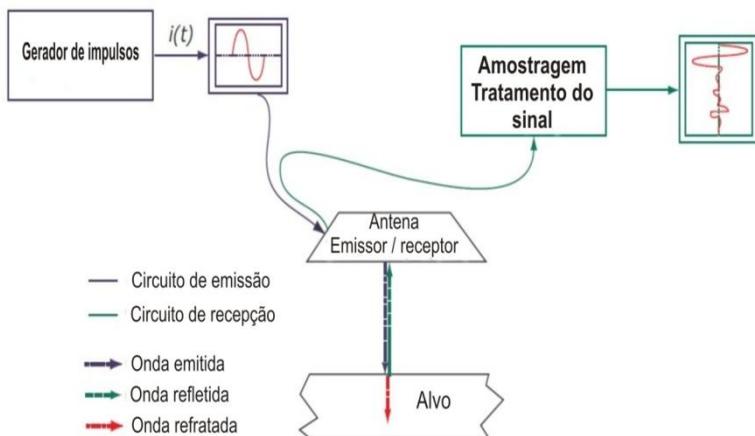


Figura 2.4. Princípio de funcionamento do radar em modo monostático (POUTEAU, 2004).

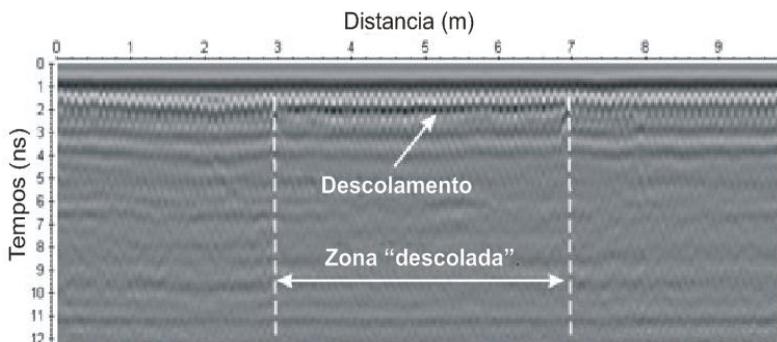


Figura 2.5. Resultante da campanha RAD-BHP: perfil radar longitudinal (POUTEAU, 2004).

2.10 ULTRA-SOM

O ultra-som é uma onda acústica que não pode ser percebida pelo homem por estar numa frequência mais alta do que pode captar o ouvido, este limite se encontra aproximadamente a 20 KHz. É utilizado em muitos campos da ciência e da tecnologia. Na indústria, se utiliza para medir as distâncias, ensaios não destrutivos, caracterização interna de materiais, limpeza de superfícies, além de ser também utilizado na medicina, inclusive como arma. A detecção e medida de ondas do ultra-som são feitas com a utilização de receptores piezo elétricos ou por meios ópticos, já que as ondas ultra-sônicas podem fazer-se visíveis através da difração da luz.

2.10,1 Propagação das ondas ultrasônicas

Três tipos básicos de ondas são criadas: longitudinais, transversais ou superficiais. As longitudinais ou ondas de compressão são as mais velozes, seguida das transversais e depois das superficiais.

Existem as chamadas ondas de dilatação (longitudinais), que fazem variar o volume do material por meio do qual se propagam, e as partículas se deslocam na mesma direção da propagação da onda, estas ondas são as mais importantes; e ondas de distorção (transversais), que não provocam variação no volume, ainda que os limites do meio possam ser modificados, estas ondas deslocam as partículas com um ângulo reto. Uma combinação de ambas são as chamadas ondas de superfície, que têm uma forma elíptica de deslocamento da partícula. Simplesmente trata-se de ondas que viajam a uma distância muito pequena da superfície do meio. Na figura 2.6, estão representados os tipos de onda de tensão gerados (LPI, 2009).

A posterior transmissão destas ondas depende, em grande medida, do meio. Cada meio tem uma impedância distinta, a qual faz variar a velocidade de propagação entre outras variáveis. A impedância acústica é a propriedade que o meio oferece a transmitir com maior ou menor facilidade à passagem da onda sonora. É importante perceber de que meios com impedâncias muito distintas provocam grandes reflexões. Por outro lado, é fundamental evitar o ar na transmissão posto que uma capa deste gás poderia anular a propagação da onda

ultra-sônica, devido à alta atenuação que este proporciona (HCNET, 2009).

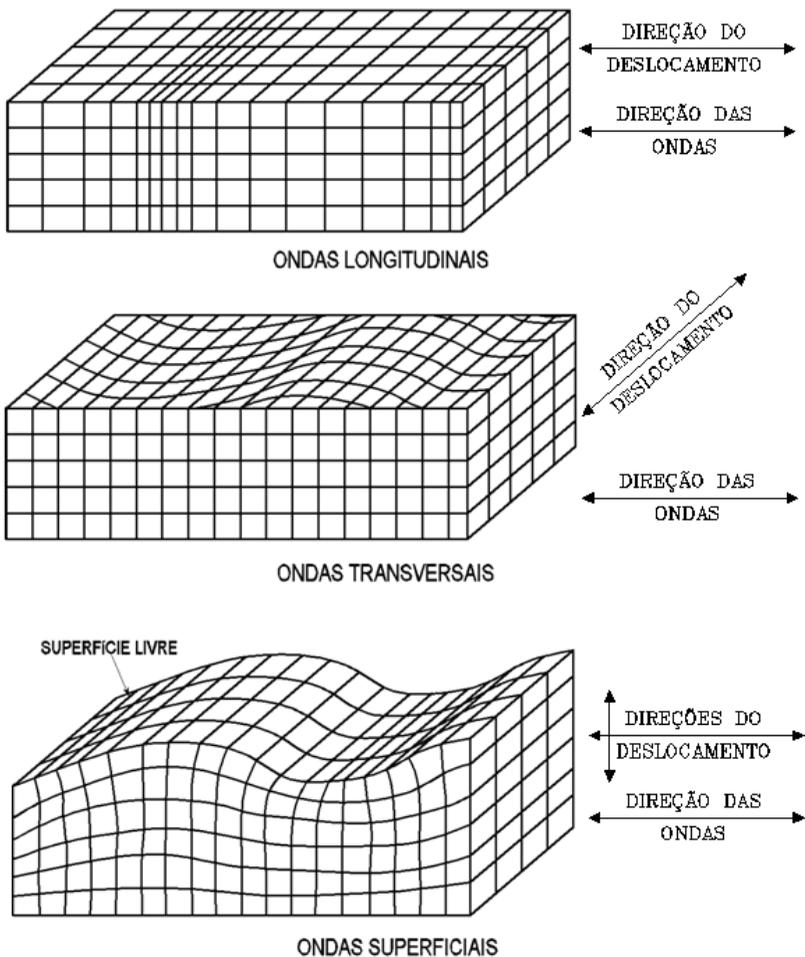


Figura 2.6 Tipos de ondas-Tensão (Filipczynski ET AL.1966)

Na Tabela 2.1 São explicadas as particularidades da propagação dos diferentes tipos de onda em diferentes meios (líquido, sólido e gasoso).

As primeiras publicações sobre medições de velocidade de pulsos mecanicamente gerados apareceram nos Estados Unidos em meados de 1940. Nelas foi constatado que a velocidade da onda sonora

depende das propriedades elásticas do material e quase não depende da sua geometria (BUNGEY,1989).

Tabela 2.1. Comportamento da onda ultra-sônica em diferentes meios (LPI, 2009)

Tipo de onda	Gás	Líquido	Sólido	Movimento de partícula	Aplicação
Long.	Sim	Sim	Sim	Compressão e relaxação ao longo do eixo de propagação.	Provas, Medições...
Transv	Não	Muito pouco.	Sim.	Deslocamento perpendicular ao eixo de propagação.	Provas, soldadura, ressonância ...
Superf	Não	Não	Sim	Elíptico com alta atenuação por debaixo da superfície.	Provas de superfície para partes com difícil acesso.

2.10,2 O Ultra-som como ensaio não destrutivos

De acordo com CHUNG E LAW (1983), nos anos 60 foi desenvolvido um equipamento portátil, operado com bateria e com o tempo de trânsito num mostrador digital.

Vários tipos de ensaios não-destrutivos para avaliação da resistência do concreto foram desenvolvidos baseados no princípio da propagação de ondas de tensão, como a medição da velocidade de pulsos ultra-sônicos.

O estudo das matérias usando o ensaio não destrutivo é possível devido aos parâmetros que geralmente aumentam a resistência do concreto também aumentarem a velocidade de propagação de ondas acústicas. A medição de velocidades de ondas se propagando em pavimentos e solos começou na Alemanha no fim da

década de 30. O primeiro método de utilização do ultra-som para o concreto data de 1940 (POPOVICS, 1998, BUNGEY1989).

O desenvolvimento do método da propagação de ondas ultra-sônicas começou simultaneamente no Canadá e Inglaterra ao redor dos anos 60. Este método baseia-se na análise de pulsos ultra-sônicos que se propagam pelos corpos de prova (MENENQUETTI, 1999). Na maioria das vezes, usa-se um transdutor para a emissão do pulso e outro para a recepção do pulso após a propagação no material. Usando dois pares de transdutores (dois receptores e dois transmissores), um par de transdutores (emissor receptor) é usado para as ondas longitudinais e o outro par para as ondas transversais. Com o uso de dois transdutores, podem-se medir as características do pulso recebido com mais precisão, por conta de as reflexões internas nas peças analisadas serem evitadas. Na figura 2.7 pode-se ver a aplicação de dois pares de transdutores ultra-sônicos em um corpo de prova de argamassa endurecida. Os transdutores superiores emitem e recebem os pulsos longitudinais (nestes pulsos, a direção de propagação é paralela ao deslocamento das partículas) e os transdutores inferiores aos pulsos transversais (nos quais as partículas se deslocam perpendicularmente à direção de propagação da onda). Na figura 2.8 é aplicado o ensaio de ultra-som pelo método direto o qual é feito quando pode se ter acesso às duas faces do material analisado. Estudando o tempo de percurso que demora a onda em atravessar o material, podem ser obtidas informações sobre a qualidade, a composição do seu traço e, em algumas condições, o carregamento a que está submetido (neste dois últimos casos, até o presente, somente em condições controladas de laboratório) (IBRAOP, 2009).

No concreto, pode associar-se a sua qualidade (especificamente a resistência à compressão) com a velocidade de percurso no corpo analisado (KRAUTKRÄMER E KRAUTKRÄMER, 1990).

A velocidade de ondas ultra-sônicas percorrendo em um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material, como pode ser visto na equação 2.1: (BUNGEY, 1989, Pundit Manual, 1994).

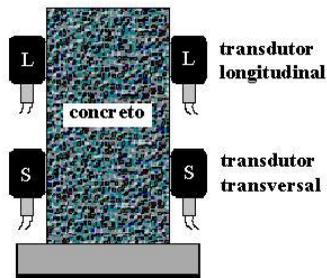


Figura 2.7 Aplicação de ensaio ultra-sônico em argamassa de cimento e sua representação esquemática mostrando os dois pares de transdutores (IBRAOP, 2009)

$$V = \sqrt{\frac{K * E_d}{\delta}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

V = Velocidade da onda , km/s

Ed = Módulo de elasticidade dinâmico, kN/mm²

δ = Massa específica , kg/m³

ν = Coeficiente de Poisson dinâmico

O método baseia-se no fato de que a velocidade de propagação das ondas é influenciada pela qualidade da amostra.

O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultra-sônicas através do concreto, entre o emissor e o receptor. Durante o ensaio pelo modo de transmissão direto, a distância entre os transdutores pode ser facilmente determinada, e o tempo de percurso da onda ultra-sônica é fornecido pelo ensaio. Com estes dois valores (tempo e distância) pode ser

calculada a velocidade da onda nesse ponto, substituindo estes valores na equação 2.3 (MALHOTRA,1984).

$$V = \frac{X}{T} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde:

V = Velocidade da onda

X = Distância entre os transdutores (emissor e receptor do sinal)

T = Tempo de percurso da onda (μs)

A velocidade da onda depende principalmente dos seguintes fatores: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, e massa específica do concreto, e também da presença de armadura (BUNGEY, 1989, POPOVICS et al,1995).

Para RAVINDRARAJAH (1992) apud MENEGUETTI (1999), a principal vantagem da utilização do ultra-som na estimativa da resistência *in situ* é que a velocidade de propagação das ondas não é afetada pela forma e tamanho dos elementos estruturais desde que a largura da peça seja maior que λ (comprimento de onda), o qual depende da frequência do transdutor.

As dimensões de um defeito interno num material podem ser estimadas com uma razoável precisão, então, assim, pode se estabelecer se o material pode ser aceito ou rejeitado, baseando-se nos critérios de seleção específicos para cada caso.

À medida que o material vai apresentando maior volume de vazios, vai se apresentando uma redução da velocidade das ondas longitudinal e transversal, fato que pode ser observado na figura 2.9 e figura 2.10, onde foram aplicadas cargas compressivas no concreto e foi analisada a velocidade de propagação das ondas longitudinais e transversais. À medida que a pressão de compressão aumenta, a velocidade de onda diminui, devido à aparição e crescimento de microfissuras no corpo de prova testado.

Das figuras 2.8 e 2.9 pode se inferir que, a partir do 75% da resistência à compressão do concreto ou argamassa endurecida, a velocidade das ondas longitudinais reduz-se acentuadamente.

Com a análise das freqüências dos pulsos recebidos, fazendo um comparativo com os pulsos emitidos, as proporções dos agregados usados no concreto podem ser estimados, fato que tem importância nos concretos de cimento portland. Com a análise da variação da velocidade da onda num corpo de prova, podem ser detectadas descontinuidades internas em materiais, variações de homogeneidade etc. assim como também baseando-se no fenômeno de reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos na direção da sua propagação dentro do material.

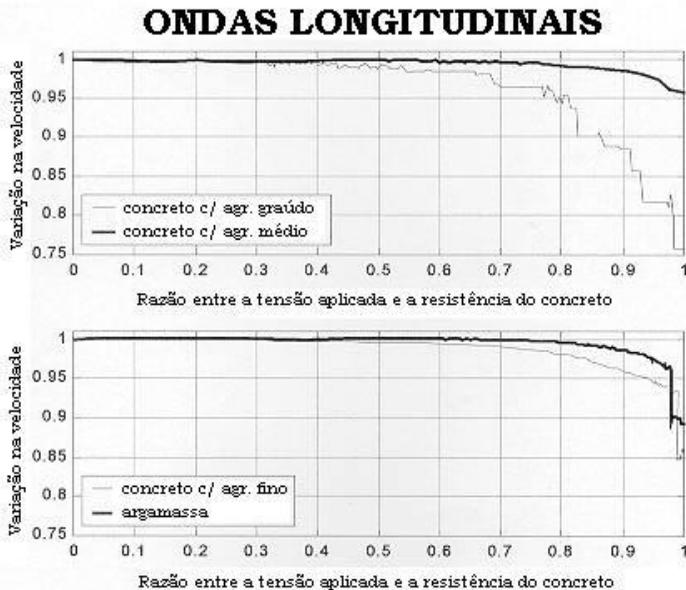


Figura 2.8 Redução da velocidade longitudinal em função do carregamento axial. (Nogueira, C. L.)

ONDAS TRANSVERSAIS

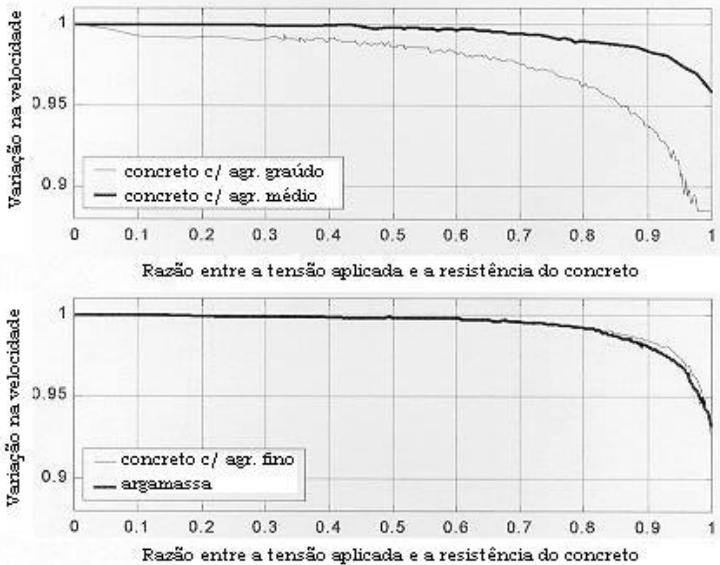


Figura 2.9 Redução da velocidade transversal em função do carregamento axial. (Nogueira, C. L.)

NEVILLE (1997) comenta que o aparelho do ultra-som compreende transdutores colocados em contato com o corpo de prova, um gerador de pulsos com frequência entre 10 khz e 150 khz, um amplificador, um circuito medidor de tempo digital, que mostra o tempo do percurso entre os transdutores. De acordo com GONÇALVES (1995) a utilização de ultra-som é relativamente simples. O aparelho é composto de uma fonte, na qual estão acoplados dois transdutores. O primeiro transdutor transforma os impulsos elétricos em ondas acústicas e, desta maneira, com base na distância e no tempo de percurso das ondas sonoras é possível calcular a velocidade delas.

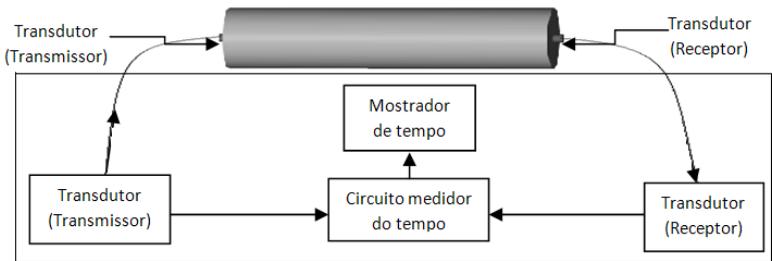
Os modos de transmissão dos sinais são classificados de acordo com o arranjo dos transdutores. Quando os pulsos são gerados por transdutores em faces opostas, classifica-se como modo de transmissão direta, quando estão perpendiculares entre si ou faces adjacentes, chama-se de transmissão semidireta e quando os transdutores estão no mesmo plano classifica-se como transmissão indireta (Figura 2.10).

No ensaio de ultra-som, o método mais indicado para a utilização é o método direto, devido a se obter uma maior energia de propagação do pulso e a distância entre os transdutores ou distancia percorrida pela onda poder ser medida com maior precisão.

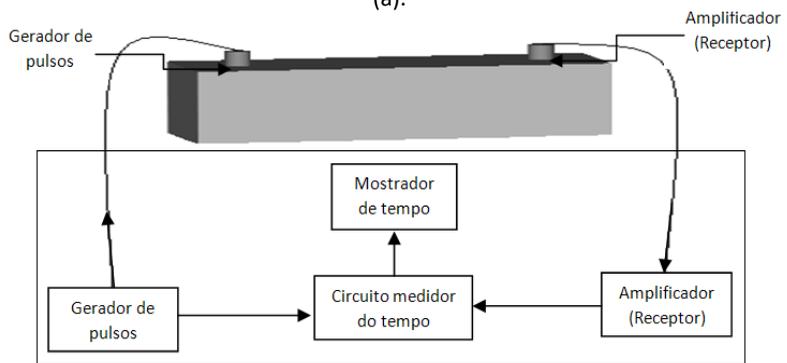
YAMAN et al (2001) afirmam que no campo nem sempre é possível o acesso a superfícies opostas, por exemplo em pavimento e pontes, e torna-se necessário o ensaio de transmissão indireta. Assim, foi feita uma pesquisa comparando as transmissões diretas e indiretas, e foi constatado que as medições de transmissão indireta são “estatisticamente similares” às medições de transmissão direta em lajes com propriedades uniformes, incluindo a umidade ao longo da superfície e da espessura.

Dos métodos de transmissão do ensaio de ultra-som, o mais efetivo é o modo de transmissão direta, pois neste é transmitida a máxima energia. Nos concretos de cimento Portland este modo é mais usado para a correlação com a resistência à compressão, obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, detecção de falhas internas e avaliação da qualidade do concreto.

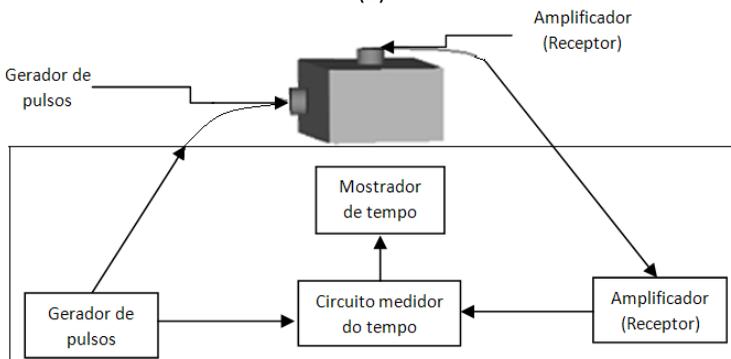
Dos modos de transmissão para o ensaio de ultra-som, o menos recomendável é o de transmissão indireta por conta de a intensidade do sinal recebido ser significativamente menor do que nos outros métodos de transmissão. Ainda que o modo de transmissão semidireta seja menos usado, é útil no caso de se querer evitar regiões de concentração de armaduras. Mas este método apresenta a vantagem de poder ser usado quando só se tem acesso a uma face do material a estudar. A velocidade obtida pelo modo de propagação indireto depende predominantemente das características da região superficial do concreto, que pode não ser representativa do elemento, porém a velocidade obtida poderá não ser a mesma da proveniente do modo de transmissão direto em uma mesma peça. No modo de transmissão indireto também se desconhece o caminho percorrido pelo pulso já que o transdutor não é pontual (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).



(a).



(b)



(c)

Figura 2.11. Esquema de funcionamento do ensaio de ultra-som. a) Método direto. b) Método indireto. c) Método semi direto (Naik e Malhotra, 1991).

Na NBR 8802 (1994) está descrito um procedimento para a obtenção da velocidade de propagação da onda ultra-sônica pelo método de transmissão indireto. Este procedimento consiste em deixar fixo o transmissor emissor e fazer o percurso com o transmissor receptor a umas distancias predefinidas fazendo leituras sucessivas, conforme a figura 2.11. Com os valores de tempo obtidos e as distâncias onde foram localizados os transdutores, é feito um gráfico de tempo de propagação da onda x distância, como é visualizado na figura 2.12, com os pontos é traçada uma reta e a inclinação desta é a velocidade obtida pelo modo de transmissão indireta.

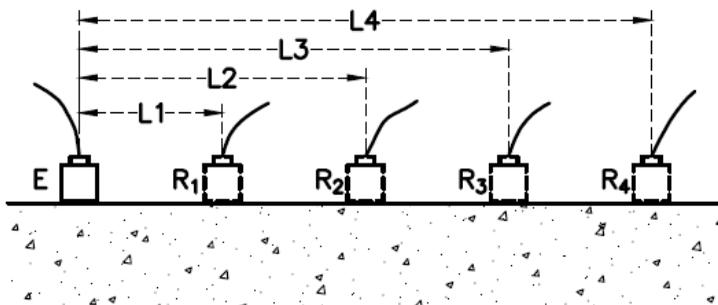


Figura 2.11 Modo de transmissão indireto. (NBR 8802 ,1994)

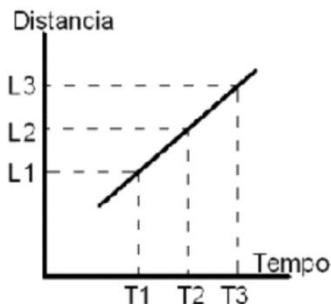


Figura 2.12 Princípio de funcionamento do método indireto

2.10.2.1 Utilização de ensaios não destrutivos para estimar a profundidade de aberturas

Com o uso de ultra-som, é possível estimar a profundidade de aberturas superficiais com as leituras de tempo de propagação da onda pelo método indireto. Porém, ainda existe pouca informação sobre a aplicação deste procedimento.

Nos concretos de cimento portland, com o objetivo da detecção de falhas no concreto, é feito um gráfico relacionando o tempo de propagação da onda com a distância entre os transdutores (figura 2.13). Se os pontos (L1T1-L5T5) estão praticamente alinhados à reta, não existe falha, porém, se um dos pontos subsequentes estiver muito afastado do alinhamento dos pontos anteriores, significa que existe uma falha entre este ponto e o anterior, no caso do exemplo, uma abertura (BECKER, 2007).

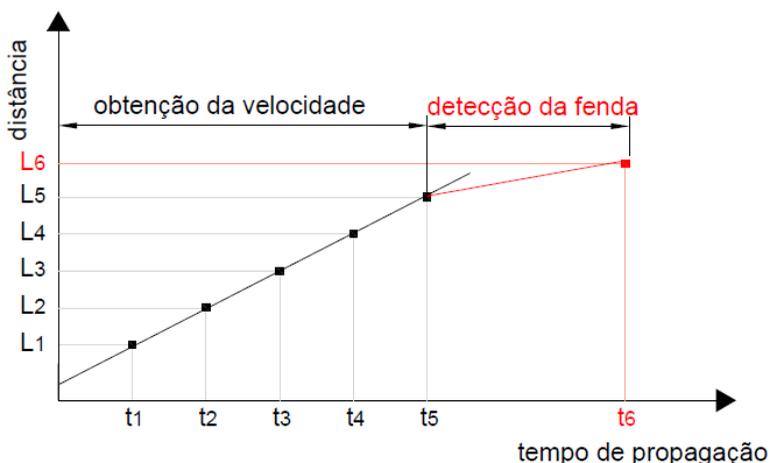


Figura 2.13 Curva tempo de propagação da onda (t) versus distância (d) para obtenção da velocidade e detecção da fenda (BECKER, 2007).

2.10.2.2 Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade de pulsos ultra-sônicos.

Quando não se dispõem de dados específicos e ensaios prévios para poder fazer comparativos e estimações mais precisas, de forma geral pode-se classificar a qualidade dos concretos de cimento portland através da velocidade de propagação segundo a tabela 2.2. Porém, é

altamente recomendável uma avaliação mais detalhada analisando cada caso especificamente.

Tabela 2.2. Classificação do concreto com base na velocidade de pulsos ultrassônicos (PETRUCCI,1998).

Velocidade (m/s)	Qualidade
>4500	Excelente
3500-4500	Boa
3000-3500	Duvidosa
2000-3000	Pobre
<2000	Muito pobre

2.10.2.3 Fatores que afetam a velocidade de propagação

No caso dos concretos de cimento portland, existem muitas variáveis que podem influenciar a medição da velocidade de propagação da onda no momento de estimar a resistência à compressão. Fatores como tipo de agregado, relação água-cimento, idade do concreto, dimensões, granulometria do agregado, e condições de cura. (Manual da Pundit 1994, ALMEIDA, 1993, SWAMY E AL-HAMED, 1994, STURRUP et al, 1984, FOCAOARU, 1984, PHOON et al, 1999, MENEGHETTI, 1999).

No caso dos concretos asfálticos, várias das características que afetam os do cimento portland também são incidentes, como o tipo de agregado, granulometria, entre outras, mas o material que cumpre as funções de ligação nos concretos asfálticos é o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP),o qual é um material visco-elástico e termo-suscetível à diferença do cimento portland, que é um material elástico. Para poder conhecer a incidência deste fator na velocidade da onda ultra-sônica, têm que ser feitos estudos específicos para o caso, e analisar para os diferentes betumes as variações na velocidade da onda a diferentes temperaturas, com a finalidade de conhecer a influência da temperatura sobre a velocidade da onda ultra-sônica do ligante, mas neste caso este tema foge do objetivo da pesquisa.

2.10.2.4 Fatores que dependem das condições do material

Condições de superfície

Com a finalidade de garantir um melhor contato entre os transdutores e o material a ser ensaiado, a superfície do corpo de prova deve ser lisa para garantir o correto acoplamento. Com este objetivo, pode ser utilizada uma camada fina de outro material que garanta a homogeneidade na superfície, e para melhorar o contato do transdutor com o material de estudo, são usados vários tipos de acoplantes, entre eles, a vaselina (PUNDIT manual, 1994).

Tipo e quantidade do agregado graúdo

Nos estudos realizados por STURRUP et al (1984), constatou-se que, para uma determinada resistência à compressão, a diferença entre a velocidade de propagação de onda nos dois concretos convencionais e no concreto pesado foi pequena, mas para o concreto leve a diferença entre as velocidades de propagação foi maior (figura 2.14) Na pesquisa não foi considerada a influência da proporção de agregado graúdo na composição do concreto.

Para um determinado nível de resistência, a velocidade de propagação da onda é maior no concreto do que na argamassa, que por sua vez é maior do que na pasta (STURRUP et al, 1984).

Em geral, os agregados graúdos e miúdos têm módulo de elasticidade maior, e, por conseguinte, maior velocidade de propagação da onda de ultra-som do que a pasta de cimento, então, segundo isso, um concreto que possua uma maior quantidade de agregado apresenta maior velocidade (CHUNG e LAW, 1983). Na tabela 2.3 são apresentadas as velocidades de propagação da onda para diferentes tipos de rocha dadas por esses autores.

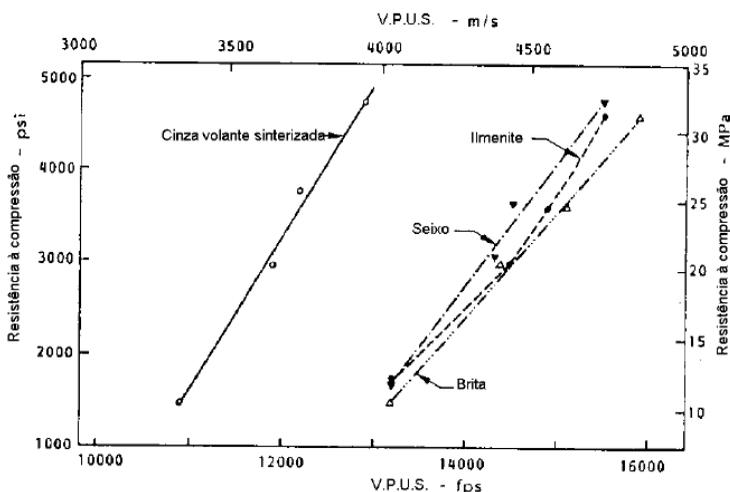


Figura 2.14 Influência do tipo de agregado na relação entre V e resistência à compressão do concreto (STURRUP et al, 1984).

Tabela 2.3. Intervalo de velocidades de onda ultra-sônica para alguns tipos de rocha (CHUNG e LAW, 1983)

Tipo de rocha	V (Km/seg.)
Basalto	5,27-6,02
Dolomita	4,37-6,09
Granito	4-5,79
Calcário	3,91-5,78
Arenito	2,55-4,23
Quartzito	5,57-5,72

Proporções da mistura

Segundo ELVERY e IBRAHIM (1976), O valor do F_c e, por conseguinte, da velocidade da onda está influenciado significativamente pelas variações na quantidade de agregado. Desta forma, se o conteúdo de agregado no concreto é incrementado, e os demais teores são mantidos constantes, pode-se esperar que a velocidade da onda seja maior.

Segundo ELVERLY e IBRAHIM (1976), a velocidade da onda e o valor de F_c são independentes da variação relação água-cimento. Isso devido à relação água - cimento relacionar-se principalmente com as propriedades elásticas do material (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa específica) do concreto e não com a sua resistência.

O tempo de percurso do pulso no concreto é igual ao tempo do trânsito no agregado graúdo mais no tempo no agregado miúdo mais na pasta de cimento. O F_c e a velocidade variam principalmente com o tipo e proporção dos agregados na pasta de cimento.

Tipo de cimento

Na pesquisa realizada por STURRUP et al (1984), utilizaram-se cimento ASTM tipo I (cimento Portland comum) e ASTM III (cimento Portland de alta resistência inicial), sendo empregada a mesma quantidade de cimento, porém com relações água- cimento e agregado cimento variáveis. No ensaio de ultra-som, a diferença entre os concretos com cimento Portland comum e de alta resistência inicial não se mostrou significativa.

ELVERLY e IBRAHIM (1976) realizaram ensaios utilizando cimento Portland comum (ASTM tipo I), cimento de alta resistência inicial (ASTM tipo III), e cimento aluminoso, mantendo-se constantes as relações agregado/cimento e água/cimento. As correlações entre F_c e V para os dois tipos de cimento Portland foram idênticas, porém diferentes das obtidas para o cimento aluminoso.

Temperatura

Segundo RILEM NDT 1 (1972), nos concretos de cimento portland o tempo de percurso da onda ultra-sônica é influenciado pela temperatura quando esta é inferior a 5°C e superior aos 30 °C. Para temperaturas entre 40 e 60°C, existe uma redução da velocidade causada pela microfissuração interna do concreto que não corresponde à redução na resistência à compressão do concreto de cimento portland. No congelamento, a velocidade da onda aumenta devido ao congelamento da água no interior do concreto portland.

Segundo POPOVICS (2001), há um aumento da velocidade em concretos com maior umidade, porém, uma diminuição no valor da resistência à compressão.

COUTINHO, apud ALMEIDA (1993), apresenta os seguintes valores para a propagação das ondas sonoras (tabela 2.4).

Tabela 2.4 Velocidade de propagação das ondas sonoras em diferentes meios

Meio	Velocidade (m/s)
Ar	330
Água	1450
Pasta de cimento	3500-4000
Agregados	4200-5000

Cumprimento de propagação da onda, forma da peça e freqüência do transdutor – emissor.

Com a finalidade de evitar que os transdutores fiquem muito próximos e sejam significativamente influenciados pela heterogeneidade do concreto, a RILEM NDT 1 (1972) recomenda um comprimento mínimo para a propagação das ondas, dado pelos seguintes valores:

100 mm para o concreto com agregado de dimensão máxima menor que 30 mm.

150 mm para o concreto com agregado de dimensão máxima menor que 45 mm.

Para o concreto, são apropriados transdutores com freqüências entre 20 e 150 KHz, sendo o mais utilizado o de 54 KHz. A escolha da freqüência do transdutor decorre do tamanho do elemento estrutural a ser investigado, pois a distância a ser percorrida não deve ser menor do que o comprimento da onda (λ), sendo que:

$$\lambda = \frac{V}{F} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Onde:

λ = Comprimento de onda

V = Velocidade do pulso.

F = Freqüência de vibração.

A dimensão máxima dos agregados graúdos também deve ser inferior ao comprimento da onda (λ) para evitar a redução da energia da onda e a possível perda de sinal no receptor (BUNGEY, 1989) (Tabela 2.5).

Tabela 2.5. Velocidade de onda, freqüência e comprimento de onda do pulso.

V(m/s)	F(Hz)	λ (cm)
3500	54000	6,48
4000	54000	7,41
4500	54000	8,33
3500	200000	1,75
4000	200000	2,00
4500	200000	2,25

Com freqüências mais elevadas são atenuadas mais rapidamente do que as de freqüências mais baixas. Dependendo das dimensões da peça analisada, a freqüência mínima dos transdutores usados deve ser a dada na Tabela 2.6,(RILEM NDT1, 1972).

Os autores citam que com altas freqüências (acima de 500 KHz) se torna melhor a detecção de pequenos defeitos, na ordem de milímetros. No entanto, o avanço nas aplicações do ultra-som nos concretos não segue o mesmo ritmo que nas outras áreas da ciência.

Tabela 2.6. freqüência mínima do transdutor emissor de acordo com as dimensões da peça. (RILEM, 1972)

Cumprimento (mm)	Freqüência (KHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100-700	≥ 60	70
200-1500	≥ 40	150
>1500	≥ 20	300

2.2.4 Fatores independentes das propriedades do material

Entre os fatores que não dependem das propriedades do material estão incluídos:

- Contato entre os transdutores e a superfície do material. No procedimento do ensaio, o contato do transdutor com o material a ser analisado é importante, para que a transmissão do pulso seja feita de maneira adequada.
- Presença de fissuras ou trincas internas. Devido à alta atenuação na velocidade da onda no ar, quando na direção de propagação da onda é encontrada uma fissura ou trinca, devido à presença do ar a velocidade da onda é diminuída porque o tempo de percurso entre os transdutores aumenta.
- A temperatura do material: no caso do concreto de cimento portland, entre 5 e 30°C o efeito tem sido insignificante. Fora deste intervalo, as leituras devem ser corrigidas. No entanto para o caso dos concretos asfálticos, deve-se ter muito mais precaução com os efeitos da temperatura, devido ao betume ser altamente sensível a este fator por ser um material visco-elástico e termo-susceptível.
- Os valores das velocidades são geralmente maiores num concreto saturado, devido à presença da água nos poros, principalmente para baixas resistências.
- Distância de propagação: recomendado um mínimo de 100 mm para concretos com dimensão máxima do agregado até 30 mm; 150 mm para agregados até 45 mm.

Tamanho e forma do elemento de concreto em geral não afetam a velocidade de propagação. No entanto, a equação utilizada para calcular a velocidade de ultra-som em materiais sólidos é válida somente para dimensões infinitas. Esta condição na prática fica atendida, se a dimensão lateral do elemento em estudo for pelo menos igual ao comprimento de onda do pulso transmitido. Valores inferiores reduzirão a precisão dos resultados.

O nível de tensão a que um concreto normalmente está submetido não influencia nos resultados, porém níveis muito elevados (>65% da resistência do material) causam micro fissuras no concreto. Neste caso, o teste acusará uma redução significativa da velocidade.

2.10.2.5 Uso do ultra-som sem contacto pela aplicação em materiais de concreto asfáltico.

Um transdutor sem contato permite o ar ou outro meio entre o transdutor e o material a ser medido, o que o torna mais versátil para o campo e para os testes de laboratório. O ar é altamente atenuante, então a velocidade de propagação da onda ultra-sônica através deste é muito baixa, por isso, o ultra-som sem contato tem sido pouco usado.

Como seu nome diz, o ultra-som sem contato emprega transdutores que não precisam estar em contato com o material a ser analisado, razão pela qual vai existir uma camada de ar ou de água depois da emissão da onda até chegar ao corpo de prova e outra após atravessá-lo e chegar ao transdutor receptor, este procedimento difere do ultra-som de contato que transmite a onda diretamente ao corpo de prova.

Na indústria dos materiais, uma das primeiras aplicações do ultra-som sem contato foi a prova dos broques Del Styfoam usando uma frequência de 25 Khz. Os transdutores similares também foram produzidos na Universidade de Stanford usando borracha como a capa que emparelhava a impedância acústica. Usando tal transdutor em 1 Mhz, a distância no ar podia se medir a partir de 20 mm a 4 mm com uma precisão de 0.5 mm. Os transdutores de ar acoplados, baseados em capacitância, também têm tido um desenvolvimento substancial nos anos recentes. Estes transdutores, que estão disponíveis no mercado geral, são caracterizados por altas larguras de banda, e têm-se utilizado para avaliar compostos e outros materiais. A ferramenta principal pela investigação estava com o novo Gás Matrix Piezoelectric (GMP) e o pulso Chirp, que podia penetrar os materiais heterogêneos, tais como concreto, pelas profundidades grandes para um sinal claro e discernível. (DUNNING, 2004).

Conceitos básicos usados no ultra-som sem contato

Pulso Chirp: O sinal Chirp é relacionado com o efeito Doppler em que o movimento da fonte rende uma frequência diferenciada da frequência transmitida num ponto dado.

Atenuação: A atenuação do ultra-som é o índice do decaimento da energia mecânica que se propaga através do material. A resposta da atenuação do ultra-som no material é afetada pelas características do material. Assim, a medida do ultra-som é o valor da atenuação que se chama resposta integrada ou fundamental com as unidades em decibéis. A atenuação serve constantemente como ferramenta já que pode explicar características físicas ou químicas, que diminuem a intensidade ultra-sônica.

Impedância acústica: O som viaja através dos materiais abaixo da influência da pressão sã. Porque as moléculas ou os átomos de um sólido estão limitados um ao outro, o excesso de pressão dá lugar a uma onda que se propaga através do sólido. A impedância acústica é uma proporção da pressão acústica para fluir e é algo similar à impedância elétrica. Uma analogia é a comparação com a resistência elétrica, que se explica frequentemente com o fluxo da água. No entanto, a impedância se utiliza em vez da resistência porque é mais complexa que a resistência. A impedância acústica de um dado material define-se como o produto da densidade pela velocidade acústica do material de acordo com a equação 2.4.

$$Z = \rho V \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Onde:

Z = Impedância acústica

ρ = densidade

V = velocidade do material

A impedância acústica é usada para a determinação de transmissão acústica e reflexão ao limite de dois materiais que têm diferentes impedâncias acústicas, que alternadamente gera o valor da resposta integrada de atenuação (IR). A energia refletida é a porcentagem não absorvida pelo material e refletida de novo ao transdutor enquanto que a energia de transmissão é a porcentagem que passa através do material. Ambos se expressam em decibéis. No

caso da transmissão sem contato, a impedância acústica do ar e da amostra deve ser considerada como apresenta a figura 2.15.

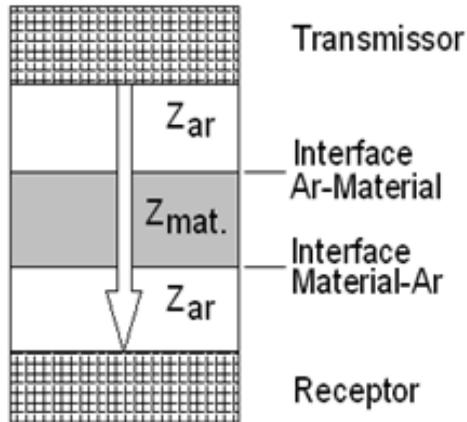


Figura 2.15 Exemplo de transmissão sem contato.

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{Z_1 * Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde:

I Energia transmitida dentro do material desde o ar

I_0 Energia de entrada

μ Coeficiente de atenuação do material.

ρ Densidade

x Espessura do material do material

Z_1 Impedância acústica do ar.

Z_2 Impedância acústica do espécime.

Resposta Integrada (IR): O IR é um dos valores medidos usados, que se relaciona diretamente com o coeficiente de transmissão do

material. O IR é a atenuação calculada segundo o medido, em decibéis, do material testado usando um sinal Chirp. A equação básica para como o IR se determina no transdutor receptor é utilizada nos espectros de amplitude dos dois sinais, da inicial e a da saída. O sinal se converte a um valor de decibel, que é a unidade do IR, que é uma função da pressão do som. O IR se relaciona com a impedância acústica do material Z. (DUNNING, 2006)

O IR_m, o qual é o IR do material, se determina do IR_c e do IR_a, que são o material mais o ar e a coluna de ar somente, respectivamente. O transdutor receptor tem um módulo de controle de qualidade (QC) que registra e gera médias estatísticas e desvios das medidas (figura 2.18). A determinação do IEm é simplesmente subtrair do sinal registrado no ar, I_{ra}, de IR_c.

$$IR_m = IR_c - I_{ra} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$IR_m = \text{Material } (Z_m)$$

$$IR_c = \text{Material e coluna de ar em ambos os lados do material.}$$

$$I_{ra} = \text{Coluna de ar } (Z_a)$$

Medida da resposta integral ultra-sônica

O equipamento usado foi um NCA-1000-2 emissor receptor pela transmissão do sinal Chirp, processamento, análises, projeção da imagem e armazenamento. Um quadro especial foi fabricado figura 2.16 e figura 2.17. Os transdutores foram localizados paralelamente. (DUNNING, 2006)

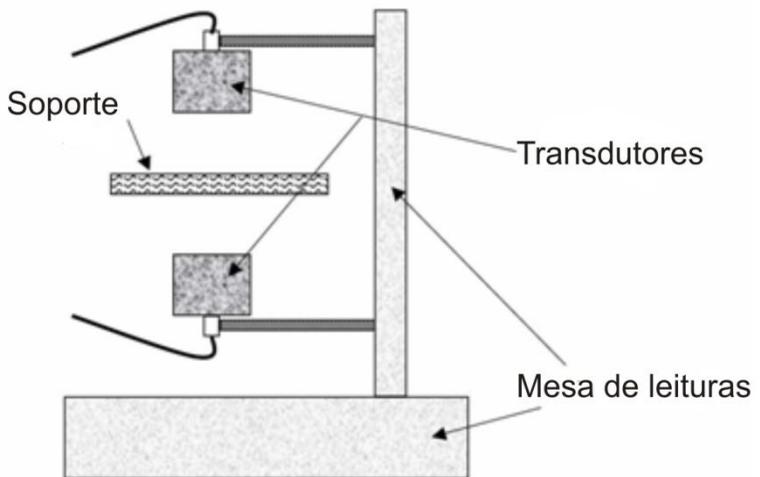


Figura 2.16 Corte da mesa de ultra-som e arranjo típico. (DUNNING, 2006)

Atualmente é possível determinar as características materiais com o ultra-som de contato, enquanto que um dispositivo sem contato proporcionaria mais flexibilidade para a prova de campo e de laboratório para os materiais de construção.

No estudo, viu-se que, em todos os casos, o valor do IR tinha uma correlação muito alta com a gravidade específica do material. Também foi constatado que o valor do IR podia diferenciar entre os tipos de gradação.

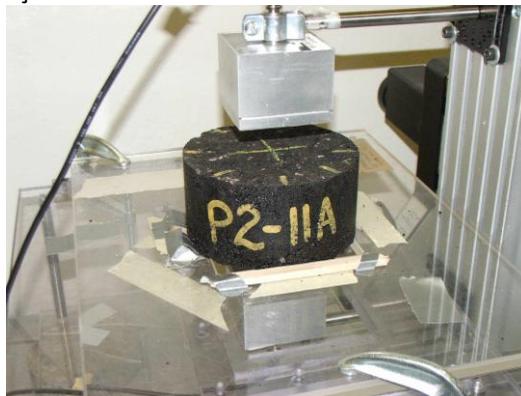


Figura 2.17 Exemplo do arranjo do espécime (DUNNING, 2006).

CAPÍTULO 3

FORMULAÇÃO DAS MISTURAS (METODOLOGIA FRANCESA)

O efeito das solicitações no pavimento, o aumento no tráfego e nas cargas, a consideração dos efeitos da segurança e confortos, conceitos pertinentes ao pavimento como a durabilidade, manutenção, resistência aos efeitos climáticos dentro dos conceitos técnicos, fazem com que a formulação do pavimento hoje em dia seja cada vez mais complexa. É por isso que deve ser estudado pontualmente cada um dos elementos que intervêm na estrutura do pavimento, assim como os que fazem parte da estrutura da camada asfáltica (granulares e betume) tendo em conta as qualidades e as quantidades de cada um deles e como este influencia no comportamento final no campo.

O processo de formulação das misturas precisa de uma grande quantidade de comparações entre os resultados de campo e laboratório durante a vida útil, assim como as suas classificações e normalizações. Os métodos de formulação se fundamentam em três conjuntos principais de variáveis dependentes entre si; o primeiro é relativo às propriedades físicas, químicas e mecânicas, o segundo é o dos ensaios e suas metodologias utilizadas para medir estas propriedades, e o terceiro corresponde ao dos valores a serem atingidos ou que não devem ultrapassar determinados limites, em função das propriedades requeridas pela natureza da obra, aliada à vida útil de projeto (BARRA 2009, MANUAL LPC, 2007).

A França na atualidade é considerada um dos países mais desenvolvidos em pesquisa na área de pavimentação e nos estudos das diferentes camadas da estrutura do pavimento, o que inclui os concretos asfálticos. No Brasil, especificamente na Universidade Federal de Santa Catarina, estão sendo desenvolvidas pesquisas focadas nesta área e com o uso de tecnologia própria está tentando-se encaminhar por essa direção. Na metodologia francesa, existem vários ensaios de importância para a escolha da mistura entre eles, os ensaios de Fadiga e do Módulo Complexo. Estes ensaios são feitos a partir de corpos de prova trapezoidais que provêm da serragem de placas. Após a serragem, os corpos de prova trapezoidais resultantes são

submetidos a uma triagem bastante restrita nas suas dimensões e homogeneidade.

O processo de corte de cada uma das placas é muito dispendioso e demorado, pois requer grande precisão e cautela para que cada corpo de prova extraído fique enquadrado nos limites das suas dimensões com um erro de $\pm 1\text{mm}$. Além da triagem por dimensões, também é tida em conta a homogeneidade para a seleção dos corpos de prova, mas este fator é independente da habilidade do operador para com a máquina de corte e depende unicamente do processo de mistura e compactação da placa. Devido a isto, uma placa com defeitos de mistura e compactação pode ser rejeitada antes mesmo do processo de corte. Este processo de seleção na França é feito pelo Gamadensímetro e no momento é preciso encontrar um método que de igual maneira possa determinar se das placas poderiam ser gerados corpos de prova trapezoidais que cumpram com os requisitos de homogeneidade de vazios e densidade. É por isso que foram feitos ensaios de ultra-som pelo método direto, que em teoria poderia cumprir com o objetivo desejado.

Este capítulo enfoca os ensaios usados para a formulação francesa de misturas asfálticas, a Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF P 98-252, 1999), o ensaio Duriez (AFNOR NF P 98-251-1, 1995), a deformação permanente (AFNOR NF P 98-253-1, 1993), o módulo complexo (AFNOR NF P 98-260-2, 1992) e a fadiga (AFNOR NF P 98-261-1, 1993).

3.1 ESCOLHA DO NÍVEL DA PROVA DE FORMULAÇÃO

O nível 0 (sem ensaios) corresponde a revestimentos destinados às zonas não circuladas, na França este nível não é utilizado e consideram irresponsável fazê-lo. Os outros níveis variam do mais simples (nível 1) ao mais completo (nível 4), os níveis superiores que englobam as exigências dos níveis inferiores. (MANUAL LPC 2007). Na figura 3.1, visualizam-se os quatro níveis de ensaios usados para a formulação de misturas asfálticas francesas.

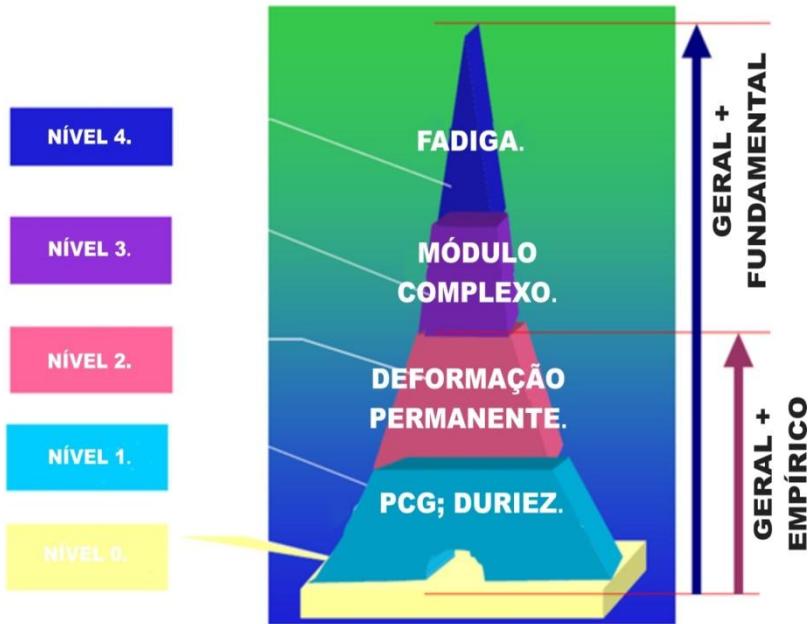


Figura 3.1. Resumo dos diferentes níveis de formulação de ensaios. (MANUAL LPC, 2007)

3.1.1 O nível 1

A mistura deve satisfazer uma janela de percentagens de vazios no ensaio da Prensa de Cisalhamento Giratório (figura 3.2) bem como o comportamento à água. À exceção do nível 0, este nível é comum em todas as provas. No caso em que seja aplicado a um baixo nível de sollicitação, o nível 1 pode ser suficiente sem ensaios complementares. O comportamento à água é medido de acordo com NF 12697-12, método B em compressão. Para certos materiais, existe uma exigência sobre a percentagem de vazios a 10 rotações para o ensaio PCG. Esta exigência é incluída nas normas europeias, mas como especificação “empírica” relativa à resistência à deformação permanente. (MANUAL LPC, 2007).

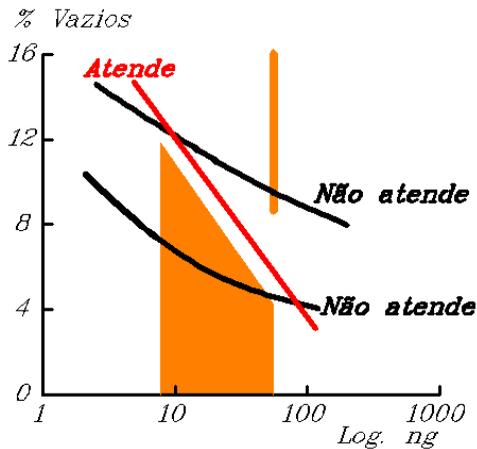


Figura 3.2 Exemplo de interpretação do ensaio na PCG. (MANUAL LPC, 2007)

3.1.2 O nível 2

Este nível compreende os ensaios do nível 1 (Prensa Cisalhamento Giratório e o comportamento à água), aos quais acrescenta-se o ensaio de deformação permanente. (MANUAL LPC, 2007).

3.1.3 O Nível 3

Este nível compreende os ensaios da Prensa de Cisalhamento Giratório e de comportamento à água do nível 1, o ensaio de deformação permanente do nível 2 e a caracterização do módulo da mistura. O ensaio de módulo é especificado no caso de obras importantes e quando a camada intervém no funcionamento estrutural do pavimento. Os valores de módulo a 15°C, 10 Hz ou 0,02s são utilizados diretamente nos modelos de cálculo de dimensionamento. (MANUAL LPC, 2007).

3.1.4 O Nível 4

Este nível compreende os ensaios Prensa de Cisalhamento Giratório e de comportamento à água do nível 1, o ensaio de deformação permanente do nível 2 e a caracterização do módulo da

mistura do nível 3 e é completado pela determinação da resistência à deformação permanente. (MANUAL LPC, 2007).

3.2 DESENVOLVIMENTO DAS MISTURAS

O desenvolvimento das misturas não é codificado. Trata-se de responder às exigências da prova de formulação descritas. O processo de formulação começa pela seleção dos componentes: granulares, faixa granulométrica, aditivos. O conhecimento das características dos constituintes da mistura é importante a partir da fase de concepção da mistura. O procedimento passa pelo ajuste da fórmula com a ajuda do ensaio PCG, completado seguidamente pelos ensaios especificados para o nível de prova de formulação escolhido. Este procedimento é descrito na figura 3.3 (MANUAL LPC, 2007).

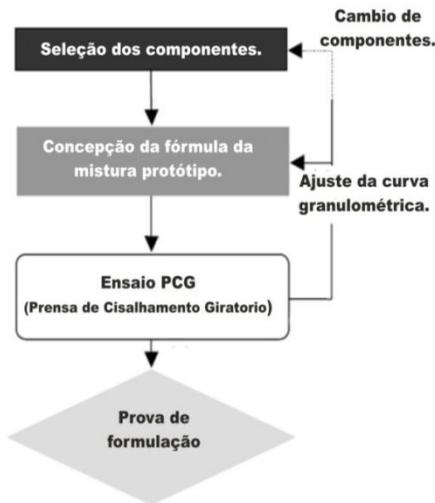


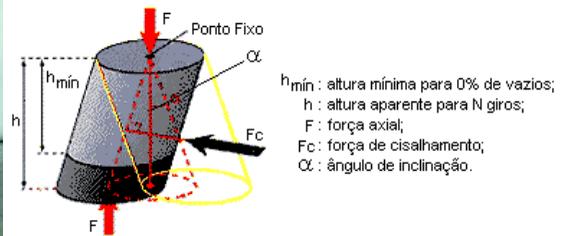
Figura 3.3 Esquema geral de desenvolvimento das misturas asfálticas segundo a metodologia francesa (MANUAL LPC, 2007)

3.2.1 Ensaios utilizados

Neste item, são descritos os principais ensaios usados para a formulação dos corpos de prova referentes às metodologias francesa e europeia.

3.2.1.1 Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG)

Este teste verifica a habilidade de compactação da mistura asfáltica impondo uma compactação lenta e isotérmica sob compressão estática, executada por um movimento cisalhante de uma das suas faces em torno do eixo de simetria do corpo de prova, este ensaio está normatizado na AFNOR NF P P9-252 (BARRA, 2009). (figura 3.4).



(a)

(b)

Figura 3.4 (a) Prensa de Compactação Giratória (PCG tipo 3) e (b) princípio do processo de compactação das misturas asfálticas, LPC (2007).

O princípio de funcionamento é simples; a mistura é preparada em laboratório e colocada a um condicionamento térmico (130°C – 160°C) e logo num molde cilíndrico de 150mm ou 160mm de diâmetro. Sobre o corpo de prova, é aplicada uma carga vertical de 0,6 MPa. No mesmo momento, a face é inclinada a um ângulo pequeno e sujeito a um movimento circular, enquanto exerce uma compactação no corpo de prova. Então a amostra apresenta um aumento da densidade por diminuição da porcentagem de vazios em função do número de voltas (MANUAL LPC, 2007).

Tendo em conta o tipo de mistura, natureza dos granulares, e da espessura da camada na obra, o formulador pode prever a porcentagem de vazios no pavimento para um número determinado de giros.

Este ensaio é muito sensível a fatores como a fricção de esqueleto granular (angularidade) e ao teor de ligante. Também podem ser detectados os riscos da deformação permanente. Permite, igualmente, detectar as mudanças imperceptíveis pelos ensaios normalmente usados e serve para verificar a constância das fórmulas no tempo (MANUAL LPC, 2007).

3.2.1.2 O comportamento à água

Nesta metodologia francesa, o comportamento à água é medido com o ensaio de Duriez. A normalização europeia tem duas modalidades de ensaio, a compressão diametral e a compressão simples que é derivada do ensaio Duriez. Estas duas modalidades dão resultados equivalentes, não obstante a repetibilidade e a reprodutibilidade do ensaio em compressão simples (Ensaio duriez) é praticamente duas vezes melhor que a do ensaio em compressão diametral (MANUAL LPC, 2007).

Compressão simples (Ensaio Duriez)

Segundo BARRA (2009), o ensaio de Duriez consiste em romper à compressão direta (simples), no mínimo 10 corpos de prova com massa total de 3,5kg, e no mínimo 12 corpos de prova com massa total de 1,0kg, para composições granulométricas com $D_{máx} \geq 14,0\text{mm}$ e $D_{máx} < 14,0\text{mm}$, respectivamente (AFNOR NF P 98-251-1, 1995).

No ensaio, uma mistura é compactada num molde cilíndrico (figura 3.5) por uma pressão estática a duplo efeito (figura 3.6). Uma parte dos corpos de prova é conservada sem imersão numa câmara a 18° C e com a umidade relativa do ar controlada (figura 3.7), a outra parte é conservada imersa. Cada grupo de corpos de prova é ensaiado a compressão simples (figura 3.8).



Figura 3.5. Moldes de aço para compactação das misturas asfálticas. (BARRA, 2009)



Figura 3.6 Processos de (a) compactação por duplo pistão e, de (b) desmoldagem dos corpos de prova. (BARRA, 2009)



Figura 3.7 Corpos de prova condicionados em câmara térmica (18°C e umidade relativa do ar a $50\% \pm 10\%$). (BARRA, 2009).



Figura 3.8 Corpo de prova durante o processo de ruptura à compressão simples. (BARRA, 2009)

O resultado da resistência após imersão é comparado com a resistência a seco e dá o comportamento da mistura à água. A resistência a seco é uma abordagem das características mecânicas, e a densidade constitui um indicador complementar ao ensaio de compactação da Prensa Cisalhamento Giratório.

Ensaio de compressão diametral

No ensaio de compressão diametral, os corpos de prova são confeccionados na Prensa de Compactação Giratória ou são extraídos de placas. Uma parte dos corpos de prova é conservada sem imersão a uma temperatura ambiente, e a outra parte é conservada imersa após ser submetida ao vazio durante 79 h a 40º C. Cada grupo de corpos de prova é ensaiado em compressão diametral a uma temperatura de 15º C. O relatório compara a resistência após a imersão com a resistência a seco e com este dado se observa o comportamento da mistura.

3.2.1.3 O ensaio de deformação permanente (Orniérage)

O ensaio verifica a resistência das misturas asfálticas ao afundamento de trilha de roda (AFNOR NF P 98-253-1, 1993). Os corpos de prova usados para este ensaio são preparados na mesa compactadora de pneus seguindo a normatividade francesa (AFNOR NF P 98-250-2). As dimensões dos corpos da placa são: de 150,0mm de largura x 500,0mm de comprimento x 50,0mm ou 100,0mm de espessura (Figura 3.9).

Os corpos de prova são submetidos ao tráfego de uma roda equipada de um pneumático, a uma frequência de 1 Hz, uma carga de 5 KN, uma pressão de 6 bares, e a um condicionamento térmico de 60º C.

A profundidade da deformação produzida na passagem de roda é notada em função do número de ciclos. As especificações levam sobre uma percentagem de afundamento respeito a um número de ciclos dado, que depende do tipo de material, e a sua classe.

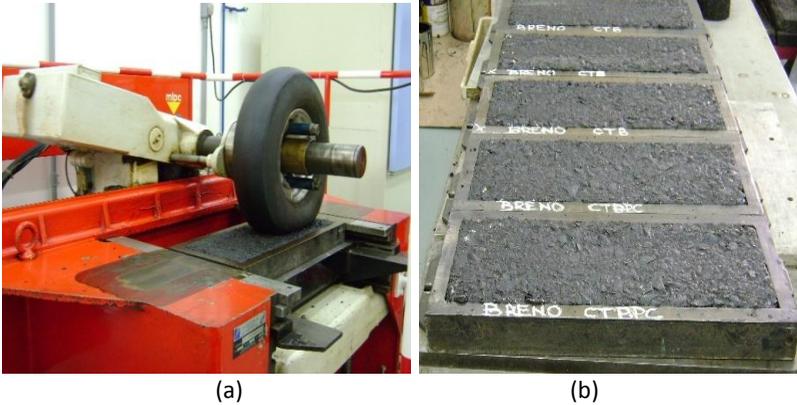


Figura 3.9 Placas de misturas asfálticas (a) durante a moldagem na mesa compactadora e, (b) após o processo de moldagem (BARRA, 2009).

3.2.1.4 Os ensaios de módulo complexo

O módulo complexo expressa o caráter viscoelástico linear do material, porque é medido no domínio das pequenas deformações, em que estas possuem um retardo de resposta (defasagem) em relação ao carregamento aplicado, originando um ângulo de fase φ entre os dois sinais. Este ângulo tem um valor de 0° para materiais elásticos e um valor de 90° para materiais viscosos (HUET, 1963 apud BARRA, 2009).

De maneira simples, o módulo complexo pode ser definido pela seguinte equação (MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; RIVIÈRE, 1996; BARRA, 2009) (Equação 3.1):

$$E^* = E_1 + i E_2 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

E^* = módulo complexo;

E_1 = parte real que representa a energia armazenada no material e que pode ser recuperada ou a parte elástica.

- E_2 = parte imaginária que representa a energia perdida por atrito interno do material (comportamento viscoso irreversível);
- i = número complexo definido por $i^2 = -1$.

Os ensaios do módulo complexo podem ser feitos segundo o estado de esforços; a tração compressão, flexão com 2, 3 e 4 pontos de apoio e cisalhamento. Estes, por sua vez, podem ser divididos em dois grupos (DI BENEDETTO e De La ROCHE, 1998); **Homogêneos**: para os quais pode-se obter diretamente as tensões e deformações; **Não Homogêneos**: para os quais a obtenção das tensões e deformações se dá considerando a estrutura geométrica do corpo de prova (BARRA, 2009). A tabela 3.1 descreve os diferentes ensaios para a determinação do módulo complexo.

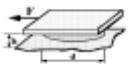
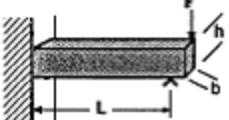
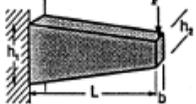
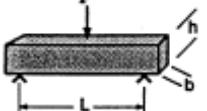
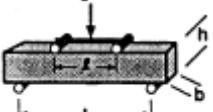
A pesquisa do BARRA (2009) foi desenvolvida com o ensaio de flexão alternada em 2 pontos com o controle do deslocamento, em modo contínuo, aplicado a corpos de prova com geometria trapezoidal (AFNOR NF P 98-260-2, 1992).

Este ensaio é feito em corpos de prova trapezoidais que, segundo HUET (1963) apud BARRA (2009), apresentam melhor comportamento. Nos corpos de prova prismáticos, a seção submetida às tensões mais elevadas é no engastamento e na qual se produzirá a ruptura, principalmente nos ensaios de fadiga.

Graças ao ensaio do módulo complexo, existem várias maneiras de representar graficamente o comportamento visco-elástico da mistura asfáltica tendo em conta os diferentes parâmetros que intervêm (temperatura, frequência, parte real (E_1), parte imaginária (E_2) e o ângulo de fase). Entre estas curvas estão: curvas isócronas, curvas isotérmicas, curva de equivalência frequência-temperatura, plano Cole-Cole, espaço de Black (BARRA, 2009; DONGMO-ENGELAND, 2005; CASTAÑEDA, 2004; MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996).

As curvas isócronas relacionam o módulo de rigidez complexo com a temperatura nos diferentes níveis de frequências do ensaio, com o qual se avalia a susceptibilidade térmica da mistura asfáltica (Figura 3.10),(BARRA, 2009).

Tabela 3.1 Diferentes ensaios de módulo complexo (De La ROCHE, 1996).

Tipo	Modo de Execução	Princípio do Ensaio	Referências (<i>apud</i> De La ROCHE, 1996)
ENSAIOS HOMOGÊNEOS	Tração/ Compressão (T/C) (com ou sem confinamento)		CHARIF (1991) DOUBBANEH (1995)
	Cisalhamento		ASSI (1981)
	Cisalhamento a altura constante		KENNEDY et al (1994)
	Máquina de cisalhamento		LEMPE et al (1992)
	Cisalhamento co-axial		GÜBLER (1990)
ENSAIOS NÃO HOMOGÊNEOS	Flexão em 2 pontos (2PB)		FRANCKEN et al (1994)
			HUET (1963) CHAUVIN (1990)
	Flexão em 3 pontos (3PB)		MYRE (1992)
	Flexão em 4 pontos (4PB)		PRONK (1996)

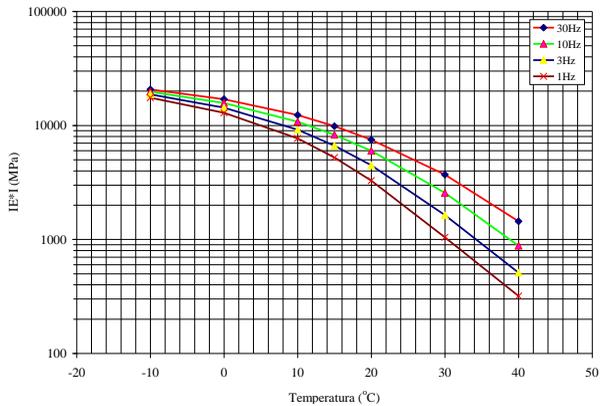


Figura 3.10 Curvas isócronas do módulo complexo. (BARRA, 2009)

As curvas isotérmicas relacionam os valores do módulo de rigidez complexo com os diferentes níveis de frequência em função da temperatura de teste. Este gráfico avalia a susceptibilidade cinética da mistura asfáltica com a variação da inclinação das curvas em cada uma das temperaturas ensaiadas (figura 3.11). As diferentes curvas produzidas no ensaio podem ser trasladadas para a construção de uma única curva representativa com a utilização de diversos modelos de ajuste (William Landel, Arrhenus ou gráfico). Esta curva permite apreciar de melhor forma o comportamento cinético da mistura asfáltica.

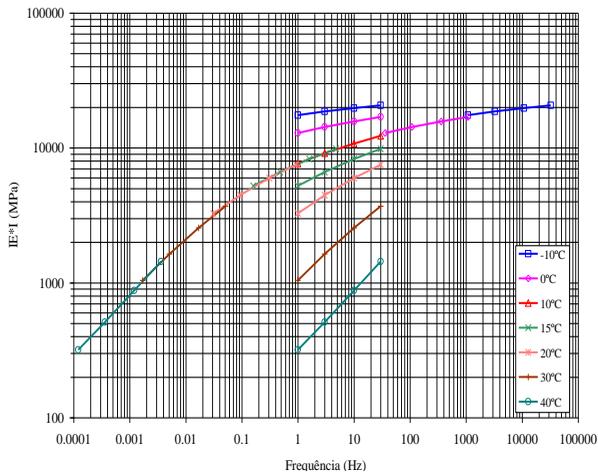


Figura 3.11. Curva de equivalência frequência-temperatura ($T_R = 10^\circ\text{C}$) (BARRA, 2009).

Na figura 3.12, está representado o plano Cole-Cole, que relaciona as partes real (E_1) e imaginária (E_2) do módulo complexo (E^*), em função da temperatura e frequência de teste. Este caracteriza a evolução viscoelástica no domínio linear das misturas asfálticas. A função *Damping* é expressa através da tangente do ângulo de fase φ , $d(\tan\varphi)$, e demonstra a evolução da defasagem entre a tensão e a deformação das misturas asfálticas com a variação da temperatura e da frequência (BARRA, 2009, MOMM 1994).

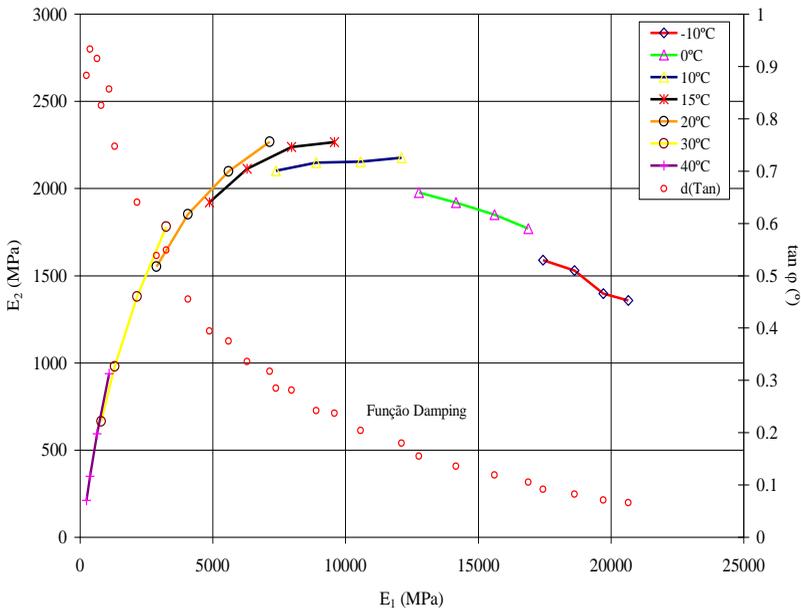


Figura 3.12 Plano Cole-Cole do módulo complexo e função *Damping* (BARRA, 2009).

Na figura 3.13 está representado o espaço de Black que relaciona o módulo de rigidez complexo $|E^*|$, com o ângulo de fase φ . Este gráfico permite visualizar a região dos módulos de valores pequenos e, em particular, a diminuição do ângulo de fase φ para as condições de temperatura elevada. É possível perceber o aumento dos valores de φ com o acréscimo da temperatura (ou a partir da diminuição da frequência) e vice-versa. A mistura asfáltica obedece ao

princípio da equivalência frequência-temperatura, assim a curva obtida deve ser única. Isto é, cada valor da defasagem φ corresponde a somente um valor do $|E^*|$ na frequência considerada de teste (De La ROCHE, 1996; BARRA 2009; MOMM 1994).

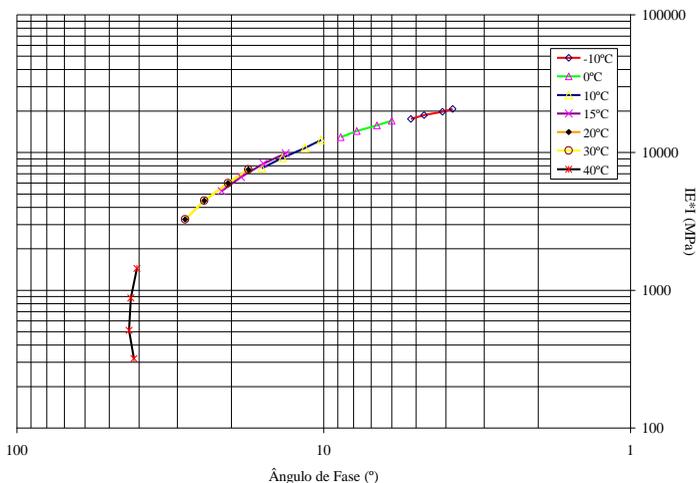


Figura 3.13 Espaço de Black do módulo complexo (BARRA, 2009).

3.2.1.5 Fadiga das misturas asfálticas

Quando a camada asfáltica é solicitada com a passagem do veículo, a carga gera uma deformação com magnitude inferior à resistência limite correspondente à ruptura sob carregamento monotônico. A passagem de um número elevado deste tipo de solicitações gera um processo de dano progressivo que conduz à ruptura, o que é conhecido como dano por fadiga da mistura asfáltica (BARRA, 2009; DOMEQ, 2005; BAAJ, 2002; MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; RIVIÈRE, 1996).

Durante a vida útil, na estrada, a duração do carregamento à qual são submetidas as camadas de revestimento asfáltico, durante a passagem do eixo, é pequena. Desta maneira, o pavimento é submetido a esforços de flexão alternada no sentido longitudinal do carregamento (figura 3.14). As tensões de tração, então, surgem na base das camadas e se repetem com a passagem dos veículos (BARRA, 2009; MAILLARD, 2005; BAAJ, 2002; De La ROCHE e ODEON, 1993).

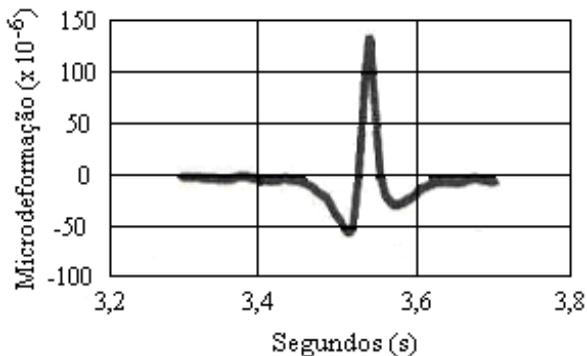


Figura 3.14 Sinal de deformação longitudinal medido na base da camada betuminosa de rolamento sob a passagem de carregamento (De La ROCHE e ODEON, 1993).

O comportamento à fadiga das misturas asfálticas varia de mistura a mistura dependendo de diversos fatores; teor e tipo de betume, curva granulométrica, tipo e origem dos grãos, aditivos, etc. (BARRA, 2009; DOMEK 2005; MOMM, 1998)

O dano por fadiga é, assim, o principal fenômeno de dano nos pavimentos de concreto asfáltico e principalmente na camada de revestimento, onde o processo de fissuração pode conduzir ao colapso da estrutura das camadas do pavimento (BARRA, 2009; DOMEK, 2005; RUDENSKY, 1997).

No laboratório, os testes de comportamento à fadiga em concretos asfálticos são realizados com o uso de um carregamento cíclico e os corpos de prova usados podem apresentar diferentes geometrias. Nas provas, os ensaios podem ser feitos controlando a força, o deslocamento e até a energia (força e deslocamento) (BARRA 2009; BODIN, 2002; BAAJ, 2002; MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; RIVIÈRE, 1996).

No ensaio com deslocamento controlado, o deslocamento é mantido constante durante o transcurso do ensaio. Então, vai se apresentar uma diminuição da força ao longo do teste até a ruptura. A figura 3.15 ilustra o processo que acontece durante o ensaio.

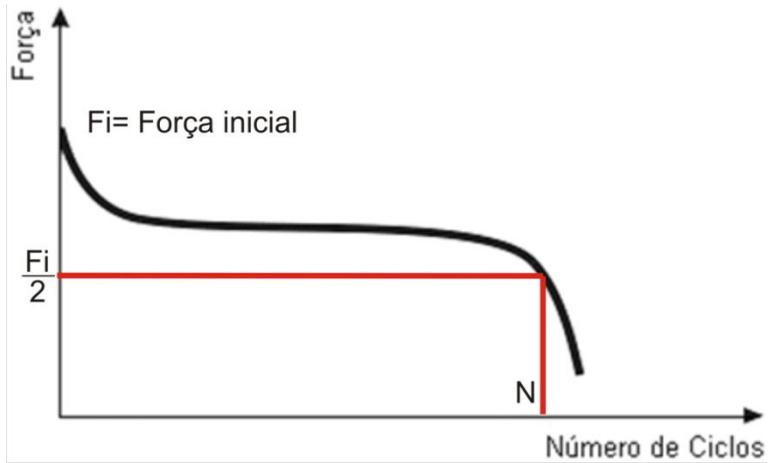


Figura 3.15 Evolução da força durante um ensaio executado com o controle do deslocamento.

Ao contrário do deslocamento controlado, no ensaio de força controlada, esta permanece constante e a deformação é a que varia no transcurso do ensaio (figura 3.16).

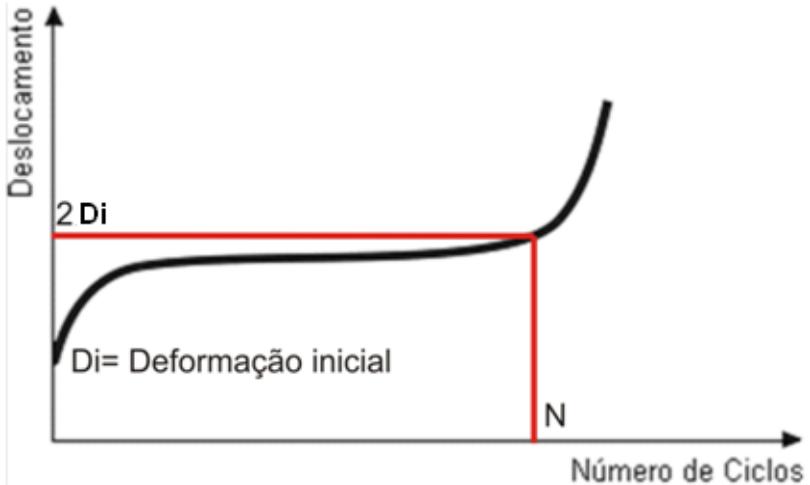


Figura 3.16 Evolução do deslocamento durante um ensaio executado com o controle da força.

Como resultado dos ensaios de fadiga, é obtida uma curva representativa da vida em fadiga da mistura em número de ciclos em

relação à amplitude do tipo carregamento aplicado (deslocamento controlado ou força controlada), é a curva de Wöhler (BARRA, 2009; BODIN, 2002; De La ROCHE, 1996; HUET, 1963).

A curva que representa a vida de um material em função das solicitações aplicadas S (curva de Wohler) é habitualmente dada pela relação:

$$N = a.S^{-b}$$

(3.2)

$$\log(N) = a - b.\log(S)$$

(3.3)

Onde:

N = é o número de aplicação da solicitação;

S = é a solicitação, (tensão ou deformação);

a, b = são constantes, sendo b representante da inclinação da reta de fadiga.

Na pesquisa realizada por MOMM (1998), foram seguidos os parâmetros da metodologia francesa e na sua tese, apresenta uma curva em fadiga a qual serve como exemplo de apresentação da curva de fadiga com os critérios franceses (Figura 3.17).

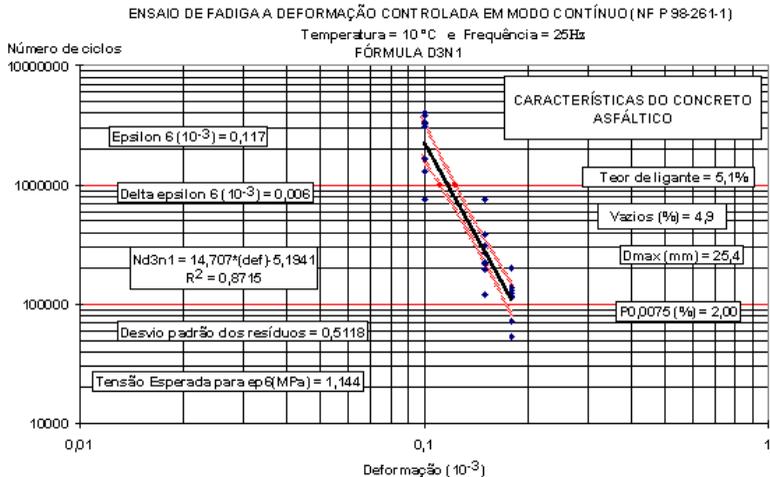


Figura 3.17 Representação gráfica de uma curva de fadiga calculada conforme os procedimentos normativos franceses (MOMM, 1998).

A máquina usada para os ensaios de fadiga e do módulo complexo está apresentada na figura 3.18.



Figura 3.18 Protótipo inicial da primeira máquina de fadiga e do módulo complexo do Brasil, desenvolvida no laboratório de pavimentação da UFSC.

3.3 CORTE

Neste processo, as placas são cortadas 15 dias após (período de descanso recomendado pelas normas francesas) a compactação em corpos de prova trapezoidais de $B=70$ mm, $b=25$ mm, $h=250$ mm, $e= 25$ mm, todas estas dimensões com uma precisão de ± 1 mm.

Por causa do atrito entre o disco de corte e a placa de mistura asfáltica, é produzido um aquecimento do material, o que é controlado com a injeção de água no momento do corte e com a velocidade de avanço da mesa de suporte da placa que deve ser inferior a 2 cm/seg. (Figura 3.19).

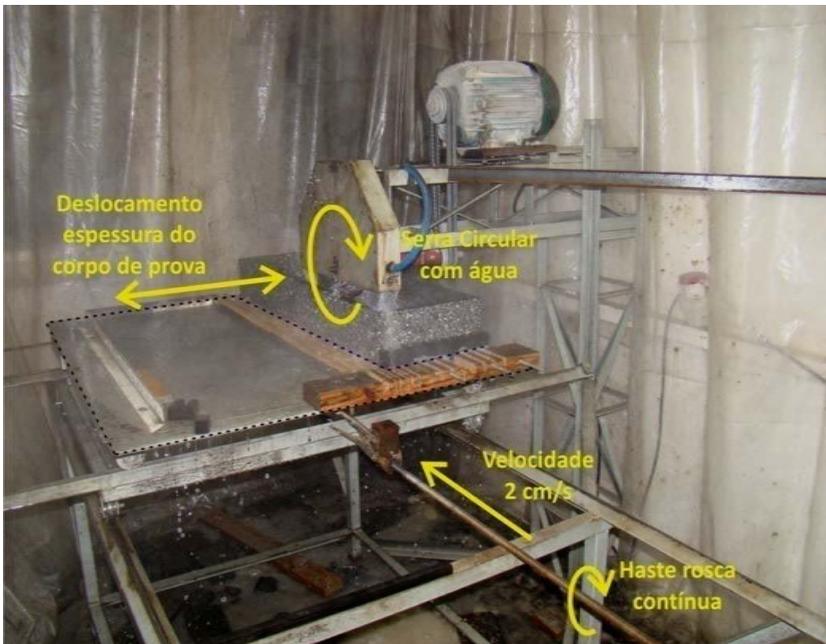


Figura 3.19 Equipamento de corte e mesa deslizante (OTTO, 2009).

Durante o processo, são cortadas duas placas no mesmo tempo (figura 3.20).

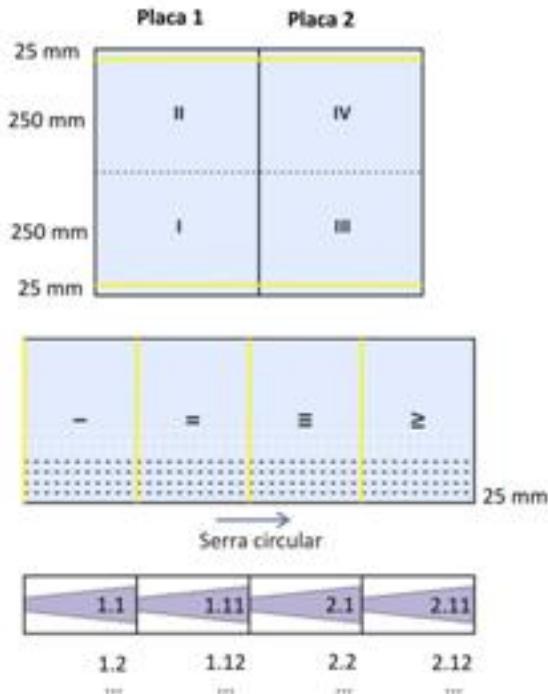


Figura 3.20 Lógica de corte das placas (OTTO 2009)

3.4 TRIAGEM DOS CORPOS DE PROVA TRAPEZOIDAIS

A triagem dos corpos de prova é feita para selecionar os corpos de prova cujas características são as mais próximas possíveis. Os parâmetros tidos em conta para a seleção são densidade e dimensões. A densidade depende do processo de mistura e compactação da placa e as dimensões dependem da perícia do operador no momento do corte.

A porcentagem de vazios é calculada substituindo na equação 3.3:

$$\%V = \frac{(D_t - D_a) * 100}{D_t} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde:

%V = Percentagem de vazios

D_t = Densidade teórica

D_a = Densidade aparente

Para a seleção por dimensões é calculado o valor do K_ξ na equação 3.4

$$k_{\xi} = \frac{(B-b)^2}{8 \cdot h^2 \cdot b \cdot \left(\ln\left(\frac{B}{b}\right) - \frac{(B-b) \cdot (3 \cdot B - b)}{2 \cdot b^2} \right)}$$

(Eq. 3.4)

Onde:

B = Base maior em milímetros

b = Base menor em milímetros

h = Altura do corpo de prova em milímetros

O grupo é selecionado baseado nos vazios (%V) e nas dimensões (K_ξ). Por vazios, tem que apresentar um desvio padrão inferior a 0,5 e, por dimensões, o coeficiente de variação do K_ξ deve ser inferior a 1%.

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E DO EQUIPAMENTO UTILIZADOS

A velocidade da onda ultra-sônica é afetada por diversos fatores. Para conhecer em quais casos podem ser aplicados os resultados, é importante caracterizar os materiais usados para a pesquisa. No caso dos granulares, é importante conhecer a origem e o tipo da rocha, e até o tipo de britagem utilizado porque esta influencia na forma dos grãos que, por sua vez, afetam o grau de acomodação das partículas e a porcentagem de vazios final da mistura de concreto asfáltico após a compactação.

Os materiais usados na pesquisa podem ser agrupados:

- Os materiais e equipamentos que foram usados nos ensaios.
- Os materiais que foram usados nos ensaios na pesquisa de ASTRANA (2006).
- Os materiais que foram usados na pesquisa de BARRA (2009).
- Os materiais que foram usados para a elaboração da camada de base de brita graduada e camada de revestimento simuladas em laboratório.

4.1 MATERIAIS ACOPLANTES E EQUIPAMENTOS QUE FORAM USADOS NOS ENSAIOS

Neste item, são detalhados os materiais e equipamentos usados durante toda a bateria de ensaios.

4.1.1 Equipamentos

Para os ensaios, foram usados dois modelos de medidores de velocidade de pulso ultrasônico PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), nos quais o princípio de funcionamento dos aparelhos é o mesmo, mas pode se apresentar uma pequena variação no tempo de estabilização das leituras e na variabilidade destas, mas aprofundar este tema não é foco desta pesquisa.

PUNDIT 6

O ponto de tensão do PUNDIT é conectado a um transdutor, que gera o sinal ultra-sônico que viaja através da amostra. O pulso

ultra-sônico é detectado com um transdutor similar, que converte o sinal detectado em um sinal eletromagnético. Este sinal eletromagnético, então, é amplificado no amplificador do receptor e indicado no osciloscópio. (ELMEHDI et al, 2002).

Este aparelho fornece o tempo de percurso da onda ultra-sônica e com este dado pode-se obter a velocidade da onda. No caso do método direto, por ter uma distância de transcurso conhecida, pode ser calculada a velocidade. No caso do método indireto, são necessárias varias medições para poder estabelecer a inclinação da reta (tempo vs. distancia), que é o valor da velocidade.

O processo de calibração do aparelho é realizado em uma barra de metal padrão com o tempo de percurso de onda conhecido (25,7 μ s), (figura 4.1).



Figura 4.1 Processo de calibração do aparelho com o PUNDIT 6.

A frequência dos transdutores usados nas medidas é de 54 KHz, que segundo a literatura é a mais recomendável para estes tipos de materiais.

PUNDIT PLUS

O princípio de funcionamento deste aparelho é igual ao de PUNDIT 6, mas apresenta funções adicionais e a forma de calibração do aparelho é diferente.

4.1.2 Acoplantes

O acoplante usado nos ensaios de ultra-som é a vaselina para garantir um melhor contato do transdutor com o corpo de prova. No entanto, a vaselina causou a diluição do CAP no corpo de prova. Em certa maneira, a vaselina causou uma desintegração do ligante, que reduz a ligação dos agregados na superfície (figura 4.2 e 4.3).



Figura 4.2 Efeitos da vaselina no Corpo de Prova testado.



Figura 4.3 Visualização dos efeitos da vaselina no Corpo de Prova testado após o corte.

No processo de corte do corpo de prova, se percebe que o efeito da vaselina no ligante asfáltico não atinge o centro onde vão ser tirados os corpos de prova trapezoidais para os ensaios de fadiga e do módulo (figura 4.4),mas é precioso conservar a integridade do corpo de prova.

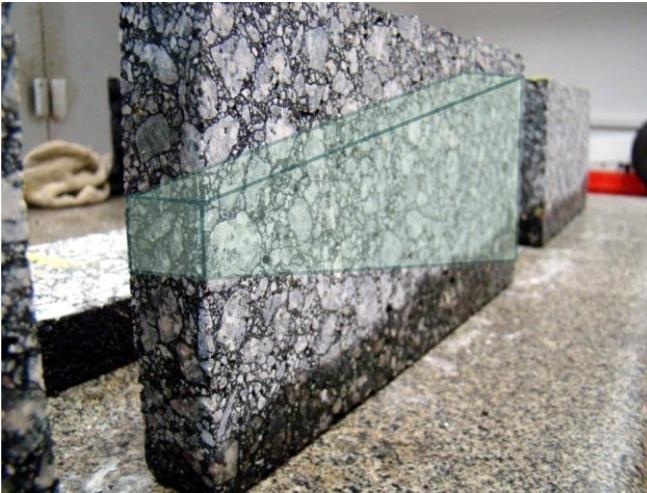


Figura 4.4 Localização do CP trapezoidal nas placas secundárias procedentes do CP testado inicialmente (OTTO, 2009).

Para evitar esta degradação nos corpos de prova, buscaram-se alternativas:

- Uma camada fina de cimento Portland ou gesso em ambas as faces.
- Um filme plástico fino.
- Troca do material acoplante.

As alternativas de usar cimento Portland ou gesso foram descartadas porque adere à macrot textura da superfície do material, além de modificá-la.

O filme plástico foi colocado sobre a superfície do corpo de prova e posteriormente aquecido levemente para garantir o correto contato. Foram realizadas tentativas para medir o tempo de percurso da onda ultra-sônica num corpo de prova, mas observou-se que não se conseguiam resultados. Provavelmente, entre o CP e o filme plástico fino, fica uma camada pequena de ar que impossibilita a tomada de leituras (figura 4.5).



Figura 4.5 Tentativa de Proteção do CP com o plástico fino.

Resta, então, a opção da troca do material empregado como acoplante. A alternativa encontrada foi a bentonita.

Vaselina

A vaselina é considerada como uma parafina a qual é límpida, incolor, não fluorescente, insolúvel na água e não alcoólica, solúvel no éter, clorofomo e nos óleos essenciais. É usada em diversas áreas da engenharia para diversos fins.

Bentonita

A bentonita é o nome dado a uma mistura de argilas de grãos muito finos composta predominantemente pelo argilomineral montmorilonita (55-70%), do grupo das esmectitas, independentemente de sua origem ou ocorrência. As esmectitas possuem como características principais o alto poder de inchamento,

até 20 vezes seu volume inicial, alta área de superfície (até 800 m²/g), capacidade de troca catiônica (CTC) na faixa de 60 a 170 meq/100g e tixotropia. Estas características conferem à bentonita propriedades bastante específicas, que têm justificado uma vasta gama de aplicações nos mais diversos segmentos (PINHEIRO et al, 2009). A bentonita tem a particularidade de, misturada com água, resultar numa pasta com a consistência semelhante à da vaselina (Figura 4.6).

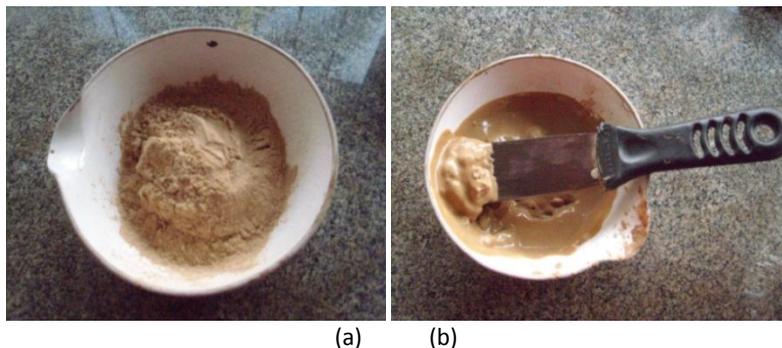


Figura 4.6 Bentonita usado como material acoplante nos ensaios. (a) Em pó. (b) Misturada com água.

4.2 MATERIAS USADOS NOS ENSAIOS DA PESQUISA DE ASTRANA 2006.

ASTRANA 2006 na sua pesquisa construiu 8 corpos de prova, dos quais 7 foram usados para o desenvolvimento deste trabalho.

4.2.1 Brita

Para a elaboração do corpo de prova, foram usados materiais granulares selecionados duma pedreira da região da grande Florianópolis, município de São José. Todos os agregados minerais utilizados tiveram a mesma rocha de origem. O granular britado nesta pedreira é de origem da suíte intrusiva São Pedro de Alcântara, constituído de granito de coloração cinza claro. O processo de britagem desta pedreira se constitui num sistema convencional, com britadores primários de mandíbula e britadores secundários giroféricos. Os materiais britados foram coletados diretamente dos estoques da

pedreira para obter uma amostra representativa do material seguindo a norma DNER-PRO 120/97. (ASTRANA, 2006; MOMM, 1998).

4.2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Os cimentos asfálticos usados para a elaboração das placas foram: CAP 50-70, CAP 50-70 modificado por polímero SBS (4%), e CAP 50-70 modificado com adição de 15% de borracha moída de pneu (AMB 15%). As características destes cimentos asfálticos podem ser visualizadas nas tabelas 4.1 à 4.3 e na figura 4.7:

Tabela 4.1 Características do CAP 50-70 (ASTRANA, 2006).

CARACTERISTICAS	CAP 50-70
Viscosidade Brookfield a 135° (cp)	348,3
Viscosidade Brookfield a 155° (cp)	139,2
Viscosidade Brookfield a 175° (cp)	66,8
Penetração (0,1mm)	57,3
Ponto de amolecimento, °C	47,2
Recuperação elástica	3,7

Tabela 4.2 Características do CAP modificado por borracha moída de pneu (15%)

Características	AMB 15%
Viscosidade Brookfield a 135°C, (cP)	3876,7
Viscosidade Brookfield a 155°C, (cP)	1527,8
Viscosidade Brookfield a 175°C, (cP)	704,2
Penetração, (0,1 mm)	40,2
Ponto de amolecimento	60,2
Recuperação elástica, %	67,2

Tabela 4.3. Especificações do CAP modificado por polímero SBS (ASTRANA, 2006)

Características	CAP 50-70 COM 4% SBS
Viscosidade a 135°, cps, máx.	2500
Viscosidade a 145°, cps, máx.	2000
Viscosidade a 175°, cps, máx.	450
Penetração a 25°C (100g, 5s), dmm	50-70
Ponto de amolecimento, °C	60-75
Ponto de ruptura Fraas, °C, mín	-15
Intervalo de Plasticidade, °C, mín	75
Índice de susceptibilidade térmica, mín	+1
Densidade a 20/4°C	1,00-1,04
Ponto de fulgor, °C, mín	240
Ductilidade a 25°, cm, mín	100
Ductilidade a 10°C, cm, mín	90
Recuperação elástica a 25°C, %, mín	85
Recuperação elástica a 10°C, %, mín	70
Compatibilidade a 163 °C, 2 dias, máx.	2
Micromorfologia da dispersão	OK

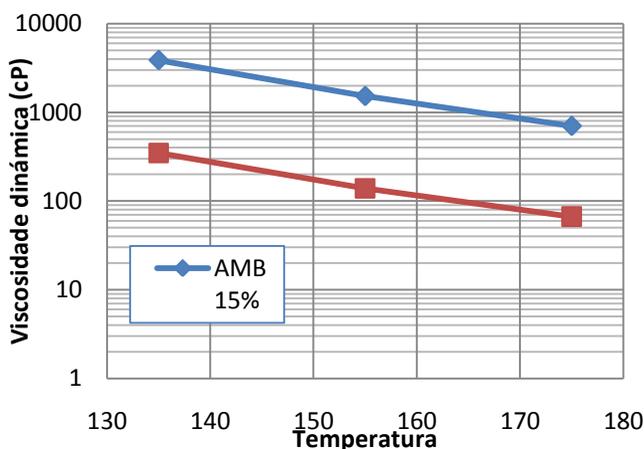


Figura 4.7 Curva de viscosidade dos ligantes CAP 50/70 e AMB (15%)

4.2.3 Curvas granulométricas e teor de cap.

Para o corpo de prova denso foi escolhida a curva granulométrica apresentada na tabela 4.4 e figura 4.8.

Tabela 4.4 Granulometria das misturas da mistura de concreto asfáltico (MOMM, 1998)

Abertura das Peneiras (mm)	D _{máx} =12,5mm, n=0,48 Porcentagem Pasante
25,4	100
19,1	100
12,7	100
9,5	87,61
4,75	62,74
2,8	48,63
1,18	32,07
0,6	23,15
0,3	16,58
0,15	11,87
0,075	8,5

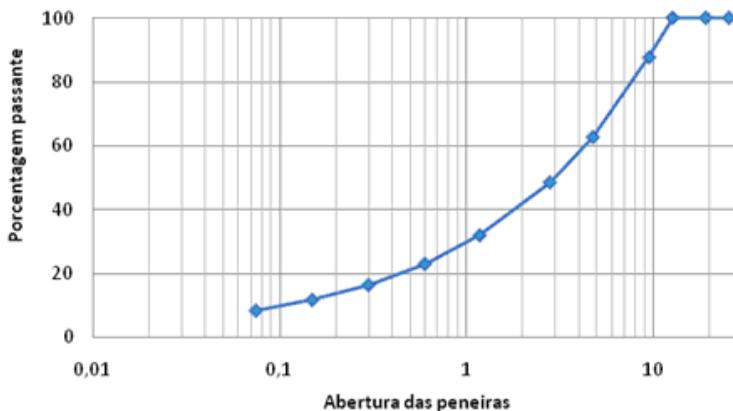


Figura 4.8 Curva granulométrica da misturas D_{máx}=12,5mm,n=0,48 (MOMM, 1998)

Na pesquisa de ASTRANA (2006), as curvas granulométricas usadas para a composição dos concretos asfálticos drenantes estão apresentadas na tabela 4.5 e figura 4.9.

Tabela 4.5. Granulometria das misturas de concreto asfáltico drenante. (MEURER FILHO, 2001)

Misturas Drenantes			
Aberturas das pineiras (mm)	D_{máx}=9,52, n=0,81 b0/4	D_{máx}=12,5, n=0,76 b0/6	D_{máx}=19,1, n=0,7, b0/9
	Porcentagem Passante	Porcentagem Passante	Porcentagem Passante
25,4	100	100	100
19,1	100	100	100
12,5	100	100	38,74
9,5	100	57,2	7,8
6,3	38,54	7,77	7,8
4,75	7,71	7,77	7,8
2,8	7,71	7,77	7,8
1,18	7,71	7,77	7,8
0,6	7,71	7,77	7,8
0,3	7,71	7,77	7,8
0,15	7,71	7,77	7,8
0,075	4,36	4,53	4,75

Os teores de CAP para a execução das misturas de concreto asfáltico drenante foram definidos na pesquisa de Meurer Filho (2001), que correspondem, segundo a pesquisa, a um bom desempenho quanto à resistência mecânica e maiores valores para vazios comunicantes. E a confecção da mistura densa baseou-se no trabalho de MOMM (1998), cujo teor de CAP foi aquele que maximizou a resistência mecânica. Com isso ficaram assim definidos os teores de CAP: A mistura densa teve um teor de CAP de 4,8%; as misturas drenantes tiveram teor de CAP de 4,4% para as misturas com diâmetro máximo 12,5 e 19,1 mm e teor de CAP 4,2 % para as misturas com diâmetro máximo de 9,5mm

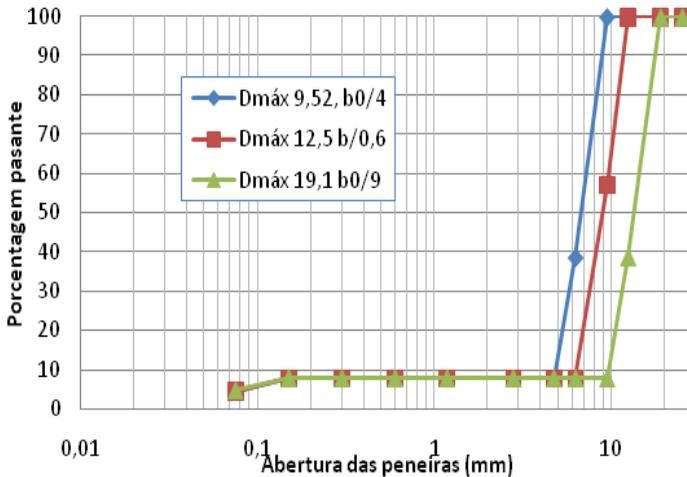


Figura 4.9 Curva granulométrica das misturas drenantes (MEURER FILHO, 2001)

4.3 MATERIAIS QUE FORAM USADOS NA PESQUISA DE BARRA 2009

Os materiais usados na pesquisa de BARRA (2009) são provenientes de jazidas na região nordeste do estado de Pará.

4.3.1 Brita

A brita utilizada na pesquisa de BARRA (2009) pertence à suíte intrusiva Tracuateua, composta pelos corpos granitóides de Tracuateua (jazida Santa Mônica, de onde foram retiradas as amostras), Mirasselvas e Tauari. Esta formação geológica aflora no Cráton São Luiz, localizado na Bacia do Parnaíba, sendo descrita na carta geológica SA.23-V-C elaborada pela Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais (CPRM, 2009), como: biotita-muscovita, sienogranitos associados a diques sinplutônicos e aplitos de cor raramente rosada, com granulação média a grossa e apresentam dureza 7 (na escala de 1 a 10 de Mohs). Datações radiométricas realizadas por ALMEIDA et al (1968) indicam uma idade aproximada de 1970 ± 60 milhões de anos, situando esta formação na Época Paleoproterozóica (BARRA, 2009).

Para a definição do nome da rocha utilizou-se a classificação proposta pela *International Union of Geological Sciences* (IUGS), que se tornou o método mais utilizado no mundo, principalmente para rochas compostas por minerais félsicos (STRECKEISEN, 1976). Nesta classificação, a amostra analisada é considerada um monzogranito. No entanto, está muito próxima da classe dos sienogranitos. KLEIN e MOURA (2003) definem a suíte intrusiva Tracuateua como sendo composta não apenas por sienogranitos, conforme define a carta geológica citada no parágrafo anterior, mas também por monzogranitos com duas micas originadas a partir do retrabalhamento da crosta Paleoproterozóica mais antiga e da crosta Arqueana (BARRA 2009).

Da análise macroscópica em amostras de mão, este monzogranito se apresenta como uma rocha ácida maciça com granulação média, podendo-se observar que alguns fragmentos desta rocha já se encontram intemperizados, com minerais sem brilho e quebrando-se com aplicação de esforço manual. A presença da caulinita já é um indicativo da alteração química dos feldspatos presentes nesta rocha (BARRA 2009).

4.3.2 Calcário

O calcário vem sendo utilizado para a fabricação de cimento Portland pela empresa Cimentos do Brasil S.A. (CIBRASA), sendo a principal atividade mineradora da região Nordeste do Estado do Pará. Localizada na Bacia do Parnaíba, este depósito pertence à Formação Pirabas, imediatamente localizado abaixo da Formação Barreiras. A Formação Pirabas é um depósito do Período Terciário (65 a 1,7 milhões de anos) composto por calcário fossilífero contendo, às vezes, folhelhos (rocha formada por argilominerais) e margas (rochas compostas por minerais carbonáticos e com 35% a 60% de argila) Os resultados de quantificação dos minerais presentes na rocha matriz indicaram 88,37% de calcita e 5,39% de dolomita (BARRA, 2009)..

“Por apresentar em sua composição mais de 50% de minerais carbonáticos, a amostra estudada é oriunda de uma rocha matriz carbonática. Para a classificação desta rocha carbonática, optou-se pelo critério composicional, que leva em consideração os quantitativos de minerais que a constitui. Para esta classificação se utiliza um diagrama

triangular, em que as rochas carbonáticas são subdivididas em oito grupos. Por apresentar uma relação dolomita/calcita menor que 1/9 e conter menos de 10% de impurezas (minerais não carbonáticos, que neste caso correspondem aos 4% de quartzo), a rocha é classificada no diagrama triangular como um calcário (DPM/UNESP, 2009)", (BARRA, 2009).

4.3.3 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O ligante betuminoso usado na pesquisa por BARRA 2009 foi fornecido pela refinaria Lubrificantes e Derivadas de Petróleo do Nordeste (LUBNOR), localizada no Estado do Ceará. As principais características do ligante estão descritas na tabela 4.6 e na figura 4.10 está representada a curva de viscosidade do ligante.

Tabela 4.6 Principais características do ligante betuminoso (BARRA, 2009).

Ensaio	Resultados	
Massa Específica (g/cm ³)	1,03	
Ponto de Amolecimento Anel e Bola	49,5°C (mín 46,0°C)*	
Penetração (25°C)	50,2 (0,1mm) (mín 50,0 (0,1mm))*	
Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP)	-1,2 (-1,5 a + 0,7)*	
Viscosidade Saybolt-Furol	Temperatura (°C)	Tempo de Escoamento (s)
	135	269 (mín 141)*
	149	156 (mín 50)*
	163	93 (30 a 150 para 177°C)*

*Valores mínimos a serem atendidos, especificados nas respectivas normas.

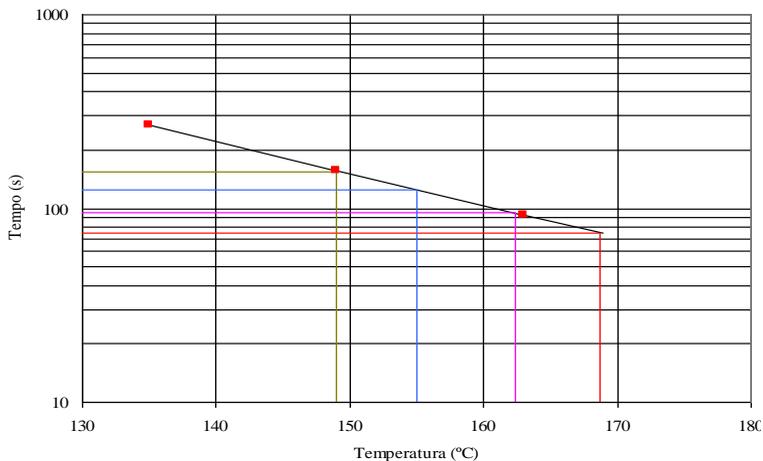


Figura 4.10 Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70 (LUBNOR). (BARRA, 2009)

4.3.4 Granulometria

A curva granulométrica adotada para as pesquisas de BARRA 2009 está descrita na tabela 4.7 e na figura 4.11.

Tabela 4.7 Composição das frações dos granulares da curva teórica CT2 (BARRA, 2009).

Peneiras	Abertura (mm)	Percentagem Passante (%)	Percentagem das frações dos grãos das Curvas Teóricas (%)
3/4"	19,1	100,0	-
1/2"	12,7	81,3	18,7
3/8"	9,50	70,1	11,1
Nº04	4,76	49,4	20,8
Nº10	2,20	33,4	16,1
Nº16	1,20	24,5	8,8
Nº30	0,6	17,2	7,3
Nº50	0,3	12,1	5,1
Nº100	0,15	8,5	3,6
Nº200	0,075	6,0	2,5
FUNDO	-	-	6,0

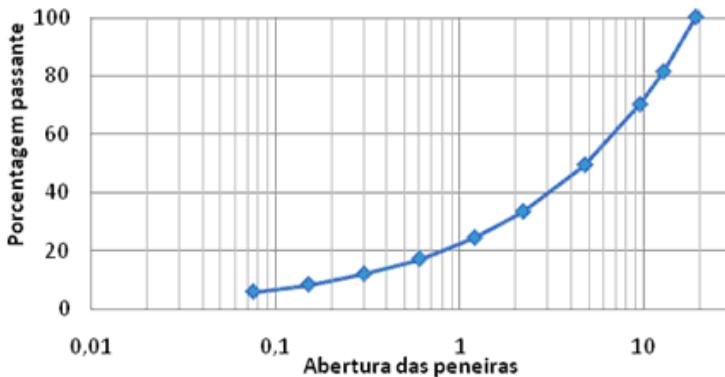


Figura 4.11 Curva granulométrica teórica usada na pesquisa (BARRA 2009)

4.4 MATERIAIS QUE FORAM USADOS PARA A ELABORAÇÃO DA BASE DE BRITA GRADUADA E REVESTIMENTO EM LABORATÓRIO

4.4.1 Brita graduada

A brita usada para esta etapa do trabalho foi do mesmo tipo usado por ASTRANA (2006) e por MOMM (1998) e está descrita no item 4.2.1. A curva granulométrica adotada para a camada de revestimento foi a usada na pesquisa de BARRA (2009) e é apresentada na tabela 4.7 e figura 4.11.

Para a estrutura do pavimento, foi escolhida uma espessura de 10 cm na camada de base e o material selecionado é a brita graduada simples, que é comumente usada no Brasil na construção de estradas. O material usado foi fornecido pela britadora SAIBRITA, que provê o material nos tamanhos brita 0, brita 1 e pó pedra, e tais materiais foram coletados seguindo a norma (DNER-PRO 120/97).

Segundo o manual de técnicas de pavimentação, a brita graduada simples é uma mistura de agregado previamente dosada, contendo inclusive material de enchimento e após a devida compactação oferece boas condições de resistência e distribuição de cargas. O agregado usado deve se enquadrar na especificação da tabela 4.8.

Tabela 4.8 Especificação para brita graduada simples. (Manual de técnicas de pavimentação)

Peneira (mm)	PORCENTAGEM QUE PASSA	
	Ømax=38,1mm	Ømax=44,5"
50,8	100	-
38,1	90-100	-
25,4	-	100
19,0	50-85	90-100
10	34-60	80-100
4,8	25-45	35-55
0,45	8-22	8-25
0,075	2-9	2-9

}

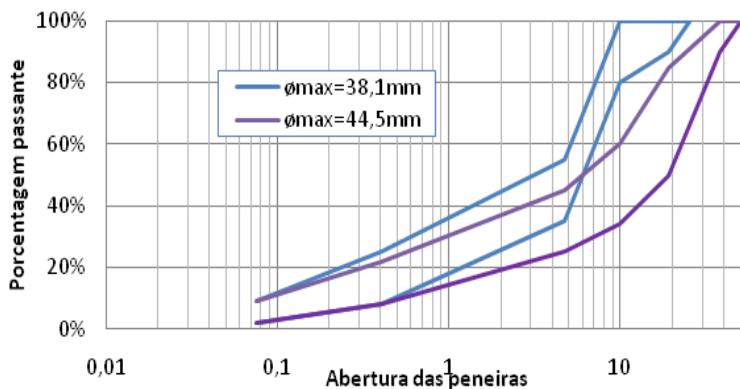


Figura 4.12 Especificação para brita graduada simples. (Manual de técnicas de pavimentação)

4.4.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) foi fornecido pela CBB ASFALTOS, com sede na cidade de Curitiba, estado de Paraná. As principais características do ligante asfáltico são apresentadas na tabela 4.8, assim como a curva da viscosidade que é apresentada na figura 4.12.

Tabela 4.9 Principais características do ligante betuminoso.

Ensaio	Resultados	
Massa Específica (g/cm ³)	1,02	
Ponto de Amolecimento Anel e Bola	49,2°C (mín 46,0°C)*	
Penetração (25°C)	50,8 (0,1mm) (mín 50,0 (0,1mm))*	
Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP)	-1,35 (-1,5 a + 0,7)*	
Viscosidade Saybolt-Furol	Temperatura (°C)	Tempo de Escoamento (s)
	131	260 (mín 141)*
	148	150 (mín 50)*
	161	101 (30 a 150 para 177°C)*

*Valores mínimos a serem atendidos, especificados nas respectivas normas.

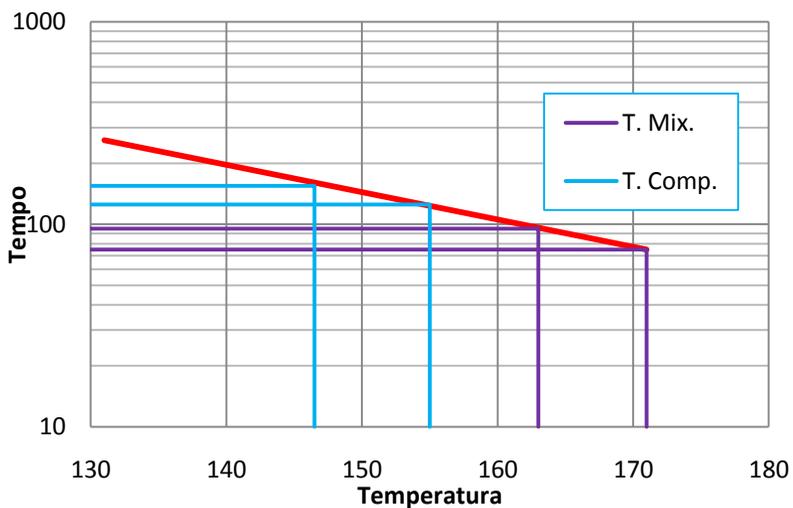


Figura 4.13 Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70

CAPÍTULO 5

PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO E RESULTADOS

Os procedimentos laboratoriais foram divididos em cinco grandes etapas para facilitar o entendimento da pesquisa:

- Provas iniciais;
- Ensaios pelo método direto;
- Ensaios pelo método indireto em placas;
- Ensaios pelo método indireto na estrutura de pavimento simulada e
- Ensaios de ultra-som no ligante e na rocha mãe

Cada uma delas é descrita nos itens seguintes.

5.1 PROVAS INICIAIS

Com o objetivo de conhecer o funcionamento do aparelho e adquirir prática referente a sua operação, foram feitos ensaios iniciais numa placa de concreto asfáltico moldada por ASTRANA (2006), a qual era feita de concreto asfáltico denso e cujos materiais constituintes foram detalhados no capítulo 4. Nesta placa foram aplicados os métodos direto (para a determinação da homogeneidade) e indireto (para a estimativa da espessura da camada de concreto asfáltico).

5.1.1 Ensaio de ultra-som pelo método direto

O ensaio de ultra-som pelo método direto foi usado para a estimativa da homogeneidade no corpo de prova de concreto asfáltico. O funcionamento básico do ensaio de ultra-som consiste em localizar os transdutores em cada uma das faces opostas de forma alinhada em cada placa de concreto asfáltico em posições fixas (figura 5.1).

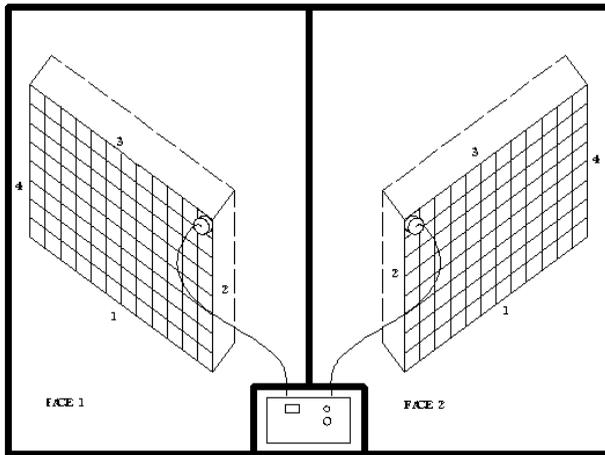


Figura 5.1 Malha feita no CP em cada face para medidas de Ultra-Som e esquema representativo do procedimento do ensaio.

Para fazer um posicionamento fixo dos transdutores, nas duas faces maiores da placa, foram feitas malhas. O espaçamento de cada malha dependeu do transdutor a ser usado durante o ensaio. Para os testes, foram usados dois tipos de transdutores; um de 54 kHz de 5 cm de diâmetro e outro de 200 kHz de 2 cm de diâmetro, por conseguinte, as magnitudes dos espaçamentos das malhas foram de 5 cm (figura 5.2) e de 2 cm (figura 5.3) respectivamente. A área sombreada na figura 5.3 é uma área que, devido às condições de borda, aos tipos de transdutores usados (200 kHz e 54 kHz) e ao comprimento de onda, não foi possível a aquisição de dados. As malhas foram traçadas com o uso de giz de cera, fato que resultou inadequado devido a malha poder se apagar com o uso do acoplante e, no momento de fazer pressão sobre o ponto de medição, o transdutor pode se movimentar, aumentando a margem de erro do ensaio causado pelo aumento na distância entre os transdutores, o que influencia diretamente na velocidade da onda, a qual diminui.

O aparelho usado para a medição da velocidade da onda (PUNDIT 6.0) oferece como resultado os tempos de percurso de onda. Com o tempo de percurso e a distância percorrida pelo pulso (distância entre os transdutores), pode se obter a velocidade média da onda em determinado ponto. Para este ensaio em particular, foi adotada uma

espessura média, obtida pela média das espessuras em cada uma das faces laterais da placa (tabela 5.1).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A												
B												
C												
D												
E												
F												
G												
H												

Figura 5.2 Malha feita cada 5 cm no CP para medidas de Ultra-Som com o transdutor de 54 KHz



Figura 5.3 Malha feita cada 2 cm no CP para medidas de Ultra-Som com o transdutor de 200 KHz

Tabela 5.1 Tabela de espessuras das faces da placa de concreto asfáltico feita por ASTRANA (2006)

Face	Espessura (cm)		
	1	11,2	11,1
2	11,3	11,2	11,2
3	11,3	11,3	11,2
4	11,2	11,3	11
Media:		11,2	

O primeiro ensaio realizado foi com o transdutor de 54 kHz e após um período de repouso foi feito o ensaio com o transdutor de 200 kHz (figura 5.4), fato que deu tempo de reação da vaselina com o CAP, e após este período foi evidenciado o dano ocasionado pela reação da vaselina no ligante. Então, para o ensaio com o uso do transdutor de 200 kHz, foi impossível a tomada de leituras em alguns pontos devido ao grau de afetação do CAP, no momento do ensaio. O dano era muito avançado, o que impossibilitava a leitura do tempo de percurso de onda pelo aparelho, devido ao mau contato entre o transdutor e a amostra.

Os resultados para os tempos de percurso de onda com o transdutor de 54 kHz são apresentados na tabela 5.2, e os resultados para o transdutor de 200 kHz são mostrados no anexo A.



Figura 5.4 Procedimento para o ensaio do método direto com ultra-som com o transdutor de 200 kHz

Da experiência adquirida na realização deste teste, verificou-se que o uso da vaselina é contra-indicado para concretos asfálticos. Então, nos testes definitivos nas placas a serem ensaiadas, a fadiga e a módulo, vai ser utilizada a bentonita misturada com água.

Verificou-se também que a forma utilizada para o posicionamento dos transdutores induz a erro de localização. Para melhorar e fixar melhor o posicionamento, foi projetado e construído um gabarito (figura 5.8).

Tabela 5.2 Tempos de percurso de onda na placa de ASTRANA (2006) com o transdutor de 54 KHz.

Tempos de percurso da onda (micro segundo)								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	40,80	41,50	37,00	40,10	38,50	41,00	40,10	45,20
2	40,90	41,40	37,90	40,70	43,60	41,10	44,10	44,50
3	40,00	39,70	38,40	37,80	39,60	43,40	47,20	43,20
4	43,70	40,50	39,60	40,70	38,60	42,50	40,80	45,90
5	42,80	39,00	40,80	44,60	44,50	42,00	39,80	45,30
6	44,60	37,90	39,10	42,90	44,40	41,40	39,00	43,60
7	40,90	40,10	39,30	42,10	45,60	43,70	39,00	42,20
8	42,70	37,10	38,80	40,60	41,40	40,30	42,00	43,40
9	41,30	37,90	40,80	39,90	41,50	38,70	41,80	41,30
10	41,80	38,50	40,60	38,30	39,30	38,00	41,20	41,00
11	44,50	42,80	39,40	40,90	45,50	43,00	42,00	42,70
12	40,40	47,20	41,80	43,20	41,00	45,50	44,20	43,20

5.1.2 Ensaio de ultra-som pelo método indireto

Para a realização do ensaio, foram feitos os testes com a placa localizada sobre uma superfície de madeira, e os transdutores foram localizados com o uso da malha feita para os transdutores de 54 kHz e 200 kHz para o ensaio de ultra-som pelo método direto (figura 5.2 e figura 5.3), foram feitas leituras sobre a placa cada 5 cm em cada um dos posicionamentos deixando fixo o transdutor emissor e movimentando o transdutor receptor (figura 5.5).

Então um material com maior grau de compactação (mais denso e com menor percentagem de vazios) vai apresentar uma velocidade de onda maior e por conseguinte o ensaio de ultra som pelo método indireto poderia permitir estimar se o grau de compactação alcançado no campo é o ideal para evitar que misturas compactadas de forma irregular possam ser aceitas.

Além do transdutor de 54 kHz, também foi feita a tentativa de uso do transdutor de 200 kHz, mas não se conseguiu obter medições de tempo de onda devido a que a superfície de contato do corpo de prova apresentava sérios danos ocasionados pela reação do CAP com a vaselina, o que afetava diretamente o enlace transdutor – corpo de prova.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A												
B												
C												
D												
E		T	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	10
F												
G												
H												

T = Transmissor
R = Receptor

Figura 5.5 Localização dos transdutores para o ensaio de Ultra-Som (transdutor de 54 KHz)

Durante o teste, procurou-se usar a parte média da placa, a fim de evitar a influência da borda nas leituras e os resultados obtidos para a placa feita por ASTRANA (2006) pelo método do ultra-som apresentados na tabela 5.3.

5.2 ENSAIOS DE ULTRA-SOM PELO MÉTODO DIRETO

O posicionamento dos transdutores no ensaio de ultra-som pelo método direto é um localizado na frente do outro, ou seja, um transdutor localizado numa face e outra na face oposta do corpo de prova. Durante a realização dos ensaios, era necessário um posicionamento fixo dos transdutores nestas duas faces. Para tal fim, o gabarito cumpria esta função de maneira simples e segura, permitindo

exercer pressão sobre os transdutores no momento das leituras. O gabarito foi construído para um espaçamento entre leituras de dois centímetros tanto na direção horizontal como na direção vertical. (figura 5.6).

Tabela 5.3 Tempos de percurso de onda pelo método indireto (transdutor de 200 kHz).

Ponto	Distancia	Tempo (µs)
1	5	10,1
2	10	39,7
3	15	91
4	20	118,5
5	25	131,4
6	30	196,4
7	35	361,1
8	40	407,2
9	45	441,3
10	50	521,3

O gabarito, além de ajudar com a medição das leituras dos tempos de onda de ultra-som, facilitou a medição das espessuras em toda a superfície do corpo de prova. O procedimento para a tomada de espessuras é muito simples (figura 5.10).}



Figura 5.6 Gabarito utilizado para a localização dos transdutores nos ensaios de ultra-som pelo modo de transmissão direto.

Como pode ser observado na figura 5.7, o valor da espessura é igual à distância $D1$ (fixa) menos a distância $D2$ (determinável com a ajuda do paquímetro).

Com o intuito de aumentar a precisão do ensaio e diminuir a margem de erro, foi avaliada a heterogeneidade da superfície da placa que poderia influenciar nas medidas das espessuras. Para tal objetivo, foram realizadas 3 medições por ponto de medida de ultra-som, utilizando o gabarito construído e um paquímetro para trabalhar com maior exatidão. Uma vez que o diâmetro do transdutor é maior que o espaçamento de 2 cm (intervalo de medidas do gabarito), trabalhou-se com o valor médio da espessura obtida durante as medições na área abrangida pelo transdutor de 54 kHz, cujo diâmetro é de 5 cm. Este procedimento foi adotado para cada uma das 10 placas da amostra, das quais 5 placas com pó de brita (CTB) e 5 placas com pó calcário (CTBPC).

Para melhorar o contato entre o equipamento e a placa de concreto asfáltico, foi utilizada uma pasta preparada com bentonita.



Figura 5.7 Gabarito utilizado para a medição das espessuras das placas de concreto asfálticos.

Durante os ensaios, foi utilizado o transdutor de 54 kHz, por ser este o mais recomendado pela literatura e o aparelho usado para a medição dos tempos de propagação da onda foi o PUNDIT 6.0.

Este procedimento foi seguido para cada placa, as 5 placas com brita (CTB) e as 5 placas com pó calcário (CTBPC). As espessuras de trabalho para o teste de cada uma delas estão apresentadas no anexo B e os tempos de percurso da onda ultra-sônica estão apresentados no anexo C.

Após a medição das espessuras e dos tempos de percurso da onda, procedeu-se ao processo de corte das placas, identificando os corpos de prova trapezoidais e medição das densidades e porcentagens de vazios.

O resumo dos resultados obtidos pode ser observado na tabela 5.4.

Tabela 5.4 Resumo resultados % de vazios e Densidade aparente para placa CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	DENS. APA.	%V	PLACA	C.P.	DENS. APA	%V
CTB1	1.1	2,256	8,46	CTB2	1.1	2,385	3,20
	1.2	2,282	7,38		1.2	2,345	4,83
	1.3	2,273	7,74		1.3	2,356	4,37
	1.4	2,282	7,37		1.4	2,360	4,22
	1.5	2,327	5,55		1.5	2,342	4,94
	1.6	2,325	5,65		1.6	2,358	4,28
	1.7	2,330	5,43		1.7	2,339	5,06
	1.8	2,381	3,38		1.8	2,354	4,47
	1.9	2,305	6,43		1.9	2,330	5,42
	1.10	2,327	5,56		1.10	2,329	5,49
	1.11	2,282	7,40		1.11	2,312	6,19
	1.12	2,280	7,48		1.12	2,318	5,93
	1.13	2,364	4,07		1.13	2,301	6,63
	1.14	2,360	4,24		1.14	2,239	9,12
	1.15	2,365	4,00		1.15	2,335	5,22
	1.16	2,355	4,41		1.16	2,328	5,52
	1.17	2,336	5,18		1.17	2,363	4,08
	1.18	2,322	5,74		1.18	2,360	4,22
	1.19	2,315	6,04		1.19	2,352	4,55
	1.20	2,320	5,86		1.20	2,356	4,40

Tabela 5.4 Resumo resultados % de vazios e Densidade aparente para placa CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	DDENS. APAR.	%%V.	PLACA	C.P.	DDENS. APAR.	%%V.
CTB3	1.1	2,253	8,57	CTB4	1.1	2,259	8,32
	1.2	2,296	6,80		1.2	2,327	5,56
	1.3	2,297	6,79		1.3	2,336	5,21
	1.4	2,342	4,97		1.4	2,346	4,81
	1.5	2,354	4,46		1.5	2,365	4,03
	1.6	2,348	4,69		1.6	2,282	7,39
	1.7	2,361	4,17		1.7	2,340	5,03
	1.8	2,365	4,01		1.8	2,365	4,03
	1.9	2,313	6,12		1.9	2,352	4,54
	1.10	2,314	6,10		1.10	2,348	4,72
	1.10A	2,273	7,75		1.10A	2,341	4,99
	1.11	2,318	5,93		1.11	2,236	9,25
	1.12	2,317	5,97		1.12	2,292	7,00
	1.13	2,351	4,61		1.13	2,287	7,18
	1.14	2,344	4,85		1.14	2,313	6,13
	1.15	2,314	6,10		1.15	2,216	10,07
	1.16	2,338	5,13		1.16	2,274	7,73
	1.17	2,329	5,48		1.17	2,288	7,15
	1.18	2,321	5,80		1.18	2,283	7,37
	1.19	2,356	4,40		1.19	2,276	7,65
1.20	2,335	5,22	1.20	2,257	8,41		
1.20A	2,320	5,83	1.20A	2,251	8,65		

Tabela 5.4 Resumo resultados % de vazios e Densidade aparente para placa CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	DENSIDADE APARENTE	%V.	PLACA	C.P.	DENS. APAR.	%V
CTBPC1	1.1	2,314	6,09	CTBPC2	1.1	2,314	6,10
	1.2	2,350	4,64		1.2	2,335	5,24
	1.3	2,370	3,82		1.3	2,389	3,05
	1.4	2,390	3,02		1.4	2,364	4,06
	1.5	2,383	3,29		1.5	2,381	3,35
	1.6	2,367	3,93		1.6	2,351	4,60
	1.7	2,385	3,23		1.7	2,399	2,64
	1.8	2,342	4,96		1.8	2,398	2,67
	1.9	2,364	4,08		1.9	2,370	3,82
	1.10	2,359	4,25		1.10	2,322	5,76
	1.11	2,352	4,56		1.11	2,342	4,94
	1.12	2,380	3,40		1.12	2,365	4,01
	1.13	2,401	2,57		1.13	2,419	1,83
	1.14	2,378	3,51		1.14	2,398	2,66
	1.15	2,412	2,12		1.15	2,414	2,03
	1.16	2,392	2,92		1.16	2,432	1,29
	1.17	2,373	3,69		1.17	2,383	3,27
	1.18	2,389	3,05		1.18	2,400	2,60
	1.19	2,385	3,19		1.19	2,393	2,89
	1.20	2,374	3,64		1.20	2,406	2,37

Tabela 5.4 Resumo resultados % de vazios e Densidade aparente para placa CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	DENS. APAR.	%%V.	PLACA	C.P.	DDENS. AAPAR.	%%V
CTB5	1.1	2,298	6,73	CTBPC3	1.1	2,344	4,89
	1.2	2,320	5,83		1.2	2,366	4,00
	1.3	2,344	4,88		1.3	2,380	3,41
	1.4	2,329	5,46		1.4	2,373	3,68
	1.5	2,334	5,27		1.5	2,353	4,50
	1.6	2,343	4,91		1.6	2,355	4,44
	1.7	2,335	5,23		1.7	2,358	4,28
	1.8	2,336	5,18		1.8	2,372	3,75
	1.9	2,351	4,60		1.9	2,384	3,23
	1.10	2,348	4,72		1.10	2,385	3,20
	1.10A	2,286	7,23		1.10A	2,317	5,95
	1.11	2,312	6,18		1.11	2,383	3,30
	1.12	2,316	6,01		1.12	2,378	3,49
	1.13	2,317	5,97		1.13	2,378	3,51
	1.14	2,318	5,93		1.14	2,397	2,72
	1.15	2,319	5,89		1.15	2,378	3,50
	1.16	2,330	5,45		1.16	2,393	2,88
	1.17	2,326	5,60		1.17	2,385	3,21
	1.18	2,327	5,54		1.18	2,407	2,32
	1.19	2,320	5,84		1.19	2,376	3,58
1.20	2,299	6,68	1.20	2,384	3,24		
1.20A	2,312	6,16	1.20A	2,377	3,52		

Tabela 5.4 Resumo resultados % de vazios e Densidade aparente para placa CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	DENS. APAR.	%V.	PLACA	C.P.	DENS. APAR.	%V
CTBPC4	1.1	2,326	5,60	CTBPC5	1.1	2,275	7,67
	1.2	2,427	1,50		1.2	2,336	5,22
	1.3	2,356	4,37		1.3	2,345	4,84
	1.4	2,368	3,91		1.4	2,343	4,90
	1.5	2,366	3,96		1.5	2,333	5,32
	1.6	2,364	4,07		1.6	2,334	5,26
	1.7	2,386	3,16		1.7	2,337	5,17
	1.8	2,374	3,65		1.8	2,347	4,76
	1.9	2,373	3,70		1.9	2,325	5,62
	1.10	2,374	3,65		1.10	2,335	5,23
	1.10A	2,3173	5,95		1.10A	2,371	3,76
	1.11	2,3828	3,30		1.11	2,288	7,13
	1.12	2,3780	3,49		1.12	2,320	5,85
	1.13	2,3775	3,51		1.13	2,304	6,51
	1.14	2,3971	2,72		1.14	2,343	4,93
	1.15	2,3777	3,50		1.15	2,329	5,48
	1.16	2,3930	2,88		1.16	2,352	4,56
	1.17	2,3849	3,21		1.17	2,348	4,69
	1.18	2,4069	2,32		1.18	2,350	4,64
	1.19	2,3758	3,58		1.19	2,365	4,01
1.20	2,3843	3,24	1.20	2,366	3,97		
1.20A	2,3742	3,65	1.20A	2,337	5,17		

5.3 ENSAIOS PELO MÉTODO INDIRETO EM PLACAS DE CAMADAS SUPERPOSTAS

Os corpos de prova que foram usados na pesquisa foram compactados em duas camadas, sendo uma camada de concreto asfáltico denso com uma espessura de 6 cm e outra de concreto asfáltico drenante de 4 cm (tabela 5.5).

As placas foram compactadas de acordo com a norma francesa AFNOR P-98-250-2 para misturas de concreto asfáltico para camadas de superfície, ou seja, revestimentos. A energia de compactação utilizada foi a forte. Na tabela 5.5 estão apresentadas as configurações dos corpos de prova.

Para a realização dos ensaios de ultra-som pelo método indireto, a superfície do corpo de prova deve garantir um bom contato entre os transdutores e o material. Devido às condições de irregularidade da superfície existentes nos corpos de prova, houve a necessidade de adequá-la com o auxílio de um material acoplante, de modo a melhorar o contato com os transdutores.

Em campo, a camada de concreto asfáltico drenante está localizada diretamente na superfície, por isso foi a primeira a ser ensaiada nas placas existentes. Foi estudada a possibilidade de aplicar uma fina camada de gesso na superfície, porém acabou sendo descartado porque poderia obstruir os vazios do concreto asfáltico drenante.

O trabalho foi realizado com o equipamento de ultra-som PUNDIT 6, no modo de transmissão indireta. A calibração do aparelho foi realizada usando uma barra de metal de referência como é recomendado pelo fabricante, cada vez que o aparelho era ligado.

Os testes de ultra-som pelo método indireto não produziram bons resultados devido às condições irregulares da superfície das camadas drenantes, que dificultava a obtenção de medidas estáveis para os tempos de propagação, utilizando transdutores de 54 kHz ou 200 kHz.

Tabela 5.5 Corpos de prova de concreto asfáltico, espessuras das camadas e materiais de mistura (ASTRANA, 2006)

CORPOS DE PROVA			Espessura da camada (cm)	Ligante	D. máx dos granulares (mm)
1	Camada superior:	Drenante	4	CAP-50/70 4% SBS	12,5
	Camada inferior:	Densa	6	CAP-50/70	12,5
2	Camada superior:	Drenante	4	CAP-50/70 4% SBS	12,5
	Camada inferior:	Densa	6	CAP-50/70 4% SBS	12,5
3	Camada superior:	Drenante	4	AMB	12,5
	Camada inferior:	Densa	6	CAP-50/70	12,5
4	Camada superior:	Drenante	4	CAP-50/70 4% SBS	9,5
	Camada inferior:	Densa	6	CAP-50/70	12,5
5	Camada superior:	Drenante	4	CAP-50/70 4% SBS	9,5
	Camada inferior:	Densa	6	CAP-50/70 4% SBS	12,5
6	Camada superior:	Drenante	4	AMB	9,5
	Camada inferior:	Densa	6	CAP-50/70	12,5

Ainda que no campo as camadas de concreto asfáltico fiquem diretamente na superfície da estrada, após as tentativas na obtenção de resultados para as camadas de concreto asfáltico drenante e com o intuito de aproveitar ao máximo os recursos, foram realizados os ensaios de ultra-som pelo modo de transmissão indireta sobre a camada de concreto asfáltico denso em cada uma das placas (figura 5.10).

Para melhorar as condições de superfície das placas sobre as camadas de concreto asfáltico denso, foi inicialmente aplicada uma fina camada de gesso. Como material acoplante, neste caso foi usada a vaselina, pois esta seria aplicada diretamente sobre a camada de gesso e não diretamente sobre o concreto asfáltico (figura 5.8).



Figura 5.8 Processo de ensaio pelo método indireto

Os resultados encontrados para estes ensaios estão apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 Resultados do ensaio de ultra-som pelo método indireto em placas de camadas superpostas.

Pto.	DIST.	TEMPOS DE PERCURSO DA ONDA (µs)					
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
1	2,5	17,2	5,7	21,4	12,2	10,6	12,2
2	3	18	7,4	23,6	14,1	12,2	14,4
3	3,5	19,3	9,5	25,2	17,6	15	17
4	4	21,9	11,3	26,7	19,6	17,4	18,7
5	4,5	24,5	17,7	38	20	19,2	19,8
6	5	26,5	23,3	39,4	22,5	21,5	21,6
7	5,5	28,8	26,5	41,4	28,9	23,3	23,4
8	6	30,4	27,3	42	29,8	26,2	26,1
9	6,5	34,2	30,7	43,8	33,8	28,1	27,9
10	7	35,5	32,6	46,2	36,6	29,9	30,2
11	7,5	38,7	39,2	48,6	39	33,1	38,1
12	8	45,7	42,5	51	40,3	39,4	42,2
13	8,5	47,4	45,2	53,2	42,6	41,1	44,2
14	9	48,7	47,6	59,8	45,1	43,2	45,6
15	9,5	50,9	53,4	62,7	52,2	45,3	51,3
16	10	53,5	57,5	74,4	52,5	50,6	52,8
17	10,5	55,7	59,2	76,2	58,9	52,2	54,6
18	11	57,4	62,5	79,9	59,8	55	56,4
19	11,5	58,7	65,2	88,7	63,8	57,4	59,1
20	12	60,9	67,6	89,8	66,6	59,2	60,9
21	12,5	63,5	73,4	93,3	69	61,5	63,2
22	13	65,7	77,5	94,3	70,3	63,3	63,2
23	13,5	67,4	79,2	98,6	72,6	66,2	65,4
24	14	68,7	82,5	102,1	75,1	68,1	68
25	14,5	70,9	85,2	105,8	79,2	69,9	69,7
26	15	73,5	87,6	110,2	82,5	80,6	70,8
27	15,5		93,4	113,7	85,9	82,2	72,6
28	16		97,5		89,8		

5.4 ENSAIOS PELO MÉTODO INDIRETO NA ESTRUTURA DE PAVIMENTO SIMULADA

Com o intuito de simular o mais próximo possível as condições de campo para o ensaio de ultra-som, foi construída com o uso da compactadora de placas uma estrutura composta de uma camada de concreto asfáltico de 5 cm de espessura e uma camada de base de 10 cm.

Para o melhor entendimento o procedimento laboratorial está dividido em duas etapas:

- Etapa construtiva e
- Bateria de ensaios de Ultra-som

5.4.1 Etapa construtiva

Para a estrutura do pavimento, foi escolhida uma espessura de 10 cm na camada de base e o material selecionado é a brita graduada simples. A granulometria do material tem que estar encaixada na faixa estabelecida na tabela 4.8. O material usado foi coletado seguindo a norma DNR-PRO 120/97, nos tamanhos brita 0, brita 1 e pó de pedra.

A fim de encaixar a brita graduada simples dentro da faixa estabelecida, foi feita a granulometria em cada um dos tamanhos, os resultados desta granulometria estão apresentados na tabela 5.7 e, na figura 5.9, foi aplicado o método Rothfuchs para a determinação dos pesos de cada um dos tamanhos e a curva granulométrica resultante está mostrada na figura 5.10.

Tabela 5.7 Granulometria dos materiais usados na Brita Graduada Simples (BGS)

Peneiras	Brita 1		Brita 0		Pó	
	% RET. A	% PAS.	% RET. A	% PAS.	% RET. A	% PAS.
3/4	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3/8	93,25%	6,75%	2,66%	97,34%	0,00%	100,00%
4	98,58%	1,42%	79,96%	20,04%	12,50%	87,50%
40	99,03%	0,97%	95,70%	4,30%	73,15%	26,85%
80	99,25%	0,75%	97,30%	2,70%	84,48%	15,52%
200	99,48%	0,52%	98,53%	1,47%	93,55%	6,45%
Fundo	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%

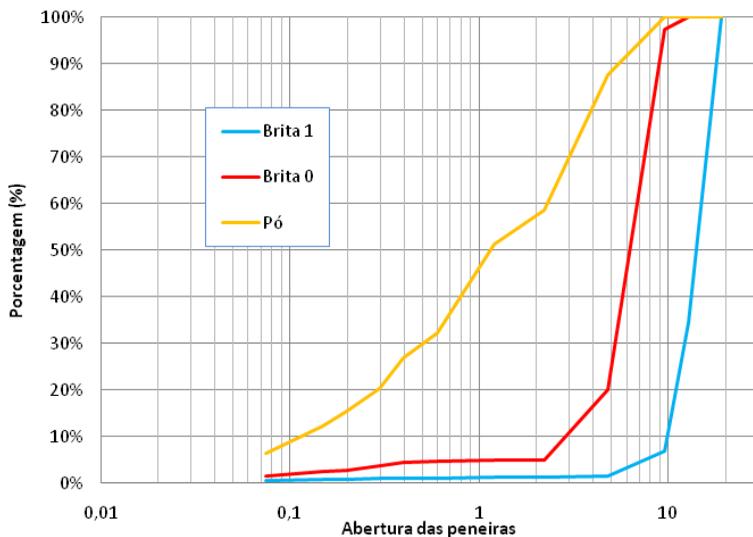


Figura 5.9 Granulometria dos materiais usados na Brita Graduada Simples (BGS)

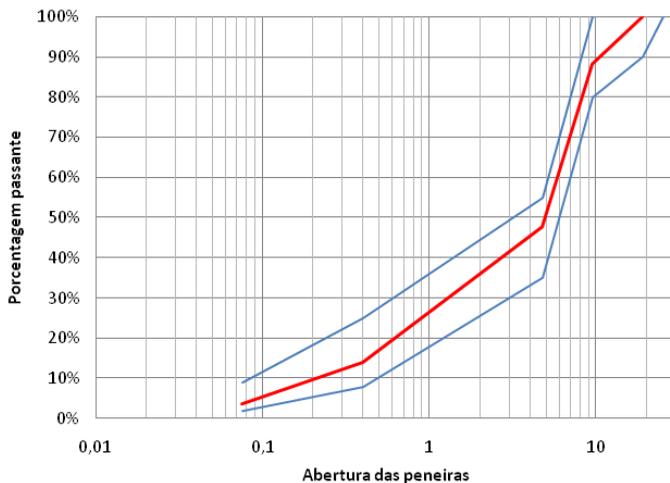


Figura 5.10 Granulometria dos materiais usados na Brita Graduada Simples (BGS)

Para a determinação da umidade ótima na brita graduada simples, foi realizado o ensaio de Proctor modificado, obtendo como

resultado uma umidade de 6,6%, o gráfico correspondente ao ensaio está apresentado na figura 5.11.

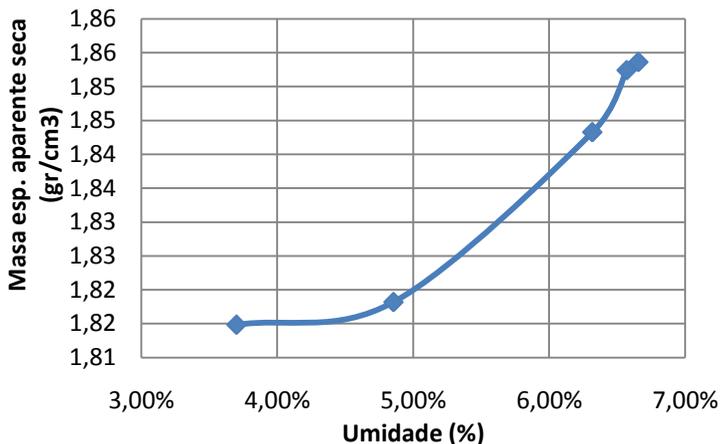


Figura 5.11 Gráfico para a determinação da umidade ótima.

Com o intuito de evitar qualquer interferência do metal (por possuir uma velocidade da onda muito maior à velocidade do concreto e da brita graduada simples), foi construído um molde em madeira para a realização do processo de construção da estrutura (figura 5.13).

Ainda que o processo de compactação da camada de brita graduada simples no campo seja feito com um rolo compactador vibratório a esta ação, no laboratório foi realizada a compactação na máquina compactadora de placa seguindo o mesmo procedimento das misturas asfálticas descrito na norma francesa AFNOR NF T 98-250-2. Para evitar o espalhamento do material, utilizou-se uma placa em madeira sobre a qual foi exercida a pressão de compactação. É importante mencionar que esta máquina não foi produzida para este tipo de atividades e não aplica nenhuma vibração ao processo de compactação (figura 5.12).

Após a compactação da camada de brita graduada, procede-se à aplicação do CM-30. Após o repouso necessário, foi realizada a compactação da camada de concreto asfáltico denso.



Figura 5.12 Processo de compactação da brita graduada simples

5.4.2 Bateria de ensaios de ultra-som pelo método indireto

Terminado o processo construtivo da estrutura, uma camada de gesso fina foi aplicada sobre a superfície sobre a qual são feitas as medições de tempo de percurso de onda ultra-sônica pelo método indireto. O aparelho usado para esta seqüência de ensaios é o PUNDIT PLUS. Este processo está mostrado na figura 5.13.



Figura 5.13 Camada de gesso fina aplicada sobre o revestimento

Os resultados obtidos nos testes realizados estão apresentados na tabela 5.8.

5.5 ENSAIOS DE ULTRA-SOM NO LIGANTE E NA ROCHA MÃE

Estes ensaios foram realizados com a finalidade de avaliar o comportamento da onda nos materiais usados no trabalho.

Tabela 5.8 Tempos de percurso para o ensaio de ultra-som pelo modo de propagação indireto

Distancia	Tempo μ s	Distancia	Tempo μ s
1	11,7	13	45,7
2	14,9	14	49,1
3	18,1	15	51
4	19,9	16	54,6
5	23,6	17	57,3
6	27,9	18	60,2
7	29,2	19	63,9
8	33,2	20	65,3
9	34,5	21	69,2
10	38,2	22	71,5
11	40,7	23	74,3
12	42,6	24	77,1
		25	80,6

O acoplante utilizado para o ensaio de ultra-som pelo método direto para a rocha foi a vaselina e o aparelho usado foi o PUNDIT PLUS. Na figura 5.14, é apresentado este procedimento.



Figura 5.14 Ensaio de ultra-som na rocha mãe.

Na realização do ensaio de ultra-som no ligante, deve-se ter em conta a temperatura da amostra na qual foi feito o teste, em razão de que o cimento asfáltico de petróleo é um material termo-suscetível. A temperatura durante o teste foi de 18º C. (figura 5.15).



Figura 5.15 Ensaio de ultra-som no ligante.

Os resultados obtidos para a rocha mãe e para o ligante estão apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 Tempos de percurso de onda para a rocha mãe e o ligante asfáltico

Rocha mãe		Ligante asfáltico	
Espessura	Tempo	Espessura	Tempo
90,43	16,8	12,2 cm	61,9
79,98	15,9		
78,00	15,1		

CAPÍTULO 6

EXPLORAÇÃO DE RESULTADOS

Assim como no capítulo 5 o procedimento é discriminado em várias etapas, para a exploração dos resultados vai ser aplicado o mesmo tipo de procedimento. Neste capítulo, são estudadas várias alternativas de análise possíveis para cada um dos casos onde o ensaio de ultra-som foi aplicado.

6.1 PROVAS INICIAIS

Estes ensaios foram realizados com o objetivo de conhecer o funcionamento do aparelho e adquirir experiência e perícia prática no referente na sua operação. Nesta placa, foram aplicados os modos de transmissão direto e indireto.

6.1.1 Modo de transmissão direto

O primeiro passo para a exploração dos resultados é a determinação da velocidade da onda com o uso do tempo de percurso obtido no ensaio e a espessura média da placa, substituindo os dados na equação 2.2. Este procedimento foi seguido para os dois transdutores (54 kHz e 200 kHz). A tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para a placa de concreto asfáltico denso compactada por ASTRANA (2006) com o transdutor de 54 kHz e os resultados para o transdutor de 200 kHz estão demonstrados no anexo A.

A dispersão dos resultados foi determinada pela média, desvio padrão e coeficiente de variação (Tabela 6.2)

Após o cálculo das velocidades da onda e com a finalidade de localizar as coordenadas das velocidades de onda no corpo de prova, estas foram assumidas no centróide de cada quadrícula do gabarito (figura 6.1). Estabeleceu-se uma origem com coordenadas 0,0 e a partir destas foram obtidas as demais coordenadas para as respectivas velocidades de percurso da onda ultra-sônica. Este procedimento é o mesmo aplicado para as placas da pesquisa CTB e CTBPC

Tabela 6.1 Velocidades de onda com o transdutor de 54 kHz.

Pto.	Velocidade (Km/seg.)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,64	3,71	3,30	3,58	3,44	3,66	3,58	4,04
2	3,65	3,70	3,38	3,63	3,89	3,67	3,94	3,97
3	3,57	3,54	3,43	3,38	3,54	3,88	4,21	3,86
4	3,90	3,62	3,54	3,63	3,45	3,79	3,64	4,10
5	3,82	3,48	3,64	3,98	3,97	3,75	3,55	4,04
6	3,98	3,38	3,49	3,83	3,96	3,70	3,48	3,89
7	3,65	3,58	3,51	3,76	4,07	3,90	3,48	3,77
8	3,81	3,31	3,46	3,63	3,70	3,60	3,75	3,88
9	3,69	3,38	3,64	3,56	3,71	3,46	3,73	3,69
10	3,73	3,44	3,63	3,42	3,51	3,39	3,68	3,66
11	3,97	3,82	3,52	3,65	4,06	3,84	3,75	3,81
12	3,61	4,21	3,73	3,86	3,66	4,06	3,95	3,86

Tabela 6.2 Medidas de dispersão comparativas dos transdutores para o ensaio

Parâmetro	Transdutor de 54 kHz.	Transdutor de 200 kHz.
Média	3,70	3,69
Desvio Padrão	0,21	0,13
Coefficiente de variação	5,63%	3,59%

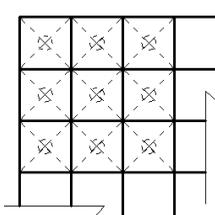


Figura 6.1 Esquema de localização de coordenadas dos tempos e das velocidades no corpo de prova

Assumindo que as variações no corpo de prova irão acontecer de forma gradual, procurou-se generalizar o comportamento da onda ultra-sônica obtendo-se curvas de igual velocidade de propagação. Para isso, foi utilizado um programa de topografia que usa as coordenadas dos pontos e suas cotas, representadas pelos valores das velocidades, para gerar curvas de nível (Figura 6.2).

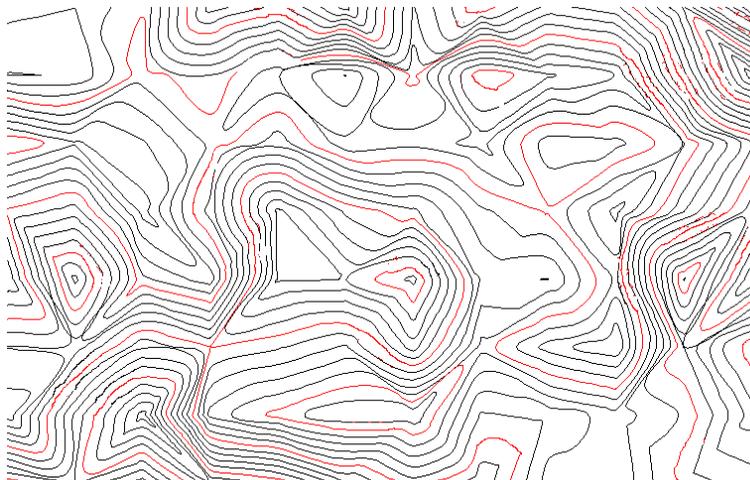


Figura 6.2 Curvas de igual tempo geradas no CP para o transdutor de 54KHz.

A grande vantagem deste processo é que, devido ao fato de conhecer a localização de cada um dos corpos de prova trapezoidais na placa inicial, mediante cortes nos gráficos realizados, pode-se estimar a velocidade média ultra-sônica para cada um deles.

Pode-se observar o comportamento da onda ultra-sônica em qualquer posição no corpo de prova, além de permitir a análise ao longo de qualquer corte (figura 6.2). Na mesma forma, foi construída uma malha a qual usa faces em três dimensões (figura 6,3), com a finalidade de observar de maneira mais simples o comportamento da onda no corpo de prova. Este procedimento foi seguido neste ensaio para os dois transdutores e para cada uma das placas estudadas com o ensaio de ultra-som pelo modo de propagação direto.

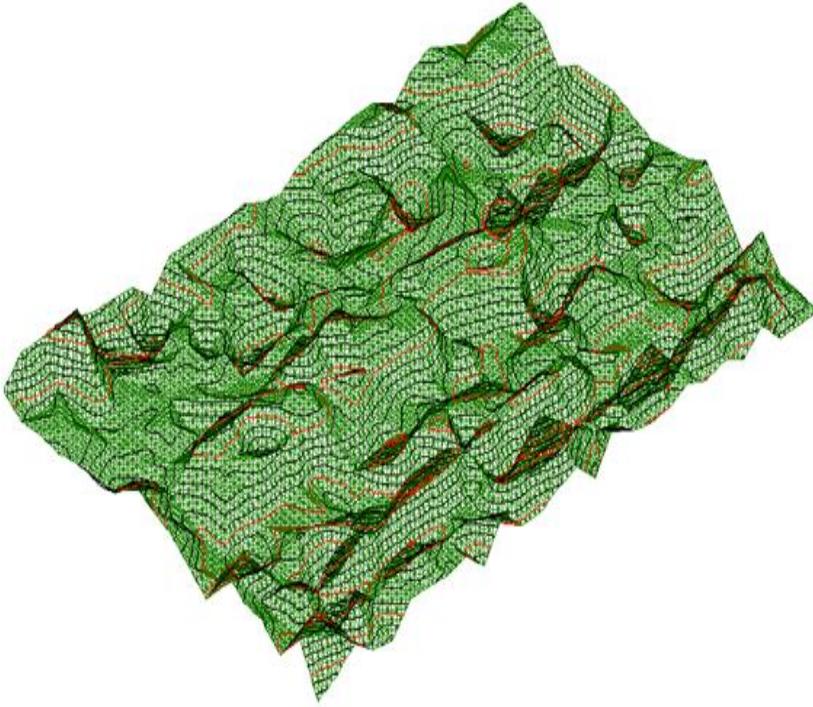


Figura 6.3 Vista isométrica da tramóia gerada para as curvas de igual velocidade no corpo de prova para o transdutor de 200 KHz.

Este procedimento permite, além de visualizar facilmente o comportamento da onda no corpo de prova, estabelecer intervalos de velocidade para discriminar zonas na placa de concreto asfáltico, o que vai ser aplicado neste estudo às placas compactadas por BARRA (2009) na sua pesquisa.

6.1.2 Modo de transmissão indireto

Com o uso dos resultados obtidos do tempo de percurso da onda ultra-sônica pelo modo de propagação indireto, foi feito o gráfico de tempo vs. distância para a obtenção da velocidade da onda (Figura 6.4).

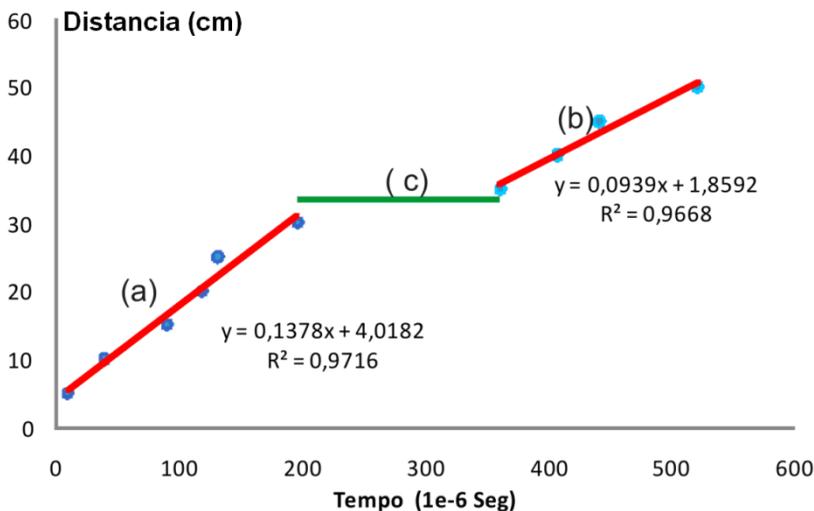


Figura 6.4 Gráfico Tempo vs. distância com o ensaio de ultra-som pelo método indireto com o transdutor de 54 kHz.

A velocidade da onda na placa determinada pelo ensaio de ultra-som pelo modo de propagação direto é de 0,802 Km /seg.

No gráfico, distinguem-se dois segmentos (a e b) que tem praticamente a mesma inclinação tendo em conta como foram feitas as medições (distância entre leituras, condições de superfície, etc.) com um segmento intercalado (c), que indica a presença de um defeito no material. Este fenômeno pode evidenciar a presença de vazios ou de excesso de ligante.

6.2 ENSAIOS DE ULTRA-SOM PELO MÉTODO DIRETO

O procedimento usado durante esta etapa do trabalho foi descrito no item 6.1.1 e foi realizado para as placas elaboradas por BARRA 2009 na sua pesquisa (5 placas de CTB e 5 placas de CTBPC).

No anexo D estão apresentadas cada uma das velocidades obtidas para as placas e as coordenadas de localização para cada um dos pontos. A tabela 6.3 apresenta um resumo dos valores obtidos para cada uma delas, assim como uma análise estatística.

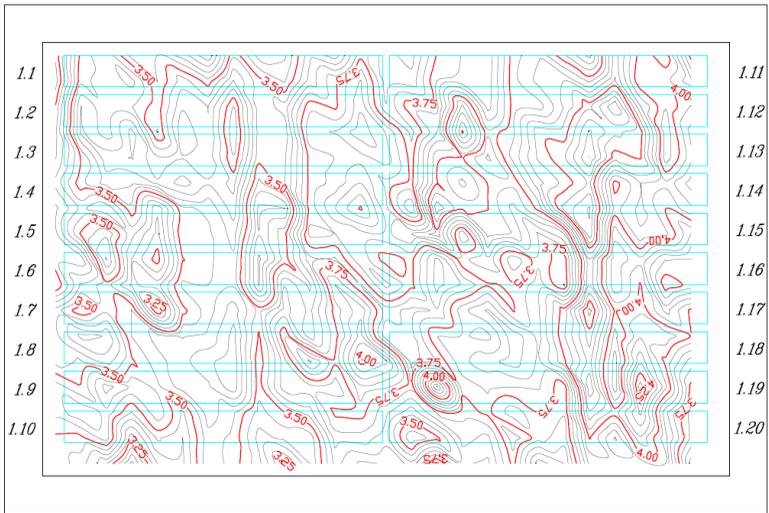
Tabela 6.3 Resumo dos valores médios das velocidades obtidas para cada placa.

PLACA	VEL. (km/seg.)	Desv. Pad.	C. V.	PLACA	VEL. (km/seg.)	Desv. Pad.	C. V.
CTB1	3,73	0,26	6,97%	CTBPC1	3,79	0,11	2,99%
CTB2	3,27	0,16	5,02%	CTBPC2	3,64	0,12	3,35%
CTB3	3,33	0,13	3,81%	CTBPC3	3,37	0,08	2,40%
CTB4	3,35	0,14	4,20%	CTBPC4	3,45	0,11	3,14%
CTB5	3,29	0,12	3,64%	CTBPC5	3,33	0,13	3,87%
MÉDIA	3,39	0,24	7,11%	MÉDIA	3,51	0,21	5,85%

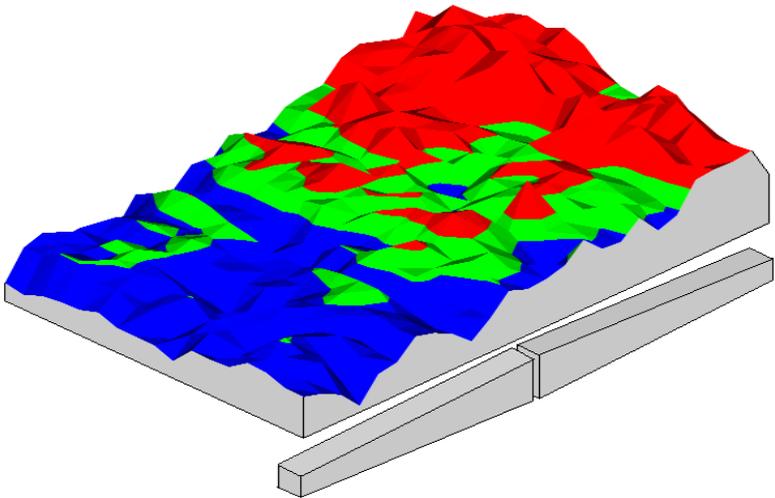
Após a realização dos testes, é realizada a localização das velocidades obtidas em cada uma das placas nas coordenadas especificadas no anexo D. Com estas velocidades, são estabelecidas as curvas de igual velocidade e com estas é construída a malha em três dimensões.

Com a finalidade de classificar as velocidades em intervalos, a média de cada uma das placas é estabelecida como parâmetro inicial e tendo em conta uma margem de $\pm 2,5\%$ é construído o intervalo médio identificado com a cor verde. Todas as velocidades acima deste intervalo estão identificadas com a cor vermelha e as velocidades embaixo deste intervalo com a cor azul (tabela 6.4).

As curvas de igual velocidade e o gráfico isométrico foram elaboradas para todas as placas com a finalidade de visualizar os intervalos da média dos materiais e os valores que excedem os limites (CTB1-figura 6.5, CTB2-figura 6.6, CTB3-figura 6.7, CTB4-figura 6.8, CTB5-figura 6.9, CTBPC1-figura 6.10, CTBPC2-figura 6.11, CTBPC3-figura 6.12, CTBPC4-figura 6.13, CTBPC5-figura 6.14).

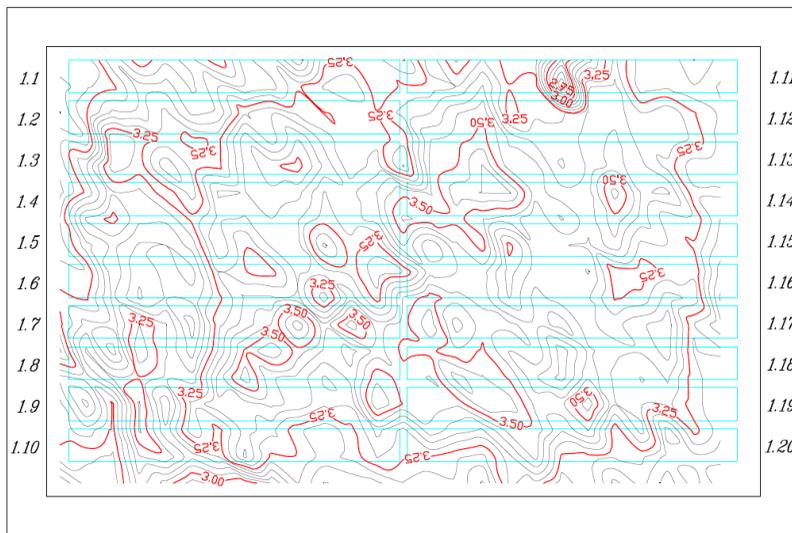


(a)

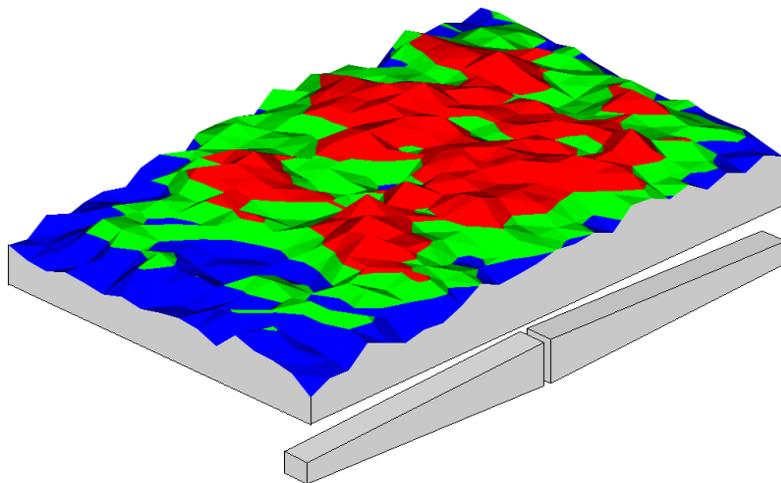


(b)

Figura 6.5 Visualização da placa CTB1 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

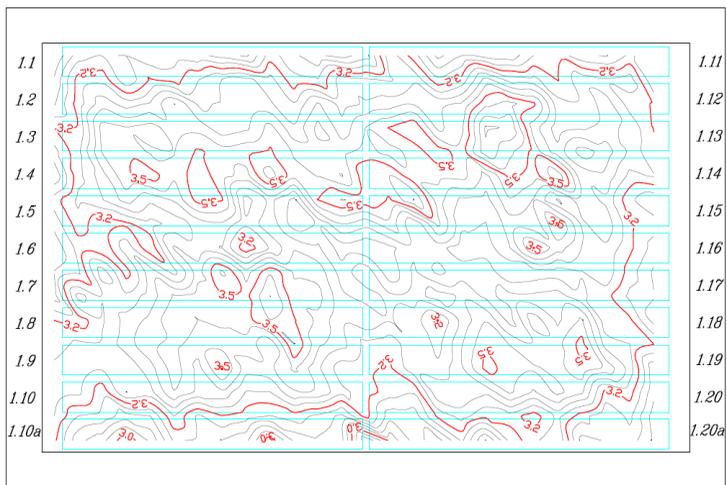


(a)

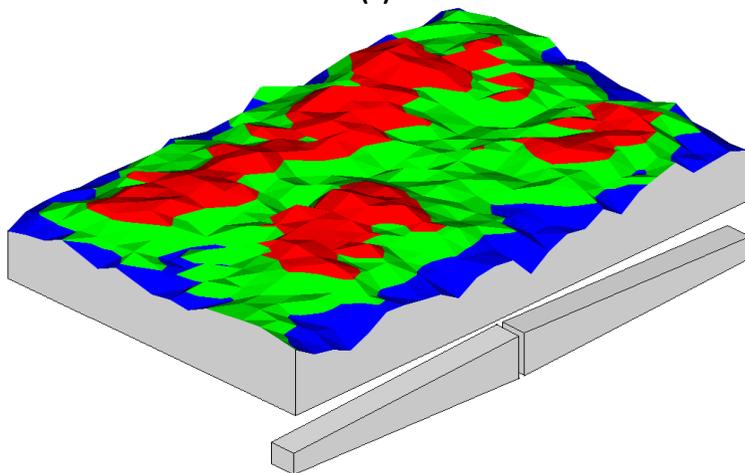


(b)

Figura 6.6 Visualização da placa CTB2 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

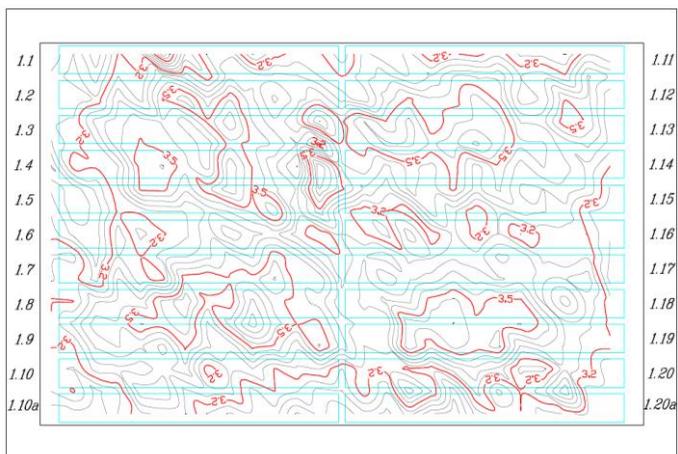


(a)

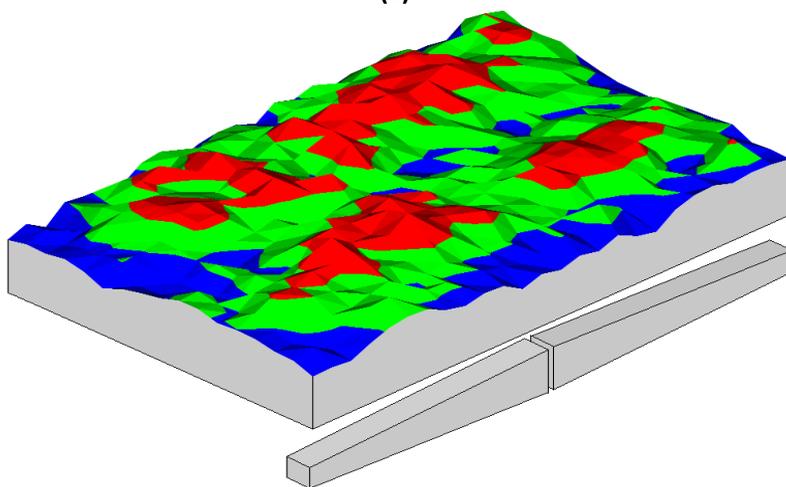


(b)

Figura 6.7 Visualização da placa CTB3 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

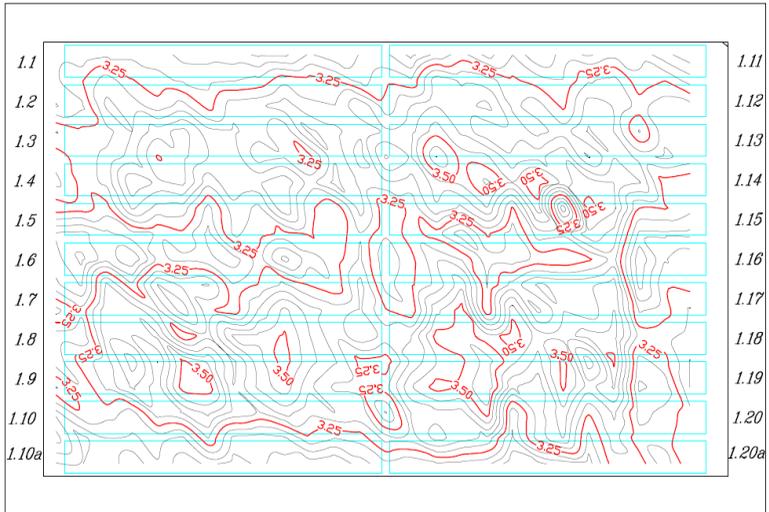


(a)

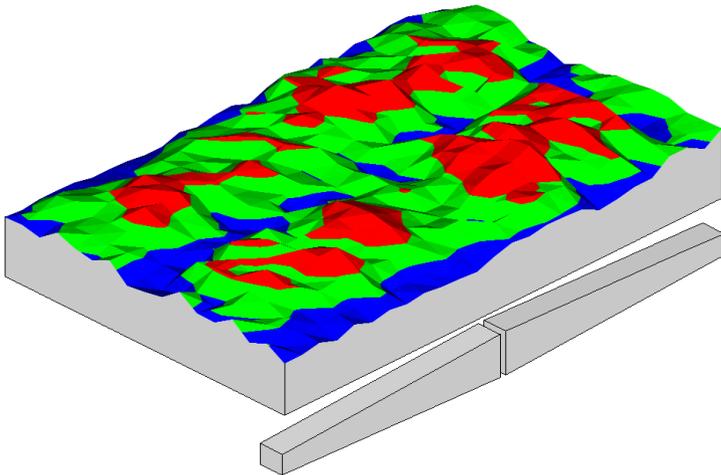


(b)

Figura 6.8 Visualização da placa CTB4 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

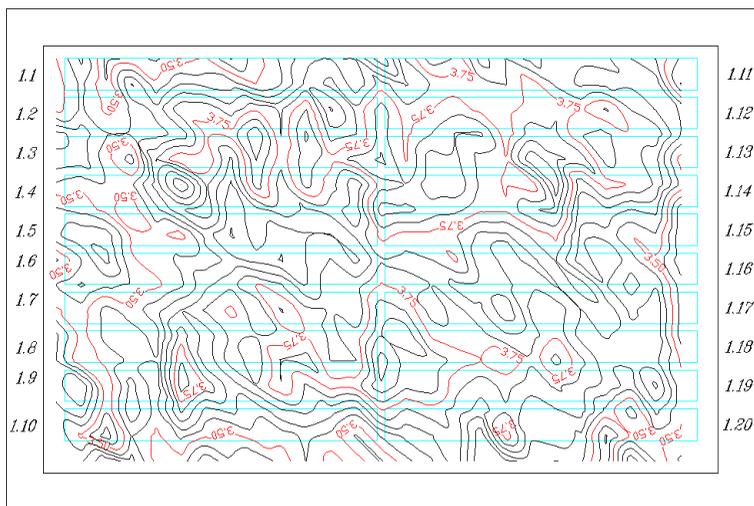


(a)

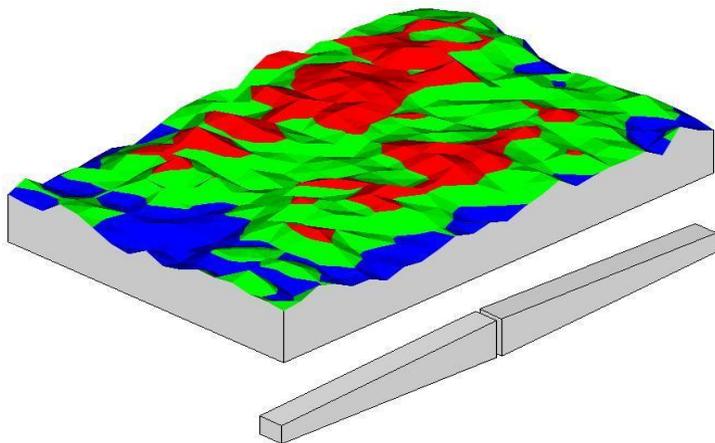


(b)

Figura 6.9 Visualização da placa CTB5 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

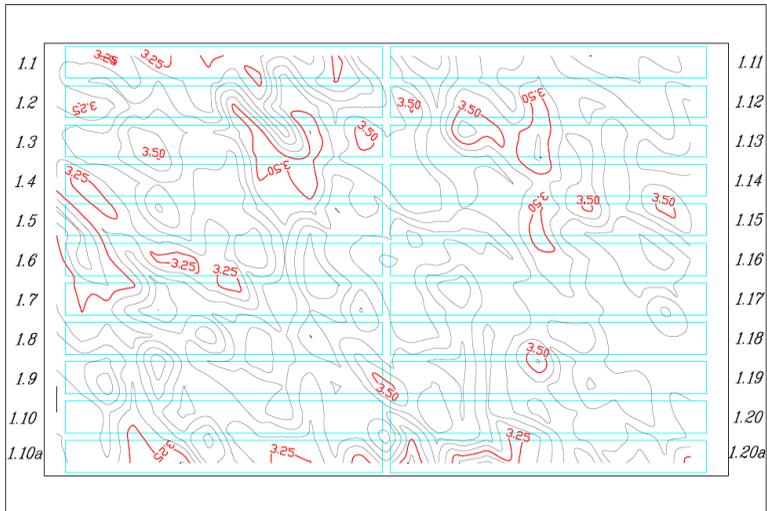


(a)

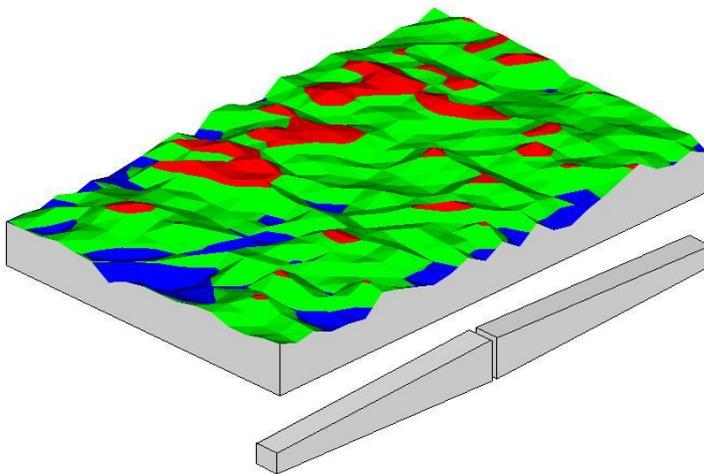


(b)

Figura 6.11 Visualização da placa CTBPC2 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

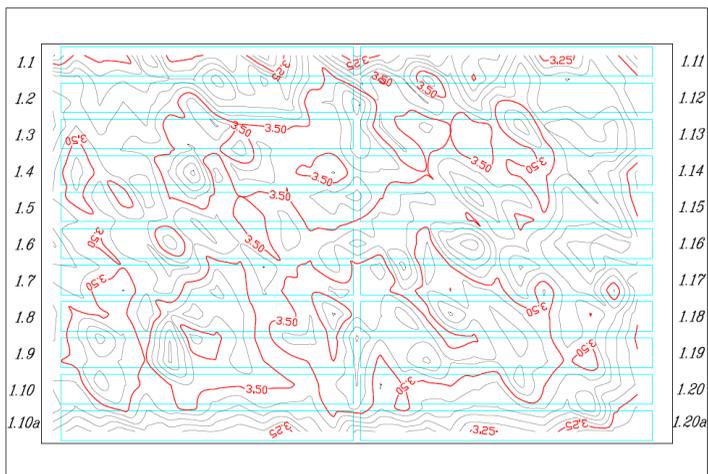


(a)

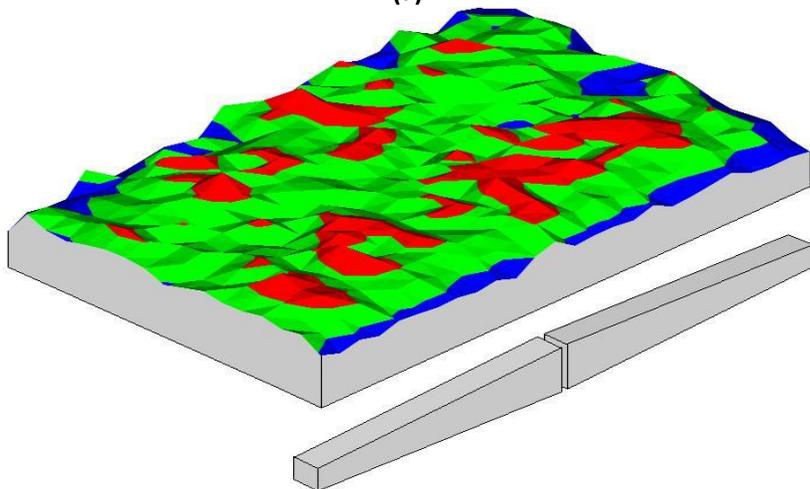


(b)

Figura 6.12 Visualização da placa CTBPC3 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

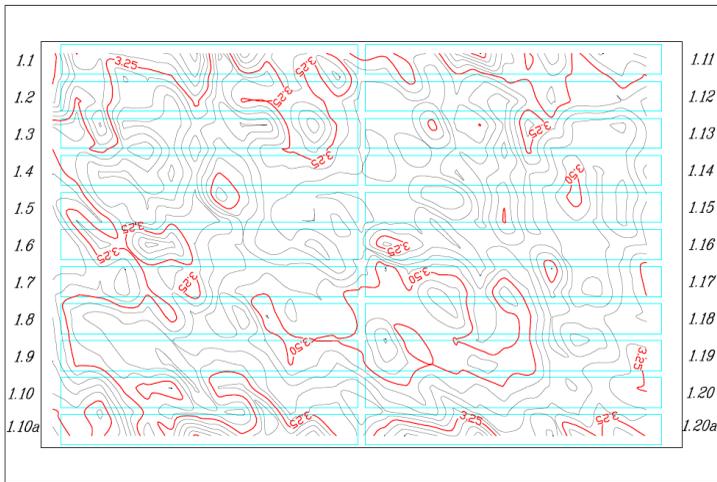


(a)

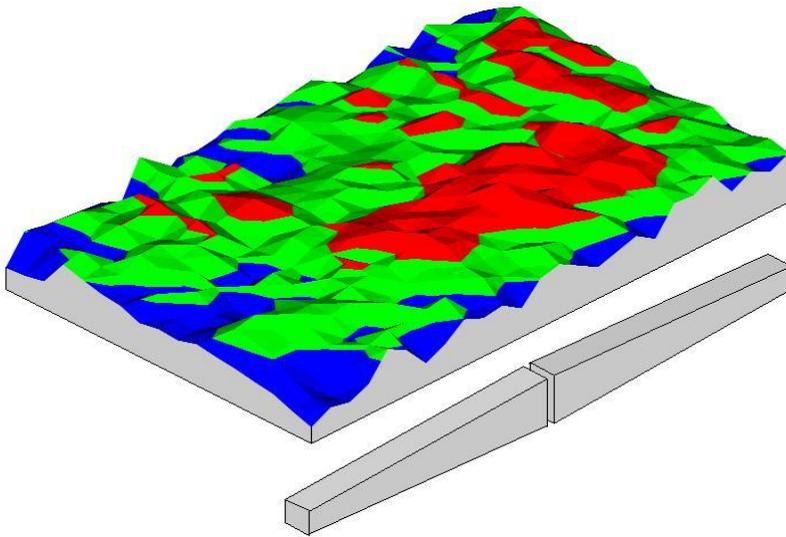


(b)

Figura 6.13 Visualização da placa CTBPC4 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.



(a)



(b)

Figura 6.14 Visualização da placa CTBPC5 (a) Esquema de localização dos corpos de prova e curvas de iso-velocidade. (b) Isométrico de velocidades.

Tabela 6.4 Intervalos de velocidades para cada uma das placas estudadas

PLACA	VEL. (km/seg.)	INTERVALO		PLACA	VEL. (km/seg.)	INTERVALO	
		SUP	INF			SUP	INF
CTB1	3,73	3,82	3,64	CTBPC1	3,79	3,88	3,70
CTB2	3,27	3,35	3,19	CTBPC2	3,64	3,73	3,55
CTB3	3,33	3,41	3,25	CTBPC3	3,37	3,45	3,29
CTB4	3,35	3,43	3,27	CTBPC4	3,45	3,54	3,36
CTB5	3,29	3,37	3,21	CTBPC5	3,33	3,41	3,25

A área para cada um destes intervalos de velocidade pode ser usada para a identificação da homogeneidade da placa, bem como expressar a área em porcentagem da placa (tabela 6.5).

Tabela 6.5 Áreas encontradas em cada um dos intervalos para as placas estudadas.

Int.	Área (%)									
	CTB 1	CTB 2	CTB 3	CTB 4	CTB 5	CTBPC 1	CTBPC 2	CTBPC 3	CTBPC 4	CTBPC 5
Inf	37,9	23,5	17	21	18,9	14,1	19,6	9,5	12,5	15,1
Med	27,6	40,7	53,7	53,3	56	67,8	56,5	78,3	68,5	58,2
Sup	34,5	35,8	29,3	25,7	25,1	18,2	24	12,3	19,1	24,7

Após o corte das placas e após o período de repouso determinado por norma, as densidades, as porcentagens de vazios e as dimensões foram determinadas nos corpos de prova trapezoidais finais.

Com a construção de curvas de igual velocidade e a localização de cada corpo de prova trapezoidal na placa, pode-se estimar a velocidade média da onda ultra-sônica para cada um usando cortes nestes gráficos. Dois dos 212 cortes realizados para cada um dos corpos

de prova trapezoidais para cada uma das placas de origem analisadas exemplificam o procedimento. (figura 6.15)

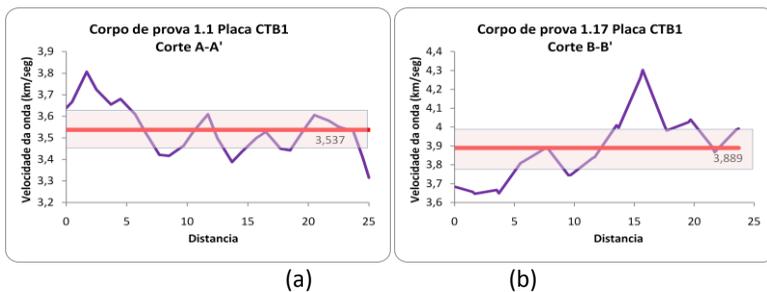


Figura 6.15. Cortes de velocidades nos CP 1,1 (a) e 1,17 (b) da placa CTB1.

Por este procedimento, determinam-se as velocidades médias para os corpos de prova (tabela 6.6)

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTB1	1.1	8,46	3,54	0,11	3,22%
	1.2	7,38	3,65	0,13	3,55%
	1.3	7,74	3,67	0,14	3,73%
	1.4	7,37	3,64	0,15	4,14%
	1.5	5,55	3,57	0,18	5,14%
	1.6	5,65	3,52	0,17	4,91%
	1.7	5,43	3,58	0,16	4,46%
	1.8	3,38	3,62	0,18	4,90%
	1.9	6,43	3,64	0,10	2,78%
	1.10	5,56	3,54	0,11	2,97%
	1.11	7,40	3,91	0,17	4,29%
	1.12	7,48	4,03	0,21	5,28%
	1.13	4,07	4,08	0,19	4,70%
	1.14	4,24	4,04	0,16	3,96%
	1.15	4,00	3,97	0,16	3,97%
	1.16	4,41	3,80	0,12	3,22%
	1.17	5,18	3,89	0,18	4,51%
	1.18	5,74	3,90	0,16	3,99%
	1.19	6,04	3,92	0,22	5,52%
	1.20	5,86	3,77	0,18	4,87%

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTB2	1.1	3,20	3,12	0,11	3,55%
	1.2	4,83	3,20	0,11	3,54%
	1.3	4,37	3,27	0,13	4,06%
	1.4	4,22	3,29	0,13	3,97%
	1.5	4,94	3,24	0,12	3,83%
	1.6	4,28	3,19	0,12	3,84%
	1.7	5,06	3,31	0,18	5,46%
	1.8	4,47	3,31	0,16	4,92%
	1.9	5,42	3,31	0,16	4,86%
	1.10	5,49	3,20	0,12	3,70%
	1.11	6,19	3,21	0,12	3,70%
	1.12	5,93	3,34	0,08	2,38%
	1.13	6,63	3,36	0,12	3,51%
	1.14	9,12	3,43	0,11	3,28%
	1.15	5,22	3,35	0,11	3,22%
	1.16	5,52	3,32	0,10	3,16%
	1.17	4,08	3,38	0,13	3,70%
	1.18	4,22	3,39	0,11	3,14%
	1.19	4,55	3,42	0,13	3,87%
	1.20	4,40	3,27	0,10	3,00%

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTB3	1.1	8,57	3,43	0,03	0,90%
	1.2	6,80	3,58	0,05	1,33%
	1.3	6,79	3,67	0,06	1,59%
	1.4	4,97	3,70	0,09	2,47%
	1.5	4,46	3,61	0,08	2,11%
	1.6	4,69	3,54	0,08	2,31%
	1.7	4,17	3,64	0,09	2,58%
	1.8	4,01	3,66	0,09	2,47%
	1.9	6,12	3,63	0,06	1,79%
	1.10	6,10	3,56	0,05	1,41%
	1.10A	7,75	3,36	0,08	2,41%
	1.11	5,93	3,46	0,05	1,49%
	1.12	5,97	3,62	0,08	2,31%
	1.13	4,61	3,70	0,10	2,77%
	1.14	4,85	3,69	0,09	2,38%
	1.15	6,10	3,62	0,09	2,37%
	1.16	5,13	3,57	0,08	2,28%
	1.17	5,48	3,56	0,06	1,67%
	1.18	5,80	3,60	0,09	2,40%
	1.19	4,40	3,62	0,10	2,79%
1.20	5,22	3,56	0,09	2,58%	
1.20A	5,83	3,41	0,09	2,54%	

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTB4	1.1	8,32	3,22	0,09	2,95%
	1.2	5,56	3,36	0,11	3,37%
	1.3	5,21	3,43	0,10	3,01%
	1.4	4,81	3,42	0,15	4,25%
	1.5	4,03	3,36	0,15	4,50%
	1.6	7,39	3,26	0,08	2,51%
	1.7	5,03	3,38	0,11	3,30%
	1.8	4,03	3,47	0,11	3,23%
	1.9	4,54	3,44	0,09	2,53%
	1.10	4,72	3,29	0,06	1,92%
	1.10A	4,99	3,19	0,08	2,60%
	1.11	9,25	3,27	0,05	1,51%
	1.12	7,00	3,41	0,09	2,52%
	1.13	7,18	3,51	0,08	2,27%
	1.14	6,13	3,43	0,07	2,10%
	1.15	10,07	3,34	0,06	1,83%
	1.16	7,73	3,25	0,06	1,85%
	1.17	7,15	3,33	0,06	1,66%
	1.18	7,37	3,43	0,09	2,76%
	1.19	7,65	3,43	0,11	3,21%
1.20	8,41	3,26	0,06	1,71%	
1.20A	8,65	3,18	0,06	2,00%	

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTB5	1.1	6,73	3,17	0,03	0,88%
	1.2	5,83	3,29	0,05	1,62%
	1.3	4,88	3,35	0,06	1,84%
	1.4	5,46	3,37	0,07	2,11%
	1.5	5,27	3,26	0,06	1,69%
	1.6	4,91	3,16	0,07	2,37%
	1.7	5,23	3,30	0,07	1,98%
	1.8	5,18	3,35	0,10	2,94%
	1.9	4,60	3,36	0,10	2,83%
	1.10	4,72	3,28	0,06	1,98%
	1.10A	7,23	3,12	0,03	1,07%
	1.11	6,18	3,18	0,04	1,25%
	1.12	6,01	3,32	0,05	1,42%
	1.13	5,97	3,37	0,06	1,84%
	1.14	5,93	3,41	0,10	2,92%
	1.15	5,89	3,29	0,09	2,76%
	1.16	5,45	3,22	0,07	2,30%
	1.17	5,60	3,32	0,09	2,84%
	1.18	5,54	3,42	0,09	2,62%
	1.19	5,84	3,39	0,12	3,44%
1.20	6,68	3,31	0,10	2,90%	
1.20A	6,16	3,21	0,06	1,82%	

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTBPC1	1.1	6,09	3,73	0,10	2,55%
	1.2	4,64	3,73	0,07	1,93%
	1.3	3,82	3,76	0,09	2,34%
	1.4	3,02	3,82	0,10	2,53%
	1.5	3,29	3,75	0,08	2,20%
	1.6	3,93	3,73	0,08	2,07%
	1.7	3,23	3,76	0,09	2,35%
	1.8	4,96	3,83	0,05	1,21%
	1.9	4,08	3,85	0,08	2,12%
	1.10	4,25	3,77	0,08	2,23%
	1.11	4,56	3,75	0,07	1,80%
	1.12	3,40	3,83	0,09	2,45%
	1.13	2,57	3,85	0,10	2,53%
	1.14	3,51	3,84	0,11	2,88%
	1.15	2,12	3,80	0,08	1,98%
	1.16	2,92	3,79	0,08	2,15%
	1.17	3,69	3,82	0,12	3,05%
	1.18	3,05	3,86	0,09	2,35%
	1.19	3,19	3,85	0,07	1,90%
	1.20	3,64	3,80	0,07	1,73%

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTBPC2	1.1	6,10	3,56	0,07	1,98%
	1.2	5,24	3,66	0,10	2,64%
	1.3	3,05	3,71	0,11	2,97%
	1.4	4,06	3,64	0,10	2,65%
	1.5	3,35	3,56	0,10	2,91%
	1.6	4,60	3,56	0,09	2,54%
	1.7	2,64	3,64	0,10	2,81%
	1.8	2,67	3,66	0,10	2,81%
	1.9	3,82	3,69	0,11	3,06%
	1.10	5,76	3,55	0,05	1,30%
	1.11	4,94	3,66	0,08	2,28%
	1.12	4,01	3,74	0,05	1,45%
	1.13	1,83	3,77	0,10	2,57%
	1.14	2,66	3,76	0,10	2,53%
	1.15	2,03	3,65	0,12	3,18%
	1.16	1,29	3,63	0,08	2,26%
	1.17	3,27	3,66	0,09	2,53%
	1.18	2,60	3,71	0,10	2,66%
	1.19	2,89	3,70	0,09	2,35%
	1.20	2,37	3,61	0,08	2,23%

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTBPC3	1.1	4,89	3,30	0,06	1,72%
	1.2	4,00	3,36	0,07	2,11%
	1.3	3,41	3,43	0,06	1,77%
	1.4	3,68	3,38	0,09	2,64%
	1.5	4,50	3,34	0,08	2,41%
	1.6	4,44	3,28	0,08	2,33%
	1.7	4,28	3,34	0,06	1,76%
	1.8	3,75	3,35	0,06	1,81%
	1.9	3,23	3,39	0,05	1,56%
	1.10	3,20	3,34	0,04	1,19%
	1.10A	5,95	3,30	0,06	1,85%
	1.11	3,30	3,37	0,05	1,39%
	1.12	3,49	3,43	0,05	1,51%
	1.13	3,51	3,45	0,05	1,49%
	1.14	2,72	3,43	0,04	1,13%
	1.15	3,50	3,41	0,05	1,35%
	1.16	2,88	3,36	0,06	1,86%
	1.17	3,21	3,39	0,04	1,18%
	1.18	2,32	3,40	0,05	1,39%
	1.19	3,58	3,41	0,04	1,05%
1.20	3,24	3,39	0,04	1,17%	
1.20A	3,52	3,31	0,08	2,28%	

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	%V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTBPC4	1.1	5,60	3,30	0,06	1,72%
	1.2	1,50	3,36	0,07	2,11%
	1.3	4,37	3,43	0,06	1,77%
	1.4	3,91	3,38	0,09	2,64%
	1.5	3,96	3,34	0,08	2,41%
	1.6	4,07	3,28	0,08	2,33%
	1.7	3,16	3,34	0,06	1,76%
	1.8	3,65	3,35	0,06	1,81%
	1.9	3,70	3,39	0,05	1,56%
	1.10	3,65	3,34	0,04	1,19%
	1.10A	5,95	3,30	0,06	1,85%
	1.11	3,30	3,37	0,05	1,39%
	1.12	3,49	3,43	0,05	1,51%
	1.13	3,51	3,45	0,05	1,49%
	1.14	2,72	3,43	0,04	1,13%
	1.15	3,50	3,41	0,05	1,35%
	1.16	2,88	3,36	0,06	1,86%
	1.17	3,21	3,39	0,04	1,18%
	1.18	2,32	3,40	0,05	1,39%
	1.19	3,58	3,41	0,04	1,05%
1.20	3,24	3,39	0,04	1,17%	
1.20A	3,65	3,31	0,08	2,28%	

Tabela 6.6 Resumo de velocidades nos CP das placas CTB e CTBPC

PLACA	C.P.	V.	Velocidade		
			Média (Km/s)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
CTBPC5	1.1	2,275	3,20	0,08	2,60%
	1.2	2,336	3,27	0,07	2,21%
	1.3	2,345	3,31	0,10	2,90%
	1.4	2,343	3,36	0,07	1,94%
	1.5	2,333	3,35	0,08	2,30%
	1.6	2,334	3,27	0,11	3,26%
	1.7	2,337	3,33	0,12	3,59%
	1.8	2,347	3,39	0,09	2,72%
	1.9	2,325	3,37	0,09	2,54%
	1.10	2,335	3,25	0,11	3,27%
	1.10A	2,371	3,16	0,11	3,53%
	1.11	2,288	3,20	0,08	2,43%
	1.12	2,320	3,32	0,06	1,76%
	1.13	2,304	3,37	0,07	2,11%
	1.14	2,343	3,37	0,05	1,63%
	1.15	2,329	3,41	0,05	1,43%
	1.16	2,352	3,35	0,07	2,15%
	1.17	2,348	3,43	0,09	2,73%
	1.18	2,350	3,45	0,10	2,80%
	1.19	2,365	3,46	0,10	2,89%
1.20	2,366	3,39	0,07	1,94%	
1.20A	2,337	3,25	0,08	2,42%	

Após estimar as velocidades da onda em cada um dos corpos de prova trapezoidais, tentou-se então estabelecer alguma correlação entre os dados de velocidade da onda ultra-sônica na placa inicial e as porcentagens de vazios dos corpos de prova trapezoidais.

É importante lembrar que a velocidade da onda é tirada na placa que dá origem aos corpos de prova trapezoidais, o que quer dizer que a onda percorre por material adicional além do corpo de prova. Então, a velocidade da onda média medida na placa também inclui material que vai ser descartado durante os cortes. A figura 6.16 mostra esquematicamente como foi feita a medição e exemplifica dois corpos de prova. A faixa sombreada com a cor azul apresenta a faixa de cobertura dos transdutores durante as medições.

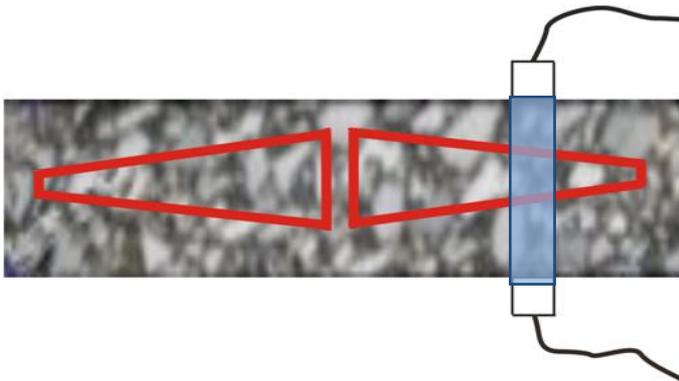


Figura 6.16 Representação da medição direta na placa.

Foram estabelecidas correlações para cada placa em particular e também grupal, separando as placas segundo o seu conteúdo (CTB e CTBPC). A figura 6.17 apresenta a correlação velocidade da onda vs. porcentagem de vazios nas placas CTB e a figura 6.18 e a figura 6.19 apresentam os gráficos das placas CTB e CTBPC.

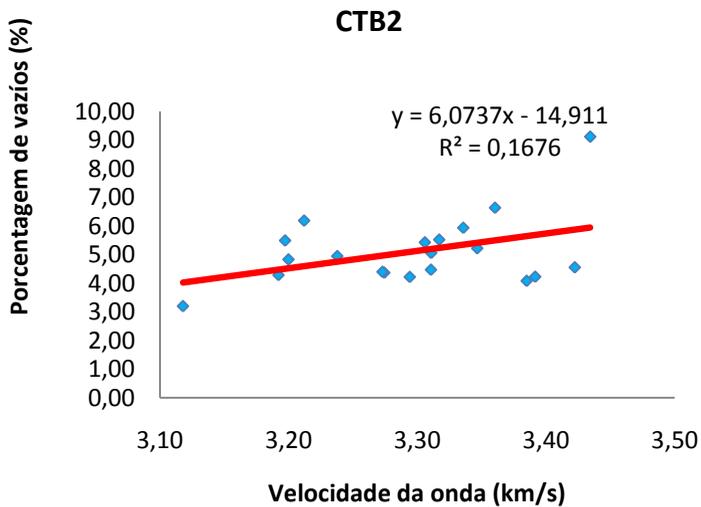
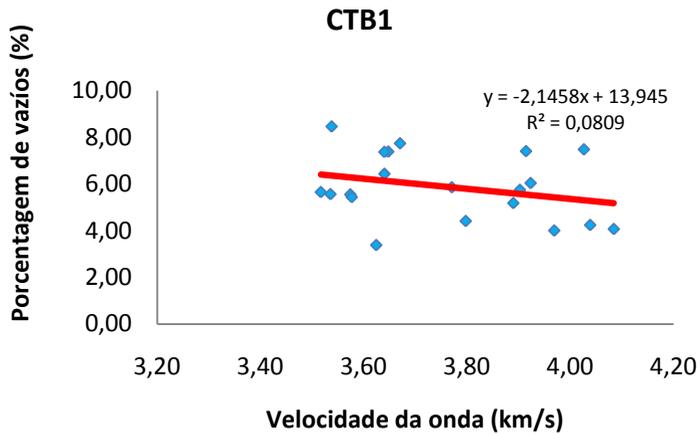


Figura 6.17 Regressão linear para as placas CTB

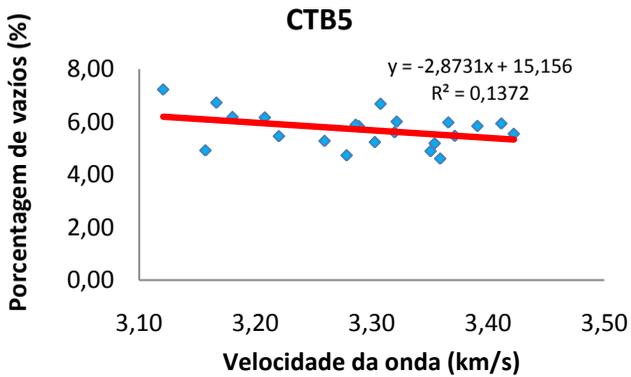
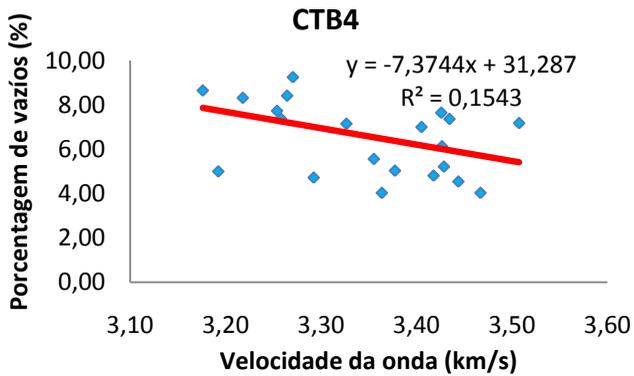
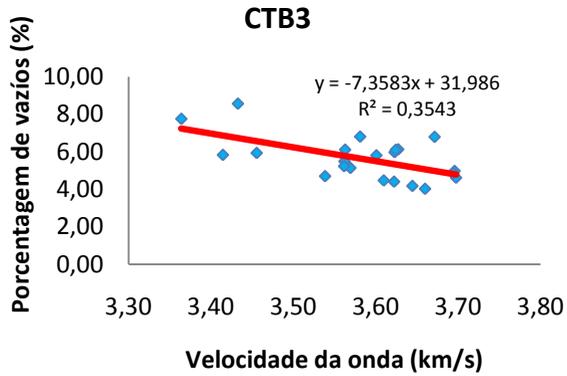


Figura 6.17 Regressão linear para as placas CTB

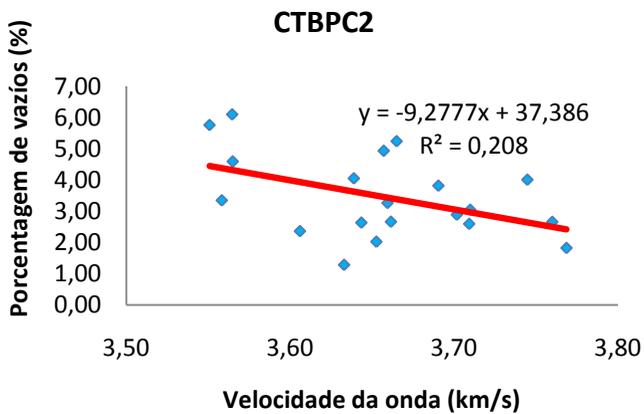
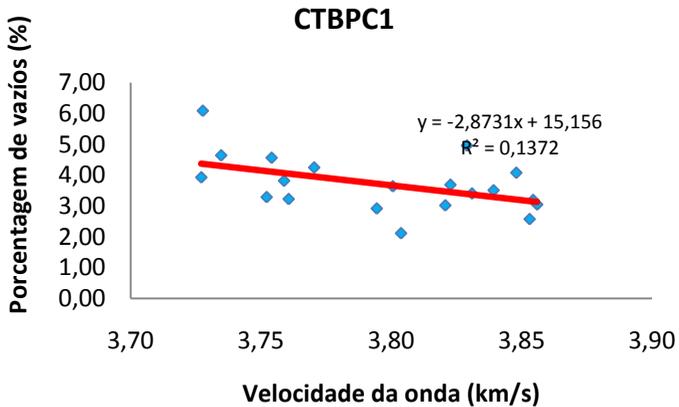


Figura 6.18. Regressão linear para as placas CTBPC

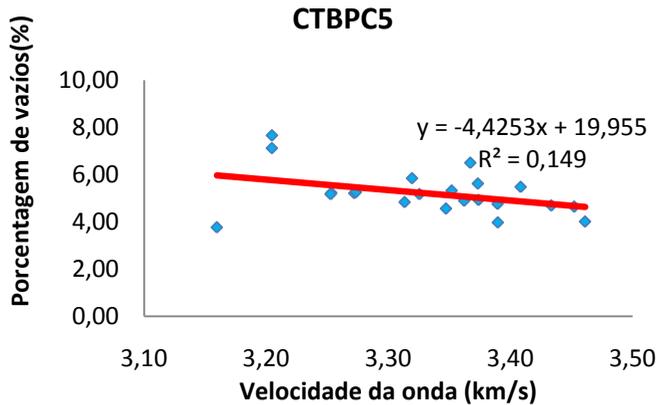
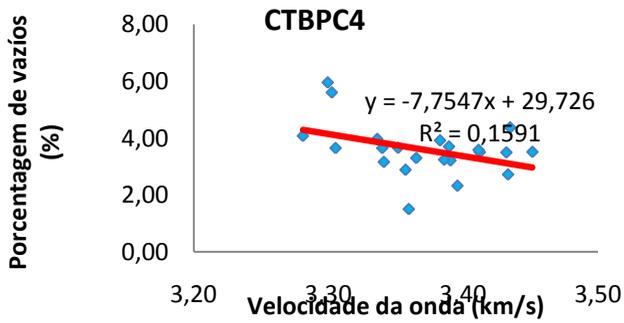
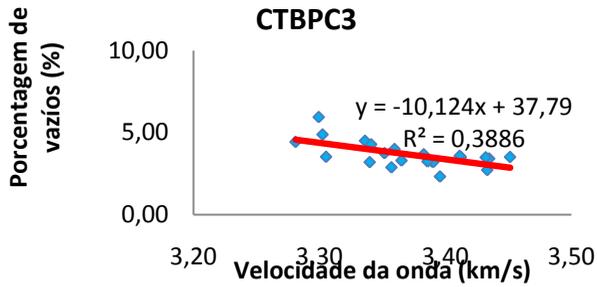
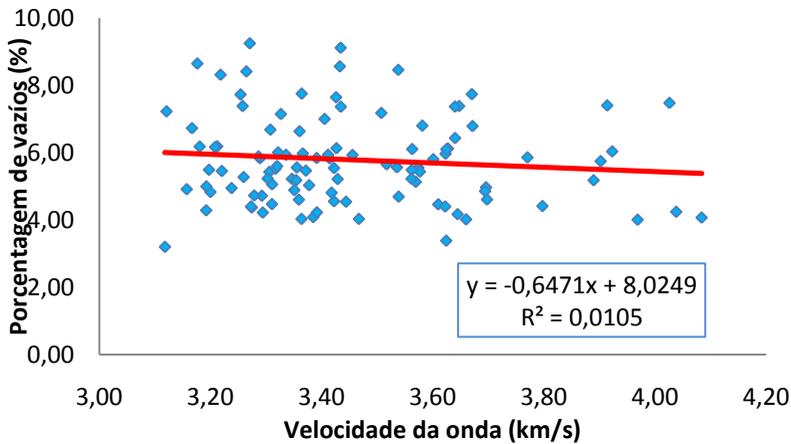
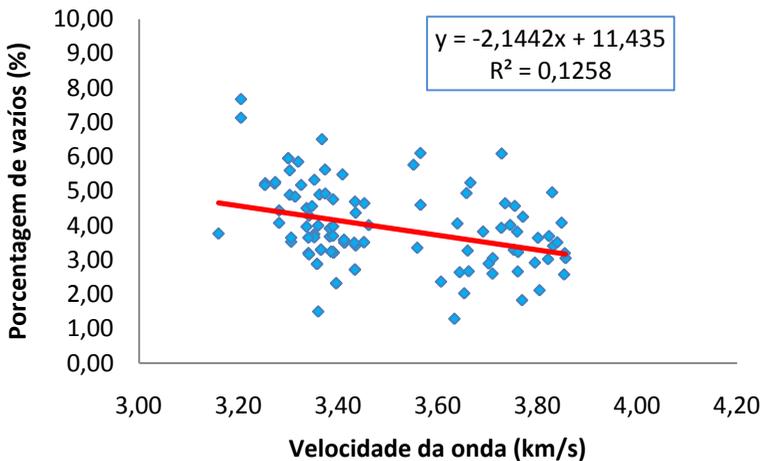


Figura 6.18. Regressão linear para as placas CTBPC



(a)

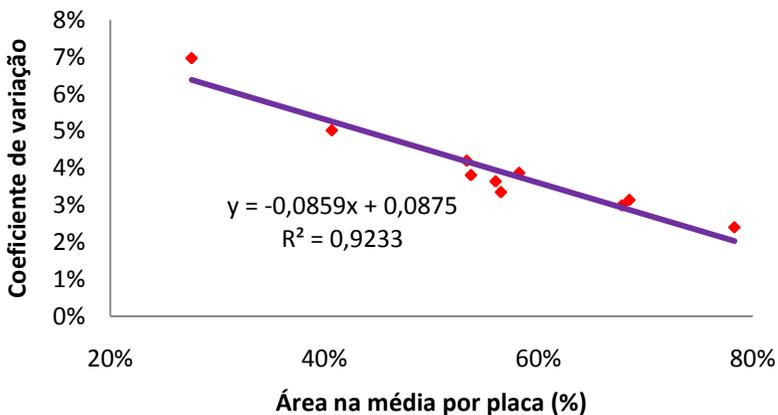


(b)

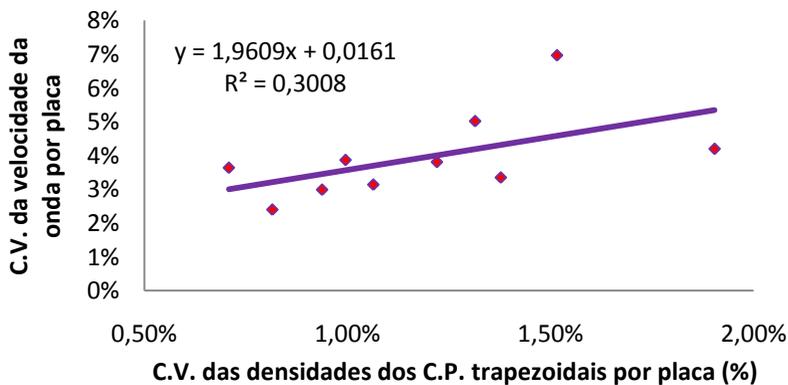
Figura 6.19. Regressão lineal para todas as placas CTB (a) e CTBPC (b), agrupadas

Até este momento estão definidos dois tipos de parâmetros no estudo, a velocidade da onda em cada uma das placas, que foi obtida inicialmente com a ajuda do ensaio de ultra-som pelo modo de propagação direta, e a percentagem de vazios dos corpos de prova trapezoidais, obtidos fisicamente após a realização dos cortes das placas. Numa tentativa de correlacionar estas variáveis, e tendo em conta a área que abrange o intervalo médio das placas, constrói-se um

gráfico de área média por placa vs. coeficiente de variação por placa (figura 6.20 a) e um gráfico do coeficiente de variação dos corpos de prova trapezoidais por placa vs. coeficiente de variação da velocidade da onda por placa (figura 6.20 b).



(a)



(b)

Figura 6.20 (a) Área na média vs. C.V. da velocidade (b) C.V. das densidades dos C.P. trapezoidais vs. C.V. da velocidade

Como pode ser observado na figura 6.20 (a), existe uma correlação entre a área localizada no intervalo médio com o coeficiente de variação da velocidade da onda por placa, então, um parâmetro de qualificação de homogeneidade das placas baseado nestes dois valores (coeficiente de variação da velocidade e área localizada no intervalo

médio) poderia ser aplicado. Já na figura 6.20 (b) a correlação é muito menor, mas pode se observar que o método alcança a percepção da variação das densidades com a variação da velocidade da onda.

Esta análise é realizada tendo em conta cada placa individualmente, mas, na prática, os corpos de prova trapezoidais finais são obtidos de duas placas, as quais devem ser homogêneas, e se complementam. Então, no momento da seleção das placas, poderia ser feita uma análise em conjunto para as placas estudadas. É assim que analisando de forma grupal cada conjunto de placas separadamente (CTB e CTBPC) e estabelecendo uma média geral para cada conjunto, foram obtidos os dados apresentados na tabela 6.7.

Tabela 6.7 Resumo dos resultados das áreas da análise grupal nas placas

Intervalo	Área (%)				
	CTB1	CTB2	CTB3	CTB4	CTB5
Inferior (<3,31)	1,5%	53,1%	34,7%	34,8%	52%
Médio (3,31-3,48)	11,8%	38,5%	55,7%	46,1%	43,3%
Superior (>3,48)	86,7%	8,4%	9,6%	19,1%	4,7%
Intervalo	Área (%)				
	CTBPC1	CTBPC2	CTBPC3	CTBPC4	CTBPC5
Inferior (<3,42)	0,00%	1,40%	72,90%	27,50%	77,80%
Médio (3,42-3,60)	1,10%	30,60%	27,10%	69,80%	21,90%
Superior (>3,60)	98,90%	68,00%	0,00%	2,70%	0,30%

Os resultados obtidos apresentados na tabela 6,8 mostram uma mudança significativa nos valores das áreas de cada intervalo, o que quer dizer que, para poder estabelecer um critério de homogeneidade para seu uso na seleção das placas para corte dos corpos de prova a serem ensaiados à fadiga e a módulo complexo, deve ser feita uma análise em conjunto das placas construídas e não individualmente. Da interpretação das tabelas 6.4, 6.6 e 6.8, pode ser concluído que as placas CTBPC3 e CTBPC5 apresentam características similares de média de velocidade da onda e coeficiente de sua variação. Da mesma maneira e como critérios de seleção contrários, foram estudados os corpos de prova CTBPC1 e CTBPC 5 por ter valores de média, coeficientes de variação e áreas totalmente diferentes.

Do resultado desta análise, concluiu-se que, ainda que os corpos de prova tenham características totalmente diferentes (velocidade da onda, percentagem da área no intervalo médio e média), para atender os critérios de seleção dos corpos de prova trapezoidais finais por porcentagens de vazios (Desvio padrão $<0,5$) nos dois casos estudados (CTBPC1-CTBPC5 e CTBPC3-CTBPC5), foram encontrados um máximo de 22 corpos de prova trapezoidais que atendem a dita especificação em cada um dos casos.

6.3 ENSAIOS DE ULTRA-SOM PELO MÉTODO INDIRETO

Feitas as medições dos tempos de percurso da onda ultrassônica por este modo de propagação, procedeu-se a análise dos resultados obtidos. Durante a realização dos testes sobre a camada drenante que, no campo fica localizada diretamente na superfície de rolamento, unicamente foram analisados os resultados obtidos invertendo a posição das camadas, ou seja, a camada de concreto asfáltico denso sobre a camada de concreto asfáltico drenante.

Com a finalidade de captar a variação da velocidade da onda na placa compactada a duas camadas, foram feitos os gráficos de distância vs. tempo (figura 6.21).

Como pode ser observado nos gráficos de distância vs. tempo (figura 6,21), não se observa uma mudança significativa na inclinação destes, a partir da qual possa ser feita a estimativa da espessura da camada. A explicação centra-se no fato de a velocidade da onda da camada superior ser maior que na camada inferior, então, o transdutor

receptor da onda ultra-sônica só vai captar os resultados provenientes da camada superior ou camada mais densa. Como pode ser observado na figura 6.22, o tempo de percurso marcado com a cor vermelha é superior ao tempo de percurso marcado com a cor azul.

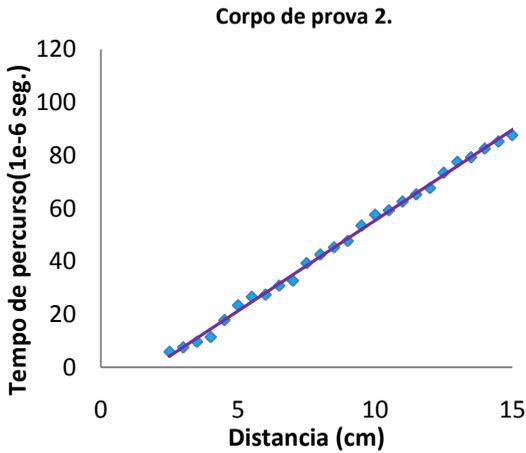
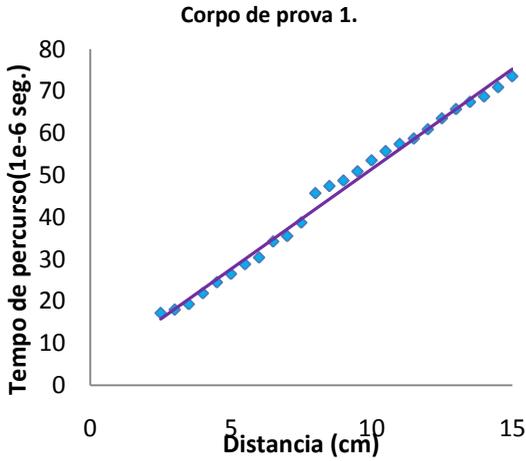


Figura 6.21 Distancia vs. tempo nos corpos de prova.

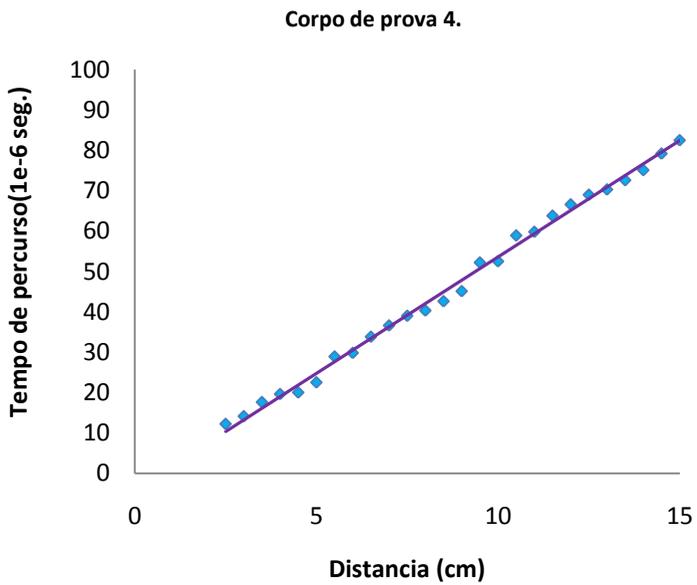
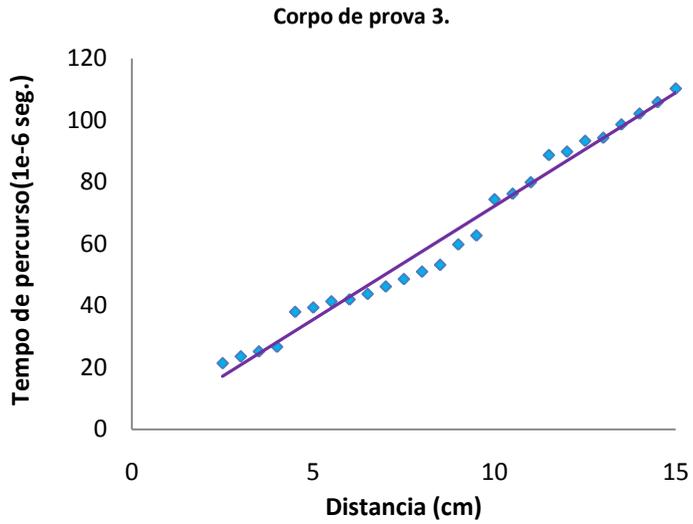


Figura 6.21 Distancia vs. tempo nos corpos de prova.

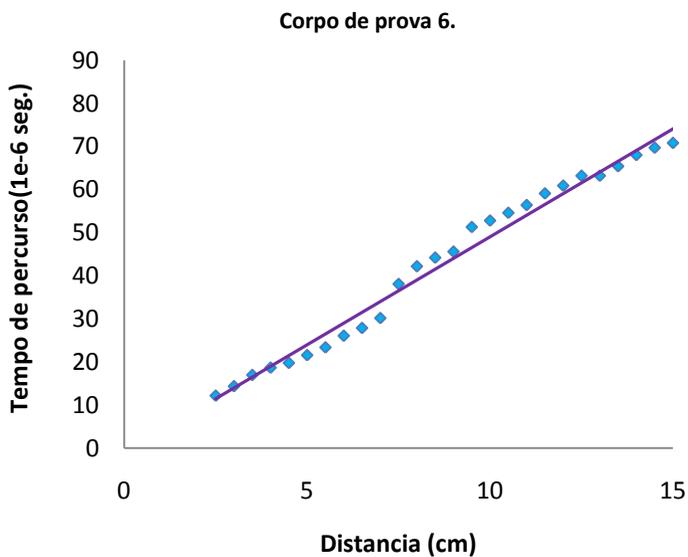
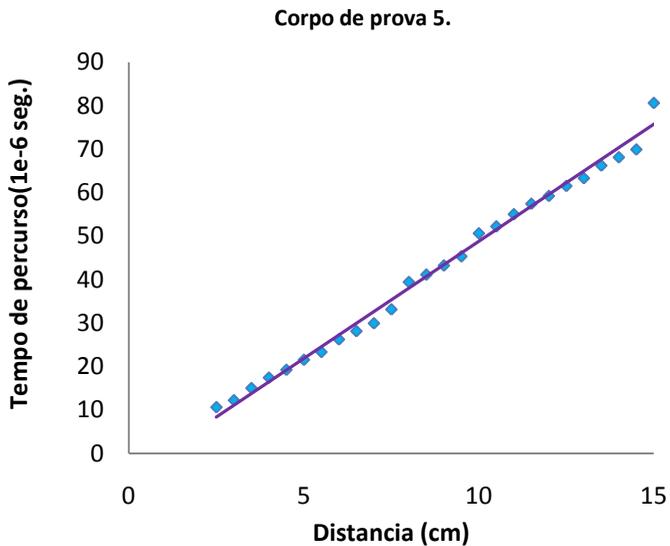


Figura 6.21 Distancia vs. tempo nos corpos de prova.

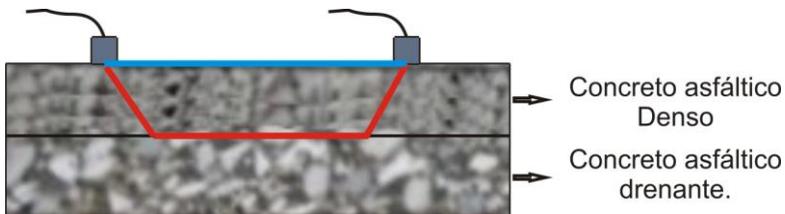


Figura 6.22 Esquema da medição dos corpos de prova

Após este procedimento, calculou-se a velocidade da onda em cada uma das placas elaboradas por ASTRANA 2006. Os gráficos de tempo de propagação vs. distância (figura 6.23), depois é feito um ajuste linear que determina a velocidade da onda que é a inclinação da reta resultante ou o valor da letra b na equação geral das retas (equação 6.1).

$$a = bx + c$$

(Eq. 6.1)

Neste caso, onde:

- a = Tempo de onda
- b = Inclinação da reta (Velocidade)
- c = Constante

A tabela 6.8 resume os valores das velocidades.

Tabela 6.8 Resumo das velocidades dos corpos de prova.

CORPO DE PROVA	VELOCIDADE (km/S)
2	2,09
3	1,48
4	1,34
5	1,73
6	1,84
7	1,96

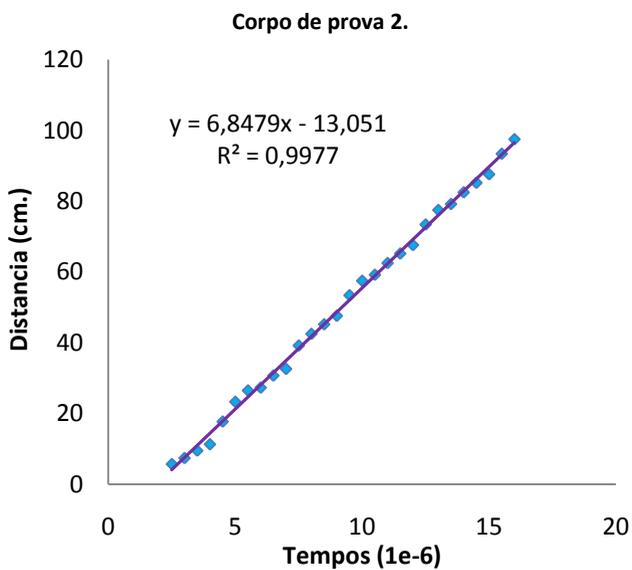
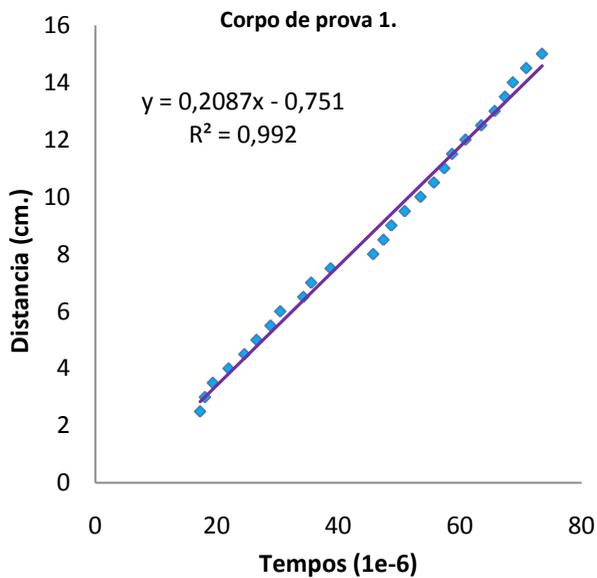


Figura 6.23 Gráfico tempo vs. distancia

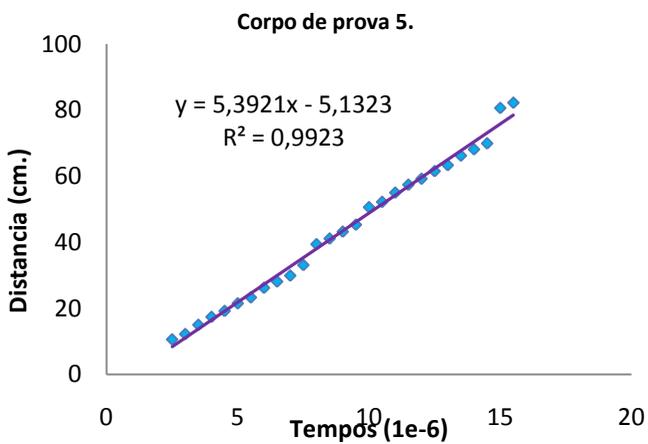
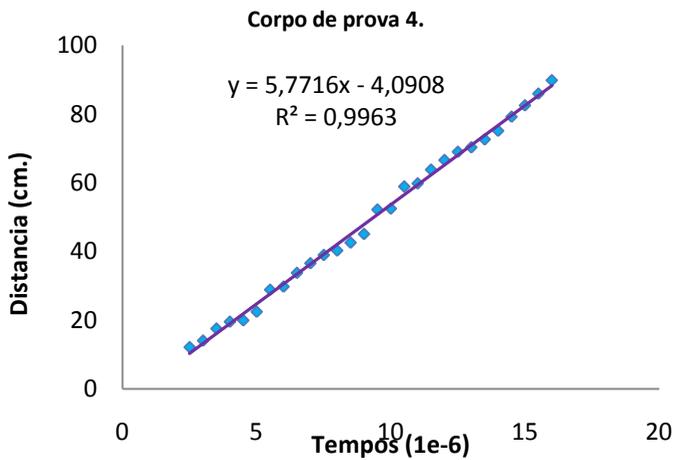
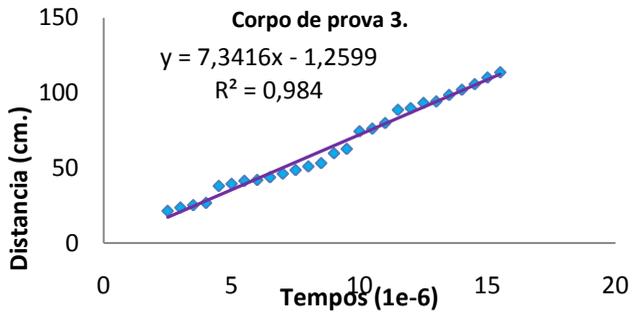


Figura 6.23 Gráfico tempo vs. distancia

6.4 ENSAIOS PELO MÉTODO INDIRETO NA ESTRUTURA DE PAVIMENTO SIMULADA

Neste caso a camada densa estava apoiada sobre uma camada de brita graduada simples. A velocidade da onda da camada superficial foi determinada (figura 6.24).

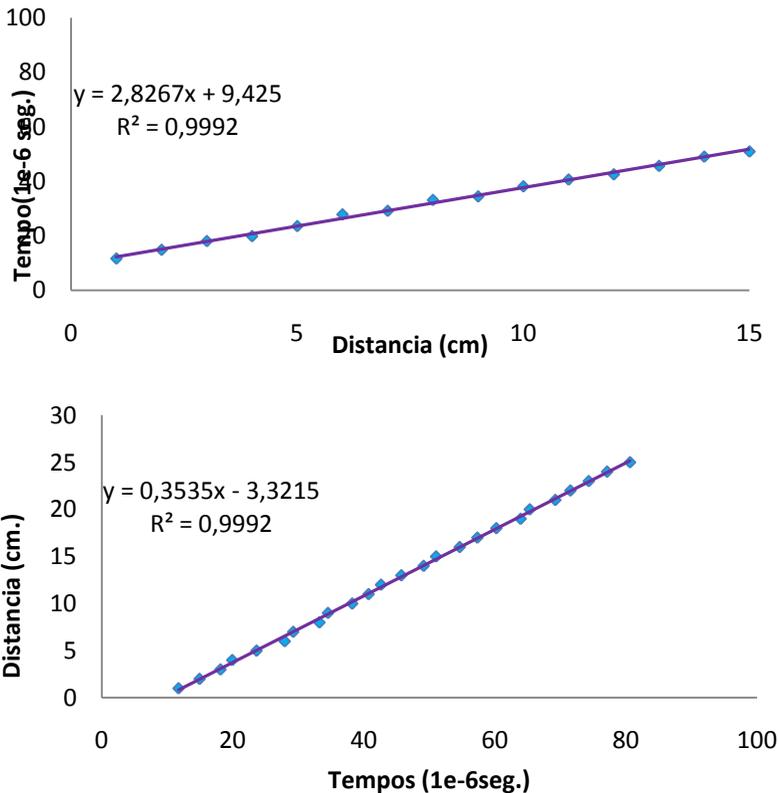


Figura 6.24 Gráficos de distancia vs. tempo (a) e tempo vs. distancia (b)

Com o gráfico de tempo vs. distância foi possível estimar a velocidade da onda da camada de revestimento (concreto asfáltico) que é igual a 3,54 km/seg. No entanto, não foi possível estimar a espessura da camada de revestimento.

6.5 ENSAIOS DE ULTRA SOM NO LIGANTE E NA ROCHA MÃE

As velocidades de propagação da onda medidas na rocha mãe são praticamente 2 vezes maior que no ligante asfáltico. (tabela 6.9)

Tabela 6.9 Velocidades da rocha mãe e do ligante asfáltico.

Rocha mãe		Ligante asfáltico	
Espessura (cm)	Tempo (μ s)	Espessura (cm)	Tempo (μ s)
90,43	16,8	12,20	61,90
79,98	15,9		
78	15,1		
Vel (km/seg.)	5,197	Vel (km/seg.)	1,97

Pode ser observado que a velocidade da rocha está dentro da faixa apresentada na tabela 2.3, onde expõe que a velocidade do granito se encontra entre 4,5 e 7,9 km/s.

O ligante, por ser um material visco-elástico e termo suscetível, pode ter uma variação da velocidade com respeito à temperatura, mas este tema foge do objetivo da pesquisa. No entanto, o valor do tempo de percurso da onda foi tirado a uma temperatura aproximada de 18º C, ambiente.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo ocupou-se em verificar a homogeneidade da velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas em placas de concreto asfáltico em laboratório e relacioná-la com a homogeneidade de vazios dos corpos de prova obtidos destas placas.

Ainda que nos concretos de cimento Portland o ensaio de ultra-som para a determinação da velocidade de percurso da onda apresente bons resultados e boa aplicabilidade, nos concretos asfálticos existem muitas variáveis que intervêm no comportamento da mistura (curva granulométrica, tipo de ligante, aditivos, tipo de mineral, forma dos grãos, temperatura, etc.), o que dificulta a associação da velocidade da onda ultra-sônica com um padrão de comportamento da mistura.

Segundo o estudo, a velocidade média obtida para as placas de Curvas Teóricas Betuminosas com pó Calcário (CTBPC) foi maior do que a obtida para as placas de Curvas Teóricas Betuminosas com Brita (CTB), porém, esta diferença não foi significativa e pode estar influenciada pela margem de erro do aparelho. Mas, na prática, a presença de pó calcário influencia significativamente na vida em fadiga e nos resultados dos ensaios do módulo complexo segundo a pesquisa de BARRA (2009).

Ainda que a área encontrada no intervalo médio dos corpos de prova seja maior nas placas de Curvas Teóricas Betuminosas com pó Calcário (CTBPC) que nas placas de Curvas Teóricas Betuminosas com Brita (CTB), este fato é devido unicamente ao processo de mistura e compactação, sendo independente das propriedades do material analisado.

Levando-se em conta unicamente a velocidade da onda como parâmetro, a placa CTBPC3 foi a mais homogênea. No entanto, com o uso deste resultado não poderia ser feita a seleção da placa, devido a que a triagem dos corpos de prova resultantes do corte da mesma

corresponde a valores muito restritos e a margem de variabilidade para a seleção é muito pequena.

Em teoria, a velocidade da onda ultra-sônica diminui com o aumento da porcentagem de vazios no corpo de prova estudado, devido à sua menor propagação no ar. Este fato pode ser evidenciado na grande maioria dos gráficos comparativos entre porcentagem de vazios e velocidade da onda na placa dos corpos de prova trapezoidais.

Para o estudo da homogeneidade dos vazios (fator determinante na triagem dos corpos de prova trapezoidais), a velocidade da onda medida pelo ensaio corresponde à média das velocidades durante todo o percurso da onda, o que quer dizer que podem existir várias combinações de proporções de materiais com a mesma velocidade de percurso da onda ultra-sônica, dentre os materiais granulares, ligantes e vazios.

Com o uso do ultra-som pelo modo de propagação direto (da maneira como foi aplicada neste trabalho), poder-se-ia estabelecer um padrão para a avaliação da homogeneidade usando o Coeficiente de Variação ou a área localizada no intervalo médio (usando a margem de erro do aparelho). No entanto, para efeitos práticos não poderia ser usado no processo de seleção de placas para os ensaios de fadiga e do módulo, devido a que a triagem que seleciona os corpos de prova trapezoidais tem padrões muito restritos e o grau de precisão do ultra-som não apresenta tanta sensibilidade.

Ainda que o ensaio de ultra-som pelo método indireto seja o menos recomendado, posto que a intensidade do sinal recebido é menor quando comparada com os outros modos de transmissão (direta e semi-direta), é o mais indicado para o uso em campo. Porém, a determinação da velocidade ficaria limitada a um pequeno trecho, parecendo não ser representativa do todo diante do conjunto de variáveis envolvidas e a natureza do material envolvido, o que implicaria na necessidade de execução de ensaios em diferentes pontos de maneira que a amostra seja mais representativa.

Durante os ensaios, não foi possível estimar a velocidade da onda na camada de concreto asfáltico drenante devido à qualidade da superfície e à grande percentagem de vazios característicos deste tipo de camadas.

No laboratório, com as placas posicionadas de maneira inversa, ou seja, com a densa como a camada superior e a drenante como a camada inferior, não foi possível estimar a espessura das camadas porque a velocidade da onda, que depende das propriedades elásticas do material estudado, ser neste caso maior na camada superior que na camada inferior, motivo pelo qual o ensaio possivelmente não detectaria a mudança de camada a uma determinada profundidade.

O ensaio de ultra-som no modo de transmissão indireta para a estimativa da espessura de camadas em placas de concreto asfáltico em situação normal de campo mostrou-se ineficaz, provavelmente devido aos transdutores não serem adequados para as espessuras estudadas, à qualidade do material drenante e a camada superior geralmente possuir a velocidade de percurso de onda superior à da camada inferior.

Com o uso do método indireto no ensaio de ultra-som, pode-se ter uma ideia do grau de compactação do concreto asfáltico, mas, para a sua aplicação em campo, teriam que ser feitos estudos com amostras de calagem para fazer o comparativo adequado desta variável. Entretanto, o ensaio apresenta limitações que devem ser levadas em conta no momento da execução dos estudos.

O grau de compactação poderia ser estimado no momento da execução do processo de compactação do material, contudo, devem ser desenvolvidas técnicas que possibilitem a execução dos ensaios de tal forma que as variações superficiais intrínsecas do material não sejam um fator que contribua para as ocorrências de imprecisão das leituras, o que prejudicaria confiabilidade dos resultados obtidos.

O concreto asfáltico por ser um material visco-elástico é termo-suscetível, razão pela qual se deve estudar minuciosamente a variação da velocidade da onda em função da temperatura. Ainda,

muitos tipos de ligantes e diversas curvas granulométricas e cada combinação correspondem a casos específicos.

Na estrutura de pavimento simulada, a velocidade da onda da camada de concreto asfáltico é de 3,54km/s, e fazendo um comparativo com a velocidade da onda média das placas CTB (com brita) cuja velocidade foi de 3,39km/s, os resultados foram muito similares.

O estudo da velocidade da propagação da onda ultra-sônica como foi usado para este trabalho apresentou resultados não esperados, mas o avanço da tecnologia tem gerado novos equipamentos baseados nestes princípios os quais poderiam ser aplicados para futuros estudos.

CAPÍTULO 8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 7182 (1986), **Solo - Ensaio de compactação**
Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, NBR 8802 (1994), **Concreto endurecido-determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AFNOR NF P 98-216-1 (1993), **Mesure de Propriétés Liées à la Texture des Melanges Hydrocarbonés: Essai de Mesure de la Hauteur au Sable**. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-250-2 (1992), **Essais Relatifs aux Chaussés, Preparations des melanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des plaques**. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-251-1 (1995), **Essais Relatifs aux Chaussés, Preparations des melanges Hydrocarbonés: Essai de Duriez**. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-252 (1995), **Essais Relatifs aux Chaussés, Essai à la Presse à Cisaillement Giratoire PCG**. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-253-1 (1993), **Essais Relatifs aux Chaussés, Preparations des melanges Hydrocarbonés, Partie 1: Essai d'Orinierage**. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-261-1 (1993), **Essais Relatifs aux Chaussés, Determination de la Résistance en Fatigue des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: Essai par Flexion à Fleche Constante**. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-260-2 (1993), **Essais Relatifs aux Chaussés, Mesure des Caractéristiques Rhéologiques des Mélange Hydrocarbones, Partie 2: Détermination du Module Complexe par Flexion Sinusoïdale.** ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-254-3 (1993), **Mesure de Propriétés Liées à la Perméabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbones, Partie 3: Essai au Drainomètre de Chantier.** ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

AFNOR NF P 98-260-2 (1992), **Essais Relatifs aux Chaussés, Préparations des mélanges Hydrocarbones, Partie 2 : Compactage des plaques.** ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR.

ASTM C597-02. **Standard test method for pulse velocity through concrete.** Annual Book of Standards Volume 04.02, 2002.

ASTM C1383-04. **Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method.** Annual Book of Standards Volume 04.02.

ASTM C1383-04. **Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method.** Annual Book of Standards Volume 04.02.

AKKAYA, Y. SUBRAMANIAM, T. VOIGT, V. SHAH, S.P. (2003). **Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method.** Materials and Structures.

ALMEIDA, F. F. M. de, MELCHER, G. C., CORDANI, U. G., KAWASHITA, K., VANDROS, P. (1968). **Radiometric age determinations from northern Brazil.** São Paulo: Boletim da Sociedade Brasileira Geológica, Vol. 17.

ALMEIDA, I. R. ,1993, **Emprego do esclerômetro e do ultra-som para efeito da avaliação qualitativa dos concretos de alto desempenho**, Tese para concurso de Professor Titular, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 228 (1998). **Nondestructive test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. ACI 228, 2R-98**, American Concrete Institute, EUA.

American Society for Testing and Materials Designation C 597-97; **Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete**; 100 Barr Harbor Drive, West Conshohockem, PA.

ASTRANA, C.A. (2006), **Estudo da absorção sonora e permeabilidade em concretos asfálticos drenantes**, dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

BAAJ, H. (2002), **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. Thèse de Docteur. Institut National des Sciences appliqués des Lyon.

BARRA, B.S. (2009), **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

BECKER, P.A. (2007), **Estimativa da profundidade de fendas no concreto Através da utilização do ultra-som e do eco-impacto**, dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

BHARDWAJ, M. (2004) **High Efficiency Non-contact Transducers and a Very High Coupling Piezoelectric Composite**, Ultrason Group, Boalsburg, PA USA.

BHARDWAJ, M.C. (2001) **Non-Contact Ultrasound: The Last Frontier in Non-destructive Testing and Evaluation**, SecondWave Systems, 1020 E. Boal Avenue Boalsburg, PA 16827 USA

BROWN, A.E. **Rationale and Summary of Methods for Determining Ultrasonic Properties of Materials at Lawrence Livermore National Laboratory, Acoustics properties of materials group nondestructive evaluation section**. UCRL-ID-119958 Office of Scientific and Technical Information P.O. Box 62, Oak Ridge, TN 37831.

BROWN SF, BRUNTON JM (1986). **An introduction to the analytical design of bituminous mixtures**, UK: University of Nottingham.

BUJARD, V. BRUNEAU, C. SCHELLER, E. BAILEY, S. F. et BRUHWILER E. (2001) **Applicabilité de la méthode impact-écho. Rapport final, Office Fédéral des Routes, février**.

BULLEN F, PRESTON N. (1992) **Extending the use of Nottingham Asphalt Tester. Seventh International Conference on Asphalt Pavements**, V-I.

BUNGEY, J. H. (1989), **The testing of concrete in structures**, 2 ed. London, Surrey University Press.

CASTAÑEDA, E. (2004) **Contribution des méthodes Non Destructives à l'Évaluation de l'Effet de l'Eau sur les Enrobés Bitumineux**. Thèse de Doctorat. Université de Nantes.

CHEN, N. S. DAVIDSON, J. SEHDEV, A. AMER, N. ENDFINGER, M. **Design and Quality Control of Concrete Overlays**, By Department of Civil and Environmental Engineering. The University of Alabama at Birmingham Alabama Prepared by UTCA.

CHUNG, H. W.; LAW, K. S. (1983), **Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique**, *Concrete International*.

CPRM (2009). **MINISTÉRIO de MINAS e ENERGIA - Serviço Geológico do Brasil. Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais.** <http://www.cprm.gov.br>. Último acesso em abril de 2009.

DE AGUIAR, J. (2006) **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis, dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

De La ROCHE, C. (1996), **Módulo de Rigidité et Comportement em Fadigue des Enrobés Bitumineux.** Thèse de Docteur. École Central de Paris.

De La ROCHE e ODEON, H. (1993) **Experimentation USAP/LPC/Shell-fatigue des enrobés-** Phase 1- Rapport de Synthèse. Document de Recherche LCPC.

DI BENEDETTO, H. e De La ROCHE (1998), **State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures, in Bituminous Binders and Mixtures: state of the art and RILEM interlaboratory tests on mechanical behavior and mix design.** E&FN Spon, Ed. L. Francken.

DNR-PRO 120/97, **Coleta de amostra de agregados**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.

DNR-ME 03/99, **Material betuminoso: Determinação da penetração**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.

DNR-ME 04/94, **Material betuminoso: Materiais betuminosos- Determinação da viscosidade Saybolt-Furol**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.

DNR-ME 051/94 **Solos- análise granulométrica.** Departamento nacional de estradas de rodagem . Rio de Janeiro, RJ.

DONGMO-ENGELAND, B-J. (2005). **Caracterisation des Deformations d'Orniage des Chaussés Bitumineuses**. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire Geomatériaux de Département Génie Civil et Bâtiment de Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État.

DPM/UNESP, (2009) **Departamento de Petrología e Metalogenia da Universidade Estadual de São Paulo**. Museu de Minerais e Rochas Heinz Ebert, portal Campus Rio Claro. <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Último acesso junho de 2009.

DUNNING, M.R (1996). **Evaluation of Ultrasound Method for Determining Aggregate Gradations in Asphaltic Concrete Mixes**, by MS, University of Nevada, Las Vegas,

DUNNING, M. R. (2006) **Feasibility for the use of Non-contact Ultrasound for Application Asphalt Concrete Materials**, Dissertation, Graduate College University of Nevada, Las Vegas.

ELMEHDI, H. M., PAGE J. H., SCANLON, M.G. (2002) **Using ultrasound to investigate the cellular structure of bread crumb**.

ELVERY, R. H.; IBRAHIM, L. A. M. (1976); **Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages, Magazine of Concrete Research**.

EVANGELISTA, A (2002). **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**, dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

Focaoaru, I. , 1984, **Romanian Achievements in Nondestructive Strength of Concrete, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete**, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit.

GONZALEOZ, L. – **Optimización de un dispositivo de ultrasonido para monitorizar el fraguado de un cemento**.

GONÇALVES, A. (1986), **Novos ensaios não destrutivos para a determinação da resistência do betão nas estruturas**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

GONÇALVES, A. (1995), **In situ concrete strength estimation. Simultaneous use of cores, rebound hammer and pulse velocity**, International Symposium NDT in Civil Engineering, Germany.

GUAIMARÃES, C. (2006) **Avaliação do uso da água magnetizada na produção de concretos em centrais**, dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

HUET, C. (1963), **Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés**. These de Docteur. Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

IBRAOP (2009), **Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas**, www.ibraop.org.br última visita, julho de 2009.

INFRALAB (2009), **Ingénieurs Conseils et laboratoire d'analyses routières**, <http://www.infralab.ch/>, última visita julho de 2009.

JANSOHN, R. AND KROGGEL, O.(1995), **Detection of thickness, voids, honeycombs and tendon ducts utilizing ultrasonic impulse echo technique**, International Symposium Non-destructive Testing in civil Engineering, Berlin.

JENKINS, R. S., (1985), **Non-destructive testing - An evaluation tool**, Concrete International, February.

KLEIN, E. L. e MOURA, C. A. V. (2003). **Síntese geológica e geocronológica do Cráton São Luiz e do Cinturão Gurupi na região do Rio Gurupi** (NE-Pará/NW-Maranhão). São Paulo: Revista Geologia, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Vol. 3.

KNAB, L.I., BLESSING, G. V. AND CLIFTON, J. R., (1983), **Laboratory evaluation of ultrasonics for crack detection in concrete**, ACI Journal, January-February.

KOMLOS, K., ET AL, (1996), **Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards**, Cement and concrete Composites.

Kraukrämer, J. e Krautkrämer, H., **Ultrasonic Testing of Materials**, 4th edition, 1990, Springer-Verlag, EUA.

LPI (2009). **Laboratorio de procesado de imagen**. <http://www.lpi.tel.uva.es>. Último acesso em junho de 2009.

MAILLARD, S. (2005) **Fissuration et Autoreparation des liants bitumineux – Apport de l’essai de rupture locale répétée sur bitume**. Université de Nantes.

MALHOTRA, V. M. (1984), **In situ/nondestructive testing of concrete** - A Global Review, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit.

Malhotra, V. M. e Carino, N. J. (1991), editors, **CRC Handbook of Nondestructive Testing of Concrete**, CRC Press, EUA

MENEGHETTI, L. C. (1999), **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

MEURER F., E. (2001), **Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes**, dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

MOMM, L. (1998), Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MOMM, L. (2000), **Pavimento drenante em concreto asfáltico**, 2º Seminário Nacional de Modernas técnicas Rodoviárias, Florianópolis, SC.

NAIK, T. R., MALHOTRA, V. M. (1991), **The ultrasonic pulse velocity method**. In: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), CRC handbook on nondestructive testing of concrete, 1 ed., Boston, USA, CRC Press.

Nogueira, C. L. (2000), **Ultrasonic Wave Propagation in Two-Phase Composite Materials and Characterization of Mechanical Damage in Concrete**, Tese de Doutorado, Universidade do Colorado, CO, EUA.

NF EN 12697-12. **Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12**. Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.

Nogueira, C.L. and Willan, K.J., (2001), **Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression**, ACI Materials Journal

OTTO, G. G. (2009), **Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**, dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

PADARATZ (2009), **Apostila de Ensaios Não Destrutivos**, Universidade Federal de Santa Catarina.

Phoon, K.K., et al, (1999), **Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method**, ACIMaterial Journal.

PINHEIRO, J. P., ARANHA, I. (2009). **Caracterização cristalo-química preliminar de bentonitas Brasileiras.**

POPOVICS, J. S.; SONG, W.; GHANDEHARI, M.; SUBRAMANIAM, K.V.; ACHENBACH, J. D.; SHAH, S. P. (2000), **Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete.** ACI Materials Journal.

POUTEAU, B. (2004) **Durabilite mecanique du collage blanc sur noir dans les chaussees**, Thèse de DOCTORAT, L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.

Pundit Manual (1994), CNS Eletronics Ltd., London.

RILEM, NDT 1 (1972), **Testing of concrete by the ultrasonic pulse method.**

RIVIÉRE, N. (1996), **Comportament em Fatigue des Enrobés Bitumineux.** Thèse de Doctorat, Universite de Burdeaux I.

RUDENSKY, A. V. (1997) **Asphalt Concrete Fatigue Properties, in proceedings of the 5 International RILEM Symposium.** Mechanical Tests For Bituminous Materials (MBTM): Recent Improvements and Future Prospects. Lyon France.

Sansalone M, Streett WB (1997). **Impact-echo nondestructive evaluation of concrete and masonry.** Ithaca, NY: Bullbrier Press.

SIMONIN, J.M. (2002). **Using seismic investigation to test the interface between two pavement layers.** In Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Correira and Branco, volume 1.

SOLOMON, D (1987). **Infrared thermography to measure bridge deck delaminations. Alberta transporation.** Research and developpment branch.

STURRUP, V. R.; VECCHIO, F. J.; CARATIN, H. (1984), **Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength.** In Situ/Non

Destructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute.

STRECKEISEN, A. L. (1976), **Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: a provisional attempt.** Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte, H.

YAMAN, I.O. et al, 2001,**Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission,** ACI Materials Journal.