

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PROGRAMA INTERLABORATORIAL DE AGREGADOS E MISTURAS
ASFÁLTICAS DA REDE ASFALTO N/NE

Manuela de Mesquita Lopes

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares

CO-ORIENTADORA: Prof^ª. Dr^ª. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Fortaleza
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

LOPES, MANUELA DE MESQUITA

Programa Interlaboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE. Fortaleza, 2010.

(173 folhas) Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

1 – Transportes – Dissertação 2 – Pavimentação Asfáltica

3 – Interlaboratorial 4 – Agregados e Misturas Asfálticas

CDD

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPES, M.M. (2010). Programa Interlaboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 176 fl.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Manuela de Mesquita Lopes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Programa Interlaboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE.

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Manuela de Mesquita Lopes

Av. Desembargador Moreira 2930 apto. 503 / Bairro Dionísio Torres

CEP: 60.170-002 – Fortaleza/CE – Brasil

PROGRAMA INTERLABORATORIAL DE AGREGADOS E MISTURAS
ASFÁLTICAS DA REDE ASFALTO N/NE

Manuela de Mesquita Lopes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES.

Aprovada por:

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.
(Orientador)

Prof^a. Verônica T. F. Castelo Branco, Ph.D.
(Co-Orientadora)

Prof^a. Sílvia Maria de Freitas, D.Sc.
(Examinadora Interna)

Dr^a. Leni Figueiredo Mathias Leite, D.Sc.
(Examinadora Externa)

FORTALEZA, CE – BRASIL
AGOSTO DE 2010

DEDICATÓRIA

*Ao meu melhor grupo de amigos, participantes ativos de todo o processo que norteiam a minha existência, meu exemplo de unidade, de caráter, de simplicidade, de companheirismo – **MINHA FAMÍLIA:** Damião, Socorro, Carolina e Camila!*

AGRADECIMENTOS

- A Deus, que me deu a vida, além de forças, coragem, proteção e fé para a realização deste trabalho!
- Aos meus pais, Damião e Socorro, pela dedicação que tiveram para a minha educação e por jamais medirem esforços para que eu fosse feliz. Espero, um dia, poder retribuir de alguma maneira tudo que já recebi deles.
- Às minhas irmãs e amigas, Carolina e Camila, por estarem sempre ao meu lado, torcendo para que tudo desse certo.
- Ao meu orientador e vendedor de sonhos, professor Jorge Soares, por ter me ensinado a amar mais minha profissão, por ter acreditado na minha capacidade e por ter me ajudado a lutar pelos meus objetivos.
- À minha co-orientadora, professora Verônica Castelo Branco, que esteve sempre muito dedicada na orientação deste trabalho me dando muita força, coragem e conhecimento.
- A todos os professores, engenheiros e alunos que fazem parte do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará. Todos contribuíram de alguma maneira para a minha formação, para o meu trabalho e se tornaram bons amigos: Pedro Custódio, Bruno Maia, Lucas Feitosa, Renato, Felipe, Iuri, Annie, Bruno Ângelo, Jardel, André, Professora Suelly, Professora Verônica (Vevis), Professora Áurea, Professor Jorge! E como não poderia deixar de ser, ao técnico de laboratório e grande amigo Rômulo Jácome (O Primo) pelas horas de trabalho dedicadas para a conclusão desta dissertação, pela amizade, pelos ensinamentos, sem o Rômulo, parte deste trabalho não seria possível.
- À REDE ASFALTO N/NE. Sem a ativa participação das instituições envolvidas, a consecução deste programa não seria possível.

- Ao engenheiro José Carlos Olivieri por ter cedido, gentilmente, o programa para efetuar o traçado das elipses de confiança e por ter me dado diretrizes para o entendimento do assunto.
- Ao Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT pelo apoio na forma de financiamento da bolsa de estudos de mestrado e do estágio na França.
- A todos os meus parentes e amigos, que mesmo alguns não sendo da área, contribuíram com o simples fato de existirem em minha vida. “Amigos vão e vem, mas nunca abra mão dos poucos e bons!”. De que vale a vida sem vocês!

MUITO OBRIGADA!!!

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

PROGRAMA INTERLABORATORIAL DE AGREGADOS E MISTURAS
ASFÁLTICAS DA REDE ASFALTO N/NE

Manuela de Mesquita Lopes
Agosto de 2010

Orientador: Jorge Barbosa Soares
Co-Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

O trabalho apresenta o programa interlaboratorial de agregados e de misturas asfálticas da REDE ASFALTO N/NE, um arranjo de nove instituições brasileiras coordenado pela Universidade Federal do Ceará (UFC). O objetivo do trabalho é a implantação de um programa interlaboratorial para caracterização de agregados e dosagem de misturas asfálticas dentro da REDE e a utilização dos resultados como ferramenta para uniformizar os procedimentos dos laboratórios participantes. Foram distribuídas pela UFC amostras de agregados e de ligante asfáltico para realização de ensaios por parte dos laboratórios. Os agregados foram caracterizados com relação à densidade, absorção, índice de forma, abrasão Los Angeles e equivalente de areia. Para a dosagem Marshall, utilizaram-se os resultados obtidos pelos laboratórios na fase do interlaboratorial de agregados. Também foram distribuídas cinco amostras de mistura asfáltica solta para cada laboratório, que ficaram responsáveis pelo reaquecimento, compactação e pesagem das mesmas. Em seguida, estas amostras compactadas foram devolvidas à UFC para nova pesagem, para fins de comparação. Os resultados foram analisados por meio dos métodos estatísticos da Elipse de Confiança, do z-score e dos testes de *Dixon* e de *Cochran*. Observou-se que o teor ótimo de ligante determinado a partir da metodologia Marshall oscilou entre 4,5% e 8,0%, para uma mesma mistura testada em diferentes laboratórios. Os erros mais frequentes detectados nos diversos ensaios estão relacionados aos cálculos, à descalibração da balança e/ou à falta de entendimento das normas técnicas. Também é apresentada uma verificação da distribuição Normal para os ensaios de: densidade aparente, densidade real e absorção do agregado graúdo, densidade aparente e V_v de CP. O programa contribuiu para a realização de ensaios com maior confiabilidade e credibilidade, além de promover uma melhor integração entre os grupos envolvidos.

Abstract of Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering.

INTERLABORATORY PROGRAM FOR AGGREGATES AND ASPHALT
MIXTURE CHARACTERIZATIONS WITHIN THE BRAZILIAN NORTH-
NORTHEAST ASPHALT NETWORK

Manuela de Mesquita Lopes
Agosto de 2010

Advisor: Jorge Barbosa Soares
Co- Advisor: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

This thesis presents the interlaboratory program for aggregates and asphalt mixture characterizations within the Brazilian NORTH-NORTHEAST ASPHALT NETWORK, an arrangement of nine institutions led by Universidade Federal do Ceará (UFC). The main focus of this work is to contribute for the laboratories staff professional development and to improve the testing procedures accuracy. Asphalt binder and different aggregates samples were distributed for the nine institutions to perform the aggregates characterization tests and the asphalt mixture design following the Marshall procedure. The aggregates were characterized with respect to: (i) density, (ii) absorption, (iii) shape index, (iv) Los Angeles abrasion, and (v) sand equivalent. For the Marshall design, the results obtained for the aggregates characterization were used. Moreover, five samples of loose asphalt mixture were distributed for each laboratory, where they were reheated, compacted and weighed for air voids content determination. These samples were returned to UFC with the purpose of being reevaluated in terms of its volumetric parameters determination. The results were analyzed using different statistical methods such as: (i) ellipse of confidence, (ii) z-score and (iii) tests of *Dixon* and *Cochran*. It was observed that there was a variation between 4.5 to 8.0% in the optimum asphalt binder content determination when the same mixture was designed in different laboratories. The most frequent errors found in the various tests are related to: (i) calculations procedures, (ii) equipment calibration and/or (iii) lack of understanding of the technical standards. The program contributed to improve the tests reliability and credibility, and to promote a greater integration between the involved groups.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABELAS	7
CAPÍTULO 1	10
INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS.....	13
1.1.1. Objetivo Geral.....	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	14
CAPÍTULO 2.....	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. PROGRAMA INTERLABORATORIAL.....	15
2.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	20
2.2.1. Distribuição Normal	21
2.2.2. Método de Youden.....	23
2.2.3. Z-score	34
2.2.4. Testes Estatísticos	36
2.2.5. Estatística Robusta Adaptada.....	40
2.3. CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS	41
2.3.1. Granulometria	41
2.3.2. Abrasão Los Angeles	43
2.3.3. Índice de Forma	45
2.3.4. Adesividade	49
2.3.5. Equivalente de Areia (EA).....	51
2.3.6. Densidade Aparente e Absorção do Agregado Graúdo	54
2.3.7. Densidade Real do Agregado Miúdo.....	55
2.4. CONCRETO ASFÁLTICO	56
2.5. LABORATÓRIOS PARTICIPANTES DO PROGRAMA	
INTERLABORATORIAL DA REDE ASFALTO N/NE	57
2.5.1. Universidade Federal do Amazonas (UFAM)	58
2.5.2. Universidade Federal do Pará (UFPA)	59
2.5.3. Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).....	59
2.5.4. Universidade Federal do Ceará (UFC)	59
2.5.5. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)	60
2.5.6. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).....	60
2.5.7. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).....	60
2.5.8. Universidade Federal da Bahia (UFBA).....	61
2.5.9. Universidade Federal de Sergipe (UFS)	61
CAPÍTULO 3.....	62
MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	62
3.1.1. Agregados	62
3.1.2. Cimento Asfáltico de Petróleo	63
3.1.3. Mistura Asfáltica Solta	63
3.2. METODOLOGIA	67

CAPÍTULO 4.....	70
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	70
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	71
4.1.1. Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo:	
DNER-ME 081/98	71
Densidade Aparente (Brita ¾'').....	71
Densidade Real (Brita ¾'').....	75
Absorção (Brita ¾'').....	78
Densidade Aparente (Brita 3/8'')	82
Densidade Real (Brita 3/8'').....	85
Absorção (Brita 3/8'').....	88
4.1.2. Abrasão Los Angeles	92
4.1.3. Índice de Forma	94
4.1.4. Determinação da Densidade Real – Agregado Miúdo: DNER-ME 084/95 98	
4.1.5. Equivalente de Areia (EA).....	101
4.1.6. Análise Granulométrica	105
Granulometria da Brita ¾'')	106
Granulometria da Brita 3/8'')	108
Granulometria do Pó-de-Pedra	110
4.2. VERIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL	112
4.2.1. Densidade Aparente (Brita ¾'').....	112
4.2.2. Densidade Real (Brita ¾'').....	114
4.2.3. Absorção (Brita ¾'').....	115
4.2.4. Densidade Real (pó-de-pedra)	117
4.2.5. Volume de vazios (Vv) de Corpos de Prova (CP).....	118
4.2.6. Densidade Aparente de Corpos de Prova (G_{mb}).....	119
4.3. MISTURA ASFÁLTICA SOLTA.....	121
4.4. DOSAGEM MARSHALL.....	129
4.4.1. Determinação da Curva Granulométrica de Projeto	137
CAPÍTULO 5.....	140
CONCLUSÕES	140
5.1. Conclusões Principais	140
5.2. Conclusões Secundárias	142
5.3. Sugestões para Futuras Pesquisas	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
ANEXO.....	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelo de distribuição Normal	22
Figura 2.2. Ilustração da dispersão de 16 pares de resultados.....	25
Figura 2.3. Elipse de confiança: (a) situação ideal, onde há predominância de erros aleatórios; (b) somente com erros sistemáticos	25
Figura 2.4. Pontos alinhados próximos à linha de 45°	26
Figura 2.5. Disposição dos pares de resultados no plano cartesiano.....	29
Figura 2.6. Disposição dos resultados no plano cartesiano após retirada dos Laboratórios 1 e 14	29
Figura 2.7. Modelo representativo de uma elipse de confiança (adaptado de Olivieri, 2004)...	33
Figura 2.8. Indicação dos tipos de erros possíveis no gráfico da elipse de confiança	33
(adaptado de FORTES et al., 2004)	33
Figura 2.9. Erros de caráter sistemáticos e aleatórios associados a suas fontes.....	34
(adaptado de OLIVIERI, 2004).....	34
Figura 2.10. Gráfico representativo do z-score	35
Figura 2.11. Análise dos resultados do ensaio de viscosidade do PIL do IBP.....	40
(adaptada de AZEVEDO et al., 2004)	40
Figura 2.12. Granulometria de material pétreo	42
Figura 2.13. Etapas do ensaio de granulometria: (a) quarteamento da amostra a ser ensaiada; (b) série de peneiras por onde passarão os agregados; (c) limpeza das peneiras com a escova e (d) frações obtidas ao final do ensaio	42
Figura 2.14. Ensaio Los Angeles: (a) carga abrasiva e agregados antes do ensaio; (b) ao final do ensaio e (c) limpeza das esferas com escova para retirar os finos aderentes	44
Figura 2.15. Ensaio Los Angeles: (a) peneiramento do material com a peneira de 1,7mm; (b) descarte do material passante e (c) lavagem do material retido na peneira de 1,7mm.....	44
Figura 2.16. Modelo de um Caliper para determinação do percentual de partículas chatas e alongadas.....	46
Figura 2.17. Ensaio de índice de forma: (a) posicionamento da partícula na menor abertura e (b) posicionamento da partícula na maior abertura.....	47
Figura 2.18. Ensaio de índice de forma: (a) amostras a serem ensaiadas (frações retidas nas peneiras 1/2” e 3/8”) e (b) medição das partículas	49
Figura 2.19. Ensaio de adesividade: (a) agregados cobertos por água destilada e (b) agregados ao final do ensaio	51
Figura 2.20. Ensaio de Equivalente de Areia: (a) umedecimento, (b) peneiramento e (c) verificação da existência de finos sobre os agregados graúdos.....	52
Figura 2.21. Ensaio de Equivalente de Areia: (a) secagem dos agregados graúdos, (b) atrito entre as mãos e os agregados, a fim de eliminar os finos e (c) verificação da existência de finos sobre os agregados graúdos.....	53
Figura 2.22. Densidade aparente e absorção: (a) pesagem inicial; (b) lavagem sobre a peneira nº4; (c) secagem em estufa até massa constante; (d) imersão por 24h; (e) secagem da superfície do agregado com um pano absorvente e (f) pesagem imersa.....	54

Figura 2.23. Ensaio de densidade real do agregado miúdo: (a) amostra inicial de 500g; (b) picnômetro mais amostra seca; (c) picnômetro mais amostra mais água para aquecimento e (d) aquecimento do conjunto picnômetro mais amostra mais água	55
Figura 2.24. Ensaio de densidade real do agregado miúdo: (a) enchimento do picnômetro com água destilada até a marca de referência; (b) limpeza do picnômetro para pesagem; (c) retirada da amostra de dentro do picnômetro e (d) enchimento do picnômetro com água destilada	56
Figura 2.25. Universidades integrantes da REDE ASFALTO N/NE	57
Figura 3.1. Localização da pedreira de Itaitinga	62
Figura 3.2. Amostras: (a) coleta; (b) homogeneização e quarteamento; (c) pesagem e (d) etiquetagem dos agregados	63
Figura 3.3. Curva granulométrica e granulometria dos agregados	64
Figura 3.4. Preparação das amostras de mistura asfáltica solta: (a) controle peneira a peneira dos agregados; (b) ligante aquecido a 165°C; (c) resfriamento e preparação das amostras e (d) amostras ensacadas	65
Figura 3.5. Gráfico da viscosidade <i>versus</i> temperatura do CAP 50/70 utilizado.....	65
Figura 4.1. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/4”	71
Figura 4.2. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/4”, após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	72
Figura 4.3. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2.....	73
Figura 4.4. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 2.....	74
Figura 4.5. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/4”	76
Figura 4.6. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/4” após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	77
Figura 4.7. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001 para o ensaio de densidade real da brita 3/4”: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	77
Figura 4.8. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 2.....	78
Figura 4.9. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de absorção da brita 3/4”	79
Figura 4.10. Gráfico do z-score para o ensaio de absorção da brita 3/4”, após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6	80
Figura 4.11. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6.....	80
Figura 4.12. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6	81
Figura 4.13. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/8”	83
Figura 4.14. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/8” após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	84
Figura 4.15. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2.....	85

Figura 4.16. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 02	85
Figura 4.17. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/8''	86
Figura 4.18. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/8'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	87
Figura 4.19. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	88
Figura 4.20. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 1	88
Figura 4.21. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de absorção da brita 3/8''	89
Figura 4.22. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de absorção da brita 3/8'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	90
Figura 4.23. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	91
Figura 4.24. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 2	91
Figura 4.25. Gráfico do z-score para o ensaio de Abrasão Los Angeles	92
Figura 4.26. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de Abrasão Los Angeles após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7	93
Figura 4.27. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7	94
Figura 4.28. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7	94
Figura 4.29. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de índice de forma da brita 3/4''	95
Figura 4.30. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de índice de forma após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 3, 4 e 6	96
Figura 4.31. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 3, 4 e 6	97
Figura 4.32. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos resultados pelos Laboratórios 4 e 6	97
Figura 4.33. Gráfico do z-score para o ensaio de densidade real do pó-de-pedra	99
Figura 4.34. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real do pó-de-pedra após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8	100
Figura 4.35. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8	101
Figura 4.36. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8	101
Figura 4.37. Gráfico do z-score para o ensaio de Equivalente de Areia do pó-de-pedra	102
Figura 4.38. Gráfico do z-score para o ensaio de Equivalente de Areia do pó-de-pedra após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6	103
Figura 4.39. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6	104

Figura 4.40. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6.....	104
Figura 4.41. Granulometria brita ¾'': (a) peneira 19,1mm e (b) peneira 12,5mm	106
Figura 4.42. Granulometria brita ¾'': (a) peneira 9,5mm e (b) peneira 4,76mm	106
Figura 4.43. Granulometria brita ¾'': (a) peneira 2,00mm e (b) peneira 0,42mm	107
Figura 4.44. Granulometria brita ¾'': (a) peneira 0,18mm e (b) peneira 0,075mm	107
Figura 4.45. Granulometria brita 3/8'': (a) peneira 9,5mm e (b) peneira 4,76mm	108
Figura 4.46. Granulometria brita 3/8'': (a) peneira 2,0mm e (b) peneira 0,042mm	108
Figura 4.47. Granulometria brita 3/8'': (a) peneira 0,18mm e (b) peneira 0,075mm	109
Figura 4.48. Granulometria Pó-de-Pedra: (a) peneira 9,5mm e (b) peneira 4,76mm	110
Figura 4.49. Granulometria Pó-de-Pedra: (a) peneira 2,00m e (b) peneira 0,42mm.....	110
Figura 4.50. Granulometria do Pó-de-Pedra: (a) peneira 0,18mm e (b) peneira 0,075mm	111
Figura 4.51. Histograma para o ensaio de densidade aparente do agregado graúdo gerado pelo SPSS.....	114
Figura 4.52. Histograma para o ensaio de densidade real da brita ¾'' gerado pelo SPSS.....	115
Figura 4.53. Histograma para o ensaio de absorção da brita ¾'' gerado pelo SPSS	117
Figura 4.54. Histograma para o ensaio de densidade real do pó-de-pedra gerado pelo SPSS .	118
Figura 4.55. Histograma para a determinação do Vv do CP gerado pelo SPSS	119
Figura 4.56. Histograma para os valores de G_{mb} gerado pelo SPSS.....	121
Figura 4.57. Mediana das G_{mb} obtidas pelos oito laboratórios e pela UFC.....	122
Figura 4.58. Mediana dos Vv (%) obtidos pelos oito laboratórios e pela UFC	122
Figura 4.59. CPs compactados: (a) pelo Laboratório 7 e (b) pelos demais laboratórios.....	126
Figura 4.60. Mediana das G_{mb} 's obtidas pelos oito laboratórios e pela UFC, após repetição da pesagem pelo Laboratório 7	127
Figura 4.61. Mediana dos Vv's obtidos pelos oito laboratórios e pela UFC, após repetição da pesagem pelo Laboratório 7	127
Figura 4.62. Teores de ligante testados pelos nove laboratórios.....	129
Figura 4.63. Volume de vazios (Vv's) obtidos para os diversos teores testados pelos nove laboratórios.....	129
Figura 4.64. Faixa C do DNIT para Concreto Asfáltico (CA) e curvas granulométricas de projeto obtidas pelos nove laboratórios participantes	137
Figura 4.65. Análise granulométrica peneiras: 12,5mm; 9,5mm; 4,76mm e 2,0mm.....	138
Figura 4.66. Análise granulométrica peneiras: 0,42mm; 0,18mm; e 0,075mm	139
Figura 5.1. Situaçãodo grupo de laboratórios antes do programa interlaboratorial	145
Figura 5.2. Situaçãodo grupo de laboratórios depois do programa interlaboratorial	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Laboratórios participantes da REDE ASFALTO N/NE.....	11
Tabela 2.1. Dados gerados aleatoriamente para a construção de uma elipse de confiança.....	29
Tabela 2.2. Tabela de probabilidade da distribuição normal circular (Yoüden, 1959)	30
Tabela 2.3. Valores críticos para o teste de <i>Dixon</i> (adaptado da ISSO 5725-1986)	38
Tabela 2.4. Valores críticos para o teste de <i>Cochran</i> (adaptado da ISO 5725-1986)	39
Tabela 3.1. Parâmetros de dosagem Marshall (75 golpes por face).....	66
Tabela 4.1. Densidade aparente da brita 3/4''	71
Tabela 4.2. Densidade aparente da brita 3/4'' após correções dos Laboratórios 1 e 2	72
Tabela 4.3. Densidade real da brita 3/4''	75
Tabela 4.4. Densidade real da brita 3/4'' após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 276	
Tabela 4.5. Resultados do ensaio de absorção da brita 3/4''	78
Tabela 4.6. Resultados do ensaio de absorção da brita 3/4'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6	79
Tabela 4.8. Densidade aparente da brita 3/8'' após repetições dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2.....	84
Tabela 4.9. Densidade real da brita 3/8''	86
Tabela 4.10. Densidade real da brita 3/8'' após repetições dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	87
Tabela 4.11. Absorção (%) da brita 3/8''	89
Tabela 4.12. Absorção (%) da brita 3/8'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2	90
Tabela 4.13. Resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles da brita 3/4''	92
Tabela 4.14. Análise dos resultados de abrasão Los Angeles da brita 3/4'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7	93
Tabela 4.15. Resultados do ensaio de índice de forma da brita 3/4''	95
Tabela 4.16. Índice de forma após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 3, 4 e 6.....	96
Tabela 4.17. Densidade real do pó-de-pedra.....	99
Tabela 4.18. Densidade real do pó-de-pedra após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8	100
Tabela 4.19. Ensaio de equivalente de areia do pó-de-pedra	102
Tabela 4.20. Ensaio de Equivalente de Areia do pó-de-pedra após repetições dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6	103
Tabela 4.21. Primeira parte da granulometria da brita 3/4'' (peneiras de 19,1mm a 4,76mm)..	106
Tabela 4.22. Segunda parte da granulometria da brita 3/4'' (peneiras de 2,00mm a 0,075mm)	107
Tabela 4.23. Primeira parte da granulometria da brita 3/8'' (peneiras de 9,5mm a 0,42mm) .	108
Tabela 4.24. Segunda parte da granulometria da brita 3/8'' (peneiras de 0,18 e 0,75mm).....	109
Tabela 4.25. Primeira parte da granulometria do Pó-de-Pedra (peneiras de 9,5mm a 0,42mm)	110

Tabela 4.26. Segunda parte da granulometria do Pó-de-Pedra (peneiras de 0,18mm a 0,075mm)	111
Tabela 4.27. Valores de densidade aparente da brita ¾’’	113
Tabela 4.28. Medidas de tendência central e de dispersão para o ensaio de densidade aparente da brita ¾’’	113
Tabela 4.29. Teste de normalidade para o ensaio de densidade aparente da brita ¾’’ gerado pelo programa SPSS	113
Tabela 4.30. Valores de densidade real da brita ¾’’	114
Tabela 4.31. Medidas de tendência central e de dispersão para o ensaio de densidade real da brita ¾’’	114
Tabela 4.32. Teste de normalidade para o ensaio de densidade real da brita ¾’’ gerado pelo programa SPSS	115
Tabela 4.33. Valores obtidos no ensaio de absorção da brita ¾’’	116
Tabela 4.34. Medidas de tendência central e de dispersão para a absorção da brita ¾’’	116
Tabela 4.35. Teste de normalidade para o ensaio de absorção da brita ¾’’ gerado pelo programa SPSS	116
Tabela 4.36. Valores de densidade real do pó-de-pedra.....	117
Tabela 4.37. Medidas de tendência central e de dispersão para a densidade real do pó-de-pedra	117
Tabela 4.38. Valores de densidade real do pó-de-pedra gerado pelo programa SPSS.....	118
Tabela 4.39. Valores de Vv (%).....	118
Tabela 4.40. Medidas de tendência central e de dispersão para a determinação do Vv.....	119
Tabela 4.41. Teste de normalidade para a determinação do Vv dos CPs gerado pelo programa SPSS.....	119
Tabela 4.42. Valores de G_{mb} dos CPs.....	120
Tabela 4.43. Medidas de tendência central e de dispersão para os valores de G_{mb}	120
Tabela 4.44. Teste de normalidade para os valores de G_{mb} gerado pelo programa SPSS	120
Tabela 4.44. Comparação dos cálculos de DMT, Vv e RBV entre o Laboratório 4 e a UFC..	132
Tabela 4.45. Comparação dos cálculos de DMT, Vv e RBV entre o Laboratório 6 e a UFC..	133
Tabela 4.46. Verificação dos cálculos para o teor de 6,0% e DMT igual a 2,436	133
Tabela 4.47. Volume de vazios (Vv) antes e depois da correção da DMT	134
Tabela 4.48. Comparação dos cálculos dos parâmetros (DMT, Vv e RBV) entre o Laboratório 8 e a UFC	135
Tabela 4.49. Comparação dos cálculos dos parâmetros (DMT, Vv e RBV) entre o Laboratório 8 e a UFC, usando os novos valores de densidade real do Laboratório 8	136
Tabela 4.50. Análise das curvas granulométricas de projeto dos nove laboratórios	138

LISTA DE SÍMBOLOS

G_{mb}	Densidade Aparente do Corpo de Prova Compactado segundo a Norma DNER-ME 117/94
D_r	Densidade Real
G_{mm}	<i>Theoretical Maximum Specific Gravity</i>
P_{SSS}	Peso da Amostra em Condição de Superfície Seca Saturada

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
D	Diâmetro do Corpo de Prova
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
h	Altura do Corpo de Prova
HMA	<i>Hot Mixture Asphalt</i>
Lab	Laboratório
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
RBV	Relação Betume-Vazios
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFS	Universidade Federal de Sergipe
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios com Betume
Vv	Volume de Vazios

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com grandes possibilidades de crescimento econômico nos próximos anos, sendo a infraestrutura viária uma das prioridades dos investimentos governamentais. O estado de conservação desse tipo de infraestrutura tem relação direta com os custos operacionais dos veículos, influenciando o preço final dos produtos e serviços comercializados. De acordo com a análise socioeconômica das rodovias efetuada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2009, o custo de operação dos veículos de carga é 28,0% maior do que seria se todas as rodovias apresentassem um pavimento de ótima qualidade. Neste *ranking* a região mais prejudicada é a Norte, com aumento de 40,6% nos custos operacionais, seguida pela região Nordeste, com 33,1%. Enquanto a menos afetada é a região Sul, que alcança o patamar de 19,3% de aumento nos custos de operação dos veículos. Estima-se que o investimento mínimo necessário para reconstrução, restauração e manutenção dos trechos pesquisados é de 32 bilhões de reais (CNT, 2009; IPEA, 2010).

A pesquisa de rodovias da CNT, versão 2009, avaliou 89.552km de rodovias federais, estaduais e consseccionadas no país. Foi constatado que 43,4% dos trechos estão com a superfície de rolamento totalmente perfeita, 33,1% estão desgastados, 17,8% estão com trincas em malha e remendo; 4,6% com afundamentos, ondulações ou buracos e 1,1% totalmente destruídos. De maneira resumida, 54,2% (48.599km) das rodovias estudadas apresentaram-se em estado de conservação regular, ruim ou péssimo; 63,9% (57.240km) apresentam sinalização com algum tipo de problema; 46,3% (41.435km) não possuem acostamento; 4,6% (4.144km) apresentam afundamento, ondulação e buraco; 88,9% (79.631km) são pistas simples de mão-dupla (CNT, 2009).

Ainda de acordo com a CNT (2009), as regiões Norte e Nordeste (N/NE) apresentaram uma situação desfavorável quando comparadas à já deficiente situação das demais regiões. Estas regiões apresentaram, respectivamente, 93,6% e 78,2% das rodovias em estado regular, ruim ou péssimo. Com relação a alguns estados das regiões N/NE, encontraram-se os seguintes percentuais de pavimentos em situação regular,

ruim ou péssima: Amazonas (100%); Pará (97,8%); Maranhão (79,7%); Ceará (82,2%); Rio Grande do Norte (76,5%); Paraíba (85,0%); Pernambuco (86,3%); Sergipe (88,8%) e Bahia (75,0%) (CNT, 2009).

Estes nove estados citados das regiões N/NE fazem parte da REDE Cooperativa de Pesquisa em Asfalto, que é um arranjo cooperativo composto por um grupo de nove instituições brasileiras (Tabela 1.1) coordenado pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC). A missão da referida REDE é auxiliar na montagem de infra-estrutura física e de pessoal, para que esses grupos possam contribuir para atender às demandas locais referentes à pavimentação. Desde 2006, a REDE ASFALTO N/NE desenvolve cinco Projetos Cooperativos (PC) que englobam diversas áreas da pavimentação: ligantes asfálticos (PC-01), misturas asfálticas (PC-02), solos (PC-03), modelagem computacional (PC-04) e gerência de pavimentos/automação (PC-05).

Tabela 1.1. Laboratórios participantes da REDE ASFALTO N/NE

Laboratório	Universidade	Cidade	Estado
Grupo de Geotecnia	UFAM	Manaus	AM
Laboratório de Solos e Asfalto	UFPA	Belém	PA
Laboratório de Solos e Pavimentação	UEMA	São Luís	MA
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos	UFC	Fortaleza	CE
Laboratório de Asfalto	UFRN	Natal	RN
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil	UFCE	Campina Grande	PB
Laboratório de Pavimentos	UFPE	Recife	PE
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação	UFS	São Cristóvão	SE
Laboratório de Geotecnia	UFBA	Salvador	BA

Os estudos de misturas asfálticas no Brasil, tanto relativos à dosagem quanto à caracterização mecânica, têm apresentado, com frequência, uma inconsistência nos resultados (falta de repetibilidade ou reprodutividade). Observam-se diferenças quando se consideram os mesmos materiais caracterizados em laboratórios diferentes (FORTES *et al.*, 2004). Além disso, é ainda observada a ocorrência de resultados distintos entre os parâmetros volumétricos de dosagem e propriedades mecânicas obtidos em campo e em laboratório (FRITZEN *et al.*, 2008). Dessa maneira, para a obtenção de resultados compatíveis entre diferentes laboratórios, programas de comparações interlaboratoriais podem ser estabelecidos.

Um programa interlaboratorial consiste em uma série de medições de uma ou mais propriedades, realizadas independentemente, por um grupo de laboratórios, em amostras de um mesmo material, utilizando a mesma metodologia. Esse tipo de programa costuma ser organizado com o intuito de verificar a consistência das atividades de um laboratório, definindo-se, assim, um indicador de qualidade e competência na realização dos ensaios.

Dentre os projetos da REDE N/NE citados anteriormente, o PC-02 visa definir metodologias de dosagem e ensaios em misturas asfálticas, e ainda estudar o emprego de rejeitos ambientais como materiais para pavimentação. Este PC possui diversos objetivos e suas atividades estão divididas entre as nove universidades participantes. Seu objetivo geral é a definição de metodologias de dosagem e o estudo dos métodos de ensaios utilizados para caracterização mecânica de misturas asfálticas. Uma das ações do PC-02 é a padronização dos métodos de ensaios necessários à caracterização de materiais e à dosagem de misturas asfálticas, por meio da implantação de um programa interlaboratorial.

A dissertação ora apresentada é relativa ao programa interlaboratorial realizado entre as nove universidades participantes da REDE ASFALTO N/NE. O programa visa incentivar os laboratórios com relação a: (i) melhoria da confiabilidade metrológica de seus resultados, (ii) melhoria e reavaliação de seus experimentos e (iii) verificação da influência dos operadores dos equipamentos e da metodologia de ensaio nos resultados experimentais e na produção de medidas imprecisas.

Nesse contexto, o objetivo principal do presente trabalho é implantar um programa interlaboratorial para caracterização de agregados e dosagem de misturas asfálticas dentro da REDE ASFALTO N/NE e utilizar os resultados como ferramenta para uniformizar os procedimentos dos laboratórios participantes. Espera-se, ainda, que os resultados sejam úteis para uma rede nacional, ora em formação, entre os diversos laboratórios de universidades e centros de pesquisa do país, denominada REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, que é uma iniciativa patrocinada pela Petrobras.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo principal a busca pela uniformidade dos ensaios de caracterização de agregados e dosagem Marshall de misturas asfálticas da REDE ASFALTO N/NE, melhorando a confiabilidade metrológica dos seus resultados.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Capacitar os laboratórios quanto à realização de ensaios de caracterização de agregados e o procedimento de dosagem Marshall para misturas asfálticas;
- Obter informações a respeito da influência dos equipamentos, operadores e metodologias utilizados nos resultados dos ensaios para caracterização dos agregados, na dosagem Marshall e no comportamento mecânico das misturas;
- Verificar se os métodos estatísticos disponíveis estão adequados para programas interlaboratoriais relacionados à pavimentação e, caso não estejam, propor melhorias;
- Analisar os pares de resultados dos ensaios gerados pelos nove laboratórios a partir dos métodos estatísticos da Elipse de Confiança e do z-score robusto;
- Identificar valores dispersos por meio dos testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran* e correlacionar os resultados com possíveis causas;
- Verificar se as propriedades densidade real, densidade aparente e absorção de agregados graúdos, densidade real de agregados miúdos, bem como volume de vazios e densidade aparente de Corpos de Prova, podem ser consideradas com distribuição normal e avaliar sobre a adequação da utilização da estatística paramétrica ou não-paramétrica durante as análises.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho encontra-se organizado conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: apresenta uma perspectiva geral de onde o presente trabalho se insere no atual contexto da engenharia rodoviária, bem como os objetivos da dissertação;

- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica a partir dos principais trabalhos que já foram publicados referentes ao tema em questão, principalmente abordando programas interlaboratoriais, análises estatísticas, caracterização de agregados e dosagem de misturas asfálticas;

- Capítulo 3: aborda a obtenção dos materiais utilizados nessa pesquisa (britas 3/8” e 3/4”, pó-de-pedra e ligante asfáltico) e a metodologia de caracterização de agregados e dosagem Marshall das misturas asfálticas utilizadas. Além disso, são abordadas questões relacionadas à metodologia adotada no programa interlaboratorial;

- Capítulo 4: apresenta os resultados dos ensaios realizados por cada instituição, a análise estatística e a discussão dos mesmos;

- Capítulo 5: traz as conclusões (principais e secundárias) obtidas desse estudo e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROGRAMA INTERLABORATORIAL

Ensaio de proficiência são um conjunto de procedimentos técnicos para a determinação do desempenho de laboratórios, em processos de calibração ou em ensaios, por meio de comparações interlaboratoriais. Um programa interlaboratorial consiste na organização, realização e avaliação de ensaios em produtos ou materiais idênticos ou similares, por laboratórios diferentes, sob condições pré-determinadas (ABNT ISO/IEC GUIA 43, 1999). Um programa interlaboratorial pode ter diferentes objetivos: (i) avaliação de métodos de ensaios, (ii) verificação do desempenho de laboratórios, (iii) certificação de materiais de referência e/ou (iv) compatibilização de resultados obtidos por dois ou mais laboratórios (OLIVIERI, 2004). A participação de um laboratório em programas interlaboratoriais é um indicativo de sua competência para a realização de determinados ensaios, sendo, portanto, parte integrante do processo de avaliação e credenciamento do laboratório pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) (FORTES *et al.*, 2001).

O INMETRO é o órgão responsável pela certificação de laboratórios no Brasil. Ele possui inúmeras atribuições, destacando-se a planejar e executar as atividades de acreditação de laboratórios de calibração e de ensaios, de provedores de ensaios de proficiência, de organismos de certificação e de outros. Seu objetivo é promover o desenvolvimento da infraestrutura de serviços tecnológicos no país. Orienta ainda os laboratórios na seleção, na qualificação e na utilização de programas de ensaio de proficiência, recomendando que estes sejam organizados de acordo com as disposições contidas no ABNT ISO/IEC guia 43. O fato de um laboratório poder comparar o seu desempenho com outros laboratórios com características semelhantes contribui para a implantação de ações preventivas visando a melhoria dos seus procedimentos (INMETRO, 2009).

Para o desenvolvimento de um programa interlaboratorial, é necessário o cumprimento das seguintes etapas:

- (i) Definição do cronograma e dos ensaios;
- (ii) Divulgação e convite aos laboratórios participantes;
- (iii) Coleta e preparação das amostras;
- (iv) Verificação da uniformidade das amostras;
- (v) Embalagem, identificação e envio das amostras;
- (vi) Recebimento das amostras pelos laboratórios participantes e execução dos ensaios;
- (vii) Recebimento dos resultados, análise e interpretação; e
- (viii) Emissão de relatórios.

A partir da síntese da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para métodos de ensaios interlaboratoriais publicados em 2010, os parâmetros considerados para os ensaios de laboratório são: (i) materiais – deve haver um mínimo de dois materiais que representam o intervalo de interesse da propriedade que está sendo testada. As amostras devem ser cuidadosamente homogeneizadas. Sempre que possível, os valores para cada material devem ser estabelecidos por métodos alternativos para determinar se existem variações entre o método proposto e o método de referência nos diferentes níveis da propriedade; (ii) laboratórios – deve haver um mínimo de cinco laboratórios participantes; (iii) operadores – um mínimo de dois operadores dentro de cada laboratório é recomendado; porém, ensaios com um único operador são aceitáveis; (iv) amostras – deve haver no mínimo duas amostras a serem ensaiadas por cada operador, em cada laboratório, de cada material. O número de amostras ensaiadas por operador deve ser estabelecido a partir da variação determinada pelo ensaio; (v) equipamento – este efeito não deve ser incluído na análise estatística. Quando múltiplos equipamentos são utilizados dentro do laboratório, deve ser verificado se existem diferenças entre os mesmos. Se existirem, utilizar amostras padrões conhecidas para obtenção do fator de correção (AATCC, 2010).

No âmbito dos ensaios de laboratório, precisão é o termo utilizado para descrever a variação entre ensaios repetitivos (FORTES *et al.*, 2004). A precisão tem

como base o desvio padrão de uma série de repetições da mesma análise. Ela pode ser dividida em repetitividade e reprodutibilidade. A primeira consiste no grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas, de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições. Reprodutibilidade refere-se às medições de uma mesma grandeza, onde as medições individuais são efetuadas variando-se uma ou mais das seguintes condições: método, observador, equipamento, instrumento de medida, local, condições de utilização e tempo (BARTHEM e BERTULANI, 2009).

De acordo com OLIVIERI (2004), um programa interlaboratorial não tem como objetivo aprovar ou reprovar determinado laboratório com relação à execução de um determinado ensaio, mas sim proporcionar a possibilidade de aprender com os resultados. Apresentar um desempenho satisfatório ou insatisfatório no ensaio, não significa dizer que o laboratório é bom ou ruim. O resultado insatisfatório precisa ser avaliado e lições aprendidas de modo que não haja reincidência do erro.

Na comunidade européia, o órgão responsável pela acreditação de laboratórios é a *European Co-Operation for Accreditation* (EA); nos Estados Unidos, o organismo acreditador é a *American Association for Laboratory Accreditation* (A2LA); na Austrália, encontra-se a *National Association of Testing Authorities* (NATA) e na África do Sul o *South African National Accreditation System* (SANAS) (A2LA, 2009; EA, 2009; NATA, 2009; SANAS, 2009).

Desde 1965, a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e *AASHTO Materials Reference Laboratory* (AMRL) organizam um programa de avaliação de laboratórios para caracterização de solos, agregados, misturas asfálticas, emulsões asfálticas, dentre outros materiais para pavimentação. O programa da AMRL se propõe a avaliar o desempenho e a competência do laboratório; promover melhorias na realização de ensaios laboratoriais e na confiabilidade dos serviços prestados pelos laboratórios. Em 1998, a *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux* (RILEM) iniciou um programa interlaboratorial envolvendo laboratórios da Europa, dos Estados Unidos e da África do Sul. Este programa foi concebido para avaliação do desempenho de pavimentos, em longo prazo, sob condições climáticas adversas, por meio de ensaios de trilha de roda e vida de fadiga. O RILEM também organiza ensaios interlaboratoriais em ligantes asfálticos,

além de dosagem e caracterização mecânica de misturas asfálticas (PARTL e PIBER, 2002).

O PTA (*Proficiency Testing Australia*), realizado em 2006, apresentou um resumo dos resultados da quarta etapa de uma série de ensaios de proficiência para a análise de agregados. O objetivo do programa foi avaliar a capacidade dos laboratórios com competência para realizar os ensaios propostos. Participam do programa 30 laboratórios da Austrália, realizando os ensaios de: material fino passante na peneira de 0,075mm, granulometria, lamelaridade utilizando o dispositivo *caliper*, densidade de agregados com a superfície seca saturada, densidade aparente, densidade dos agregados secos e absorção de água. Para a análise dos resultados são utilizados procedimentos de estatística robusta. Dessa forma, o z-score robusto foi calculado para cada laboratório baseado nos resultados dos ensaios, porém este não foi calculado para os ensaios de granulometria e de lamelaridade. Para estes ensaios foram estabelecidos limites inferiores e superiores de tolerância (PTA, 2006).

No que diz respeito à pavimentação, têm sido desenvolvidos no Brasil programas interlaboratoriais de misturas asfálticas coordenados pelo Laboratório de Engenharia e Consultoria (LENC) de São Paulo, desde 1999, a fim de verificar o desempenho dos laboratórios de ensaios (instrumental e operacional) quanto à compatibilidade dos resultados (FORTES *et al.*, 2004). O LENC foi criado no ano de 1975, em Araraquara-SP, pelos engenheiros Douglas F. Villibor e Job S. Nogami, com o objetivo de pesquisar e difundir as novas soluções para a melhoria da qualidade técnica dos serviços de pavimentação e redução de custos. Hoje, o LENC tem sede em Cotia-SP e filiais em São Paulo, Belo Horizonte e Araraquara. Possui cerca de 400 colaboradores e atua em todo o Brasil. A partir da década de 90, a empresa ampliou seu campo de atuação, abrangendo as áreas de: (i) Engenharia de Tráfego; (ii) Projetos; (iii) Controle de Qualidade; (iv) Integração Digital; (v) Consultoria; (vi) Meio Ambiente e Geotecnia; (vii) Gerenciamento e (viii) Supervisão de Obras. Além disso, o LENC é acreditado pela ISO 9001 e pela ISO/IEC 17025 em várias áreas de atuação (LENC, 2010).

De acordo com FORTES *et al.* (2004), os resultados dos ensaios do interlaboratorial de misturas asfálticas promovido pelo LENC foram analisados

estatisticamente por meio de três ferramentas: (i) elipse de confiança, com o uso do programa INTERLAB2001, (ii) técnica do z-score e (iii) Coeficiente de Variação (CV), a fim de verificar a dispersão dos resultados com relação ao valor médio. Ao longo dos cinco anos de interlaboratorial, foram distribuídas aos laboratórios participantes duas amostras contendo 7kg de mistura asfáltica solta para a realização dos seguintes ensaios: (i) Mistura Betuminosa – Ensaio Marshall (DNER ME 043/95); (ii) Mistura Betuminosa – Porcentagem de Betume (DNER ME 053/94); (iii) Mistura Betuminosa – Densidade (DNER ME 117/94) e, nos anos de 2001 e 2003, (iv) Determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral (DNER ME 138/94). Para a realização da análise dos resultados deste programa, os laboratórios certificados pelo INMETRO foram separados daqueles que não eram certificados. Dessa maneira, observou-se que, de maneira geral, os laboratórios certificados obtiveram melhor desempenho. Em 2002, foi observada a ocorrência de CV mais baixo tanto para os laboratórios certificados quanto para os não certificados, devido a um treinamento realizado com todos os laboratórios participantes.

Desde 1989, o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP) promove o Programa Interlaboratorial de Lubrificantes (PIL), envolvendo 24 laboratórios de análise de petróleo e derivados, com o objetivo de compatibilizar os ensaios que utilizam uma mesma técnica analítica, em amostras semelhantes. O programa consiste na realização de três repetições de ensaios por ano, onde são analisadas amostras de óleos lubrificantes industriais, automotivos e graxas lubrificantes. O método estatístico utilizado é o prescrito na norma ASTM E 691/09, *Standard Practice for Conducting and Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*, a partir do qual é possível verificar a repetibilidade e a reprodutibilidade dos resultados. A partir de 1997, quando foi verificado que a repetibilidade dos participantes se mantinha constante, os resultados das análises passaram a ser tratados utilizando-se os conceitos da estatística robusta, focando na determinação da reprodutibilidade (AZEVEDO *et al.*, 2004).

Inácio *et al.* (2003) apresentaram os resultados do VIII Programa Interlaboratorial de Ensaios de Concreto, promovido pelo INMETRO/CTLE envolvendo 26 laboratórios. O referido programa é responsabilidade do Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S.A., que é credenciado na rede Brasileira de

Laboratórios de Ensaio do INMETRO. As ferramentas estatísticas para a análise dos resultados foram: (i) elipse de confiança (também conhecida por método de Youden); (ii) programa z-score (Estatística Robusta – Par de Amostras) e (iii) o sistema INTERLAB, que é um método cujo objetivo é quantificar a precisão de um método de ensaio, a partir da determinação dos parâmetros de incerteza dos resultados obtidos para amostras de um mesmo material, provenientes de vários laboratórios.

Chui *et al.* (2004) apresentaram a experiência da utilização de programas interlaboratoriais para determinação de contaminantes (Ca, Al, Fe, Ti e Mn) presentes em amostras de silício metálico, com a participação de 12 laboratórios. Foram distribuídos pares de amostras aos participantes, sendo permitidos que os mesmos adotassem seu método de rotina para a realização dos ensaios de fluorescência de Raios-X (FRX), de espectrometria de emissão por plasma de argônio (ICP-OES) e de espectrometria de Absorção Atômica (AA) com chama. Os resultados obtidos pelos laboratórios foram estatisticamente avaliados, usando a técnica da elipse de confiança com 95% de confiança, do z-score robusto e dos testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran*, para a análise dos valores dispersos. Os autores calcularam índices de repetitividade (r) e reprodutibilidade (R) como forma de descrever as variabilidades de um método de ensaio. O índice r indica a diferença máxima aceitável entre pelo menos dois resultados e o índice R indica a diferença máxima aceitável entre pelo menos dois resultados de laboratórios diferentes (Chui *et al.*, 2004).

2.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Existem algumas ferramentas estatísticas para a análise do desempenho de um laboratório em programas interlaboratoriais. No Brasil, podem-se encontrar programas que usam a elipse de confiança baseada nos estudos de Youden, que também é adotada pelo *National Institute of Standard and Technology* (NIST) dos Estados Unidos. Além dessa, também é encontrado em vários programas a técnica do z-score robusto, que se baseia em fundamentos de estatística robusta; a análise de variâncias (ANOVA) e os testes estatísticos de *Dixon* e *Cochran*, recomendados pela ISO 5725/86.

Ao contrário da estatística clássica, a estatística robusta é pouco influenciada por valores dispersos (*outliers*), dispensando a utilização de procedimentos para a identificação e remoção dos mesmos. A estatística robusta também é aplicável na

análise de resultados de ensaios que não apresentam comportamento segundo uma distribuição normal, o que não é aceito pela estatística clássica. Este fato é vantajoso nas análises de resultados de programas interlaboratoriais, onde é freqüente a ocorrência de distribuições não normais (OLIVIERI, 2004). Dessa maneira, a mediana de cada grupo de resultados é utilizada como estimativa do valor verdadeiro do ensaio em questão, sendo designada como referência para cada parâmetro analisado. Esta mediana é equivalente ao valor verdadeiro, tido como referência, da estatística clássica. Como medida de dispersão, equivalente ao desvio padrão da estatística clássica, utiliza-se a Amplitude Interquartílica Normalizada (IQN), que será explicada adiante.

O participante de um programa interlaboratorial deve ter consciência de que não existe um critério ideal de interpretação de resultados, bem como de avaliação de desempenho do participante, que seja válido para todas as situações. A decisão de participar de um programa interlaboratorial, que utiliza um determinado critério para a interpretação de resultados e para a avaliação do desempenho dos laboratórios, depende da finalidade do programa e, sobretudo, da credibilidade do seu organizador (OLIVIERI, 2004).

2.2.1. Distribuição Normal

A distribuição normal é uma das mais importantes distribuições de probabilidades da estatística, conhecida também como Distribuição de Gauss ou Gaussiana, e foi desenvolvida pelo matemático francês Abraham de Moivre em 1733. Quando um conjunto de dados tem uma distribuição Normal, esta é representada por um gráfico simétrico, em forma de sino (Figura 2.1) e que pode ser descrito pela função densidade de probabilidade (Equação 2.1). A equação da curva Normal é especificada utilizando dois parâmetros: (i) a média populacional, $\mu \in \mathbb{R}$ e (ii) o desvio padrão populacional, $\sigma > 0$, ou equivalente a variância populacional, σ^2 . Quando a distribuição dos dados é Normal, a média se encontra no centro da distribuição e possui o mesmo valor da mediana e da moda, devido à simetria da curva (TRIOLA, 2008).

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}, x \in \mathbb{R} \quad (2.1)$$

Para a distribuição Normal, a proporção de valores sob a curva é a seguinte: 68,26% dos valores estão dentro de um desvio padrão positivo e negativo de sua média ($\pm 1\sigma$); 95,44% dos valores estão dentro de dois desvios padrão positivos e negativos ($\pm 2\sigma$) de sua média e 99,72% dos valores estão dentro de três desvios padrão positivos e negativos ($\pm 3\sigma$) de sua média. Os valores que estão afastados três desvios padrão acima e três desvios padrão abaixo da média são considerados *outliers*.

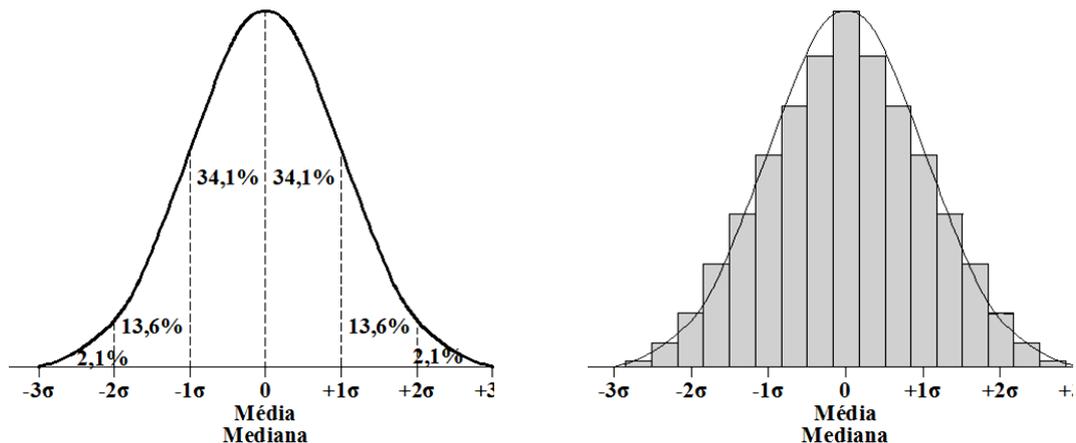


Figura 2.1. Modelo de distribuição Normal

Uma grande quantidade de métodos estatísticos supõe que os dados provêm de uma distribuição Normal, pois este fato permite que seja utilizada a maioria das técnicas de inferência estatística conhecida. Existem disponíveis alguns testes para avaliar se a distribuição de um conjunto de dados adere à distribuição Normal: *Anderson-Darling*, *Cramer-von Mises*, *Kolmogorov-Smirnov* e *Shapiro-Wilk*, além de recursos gráficos, como histograma e *normal plot*. O estudo feito por Leotti *et al.* (2005) mostra que quando se trata de dados normais, há equivalência entre os quatro testes, à exceção do critério de *Kolmogorov-Smirnov*, que se mostrou inferior. Com relação a dados com distribuição não-normal, os referidos autores concluíram que o teste de *Shapiro-Wilk* é, aparentemente, o melhor teste de aderência à normalidade. Este fato também é confirmado pelos autores Cirillo e Ferreira (2003), que referenciam os estudos dos autores do teste *Shapiro-Wilk* (Shapiro e Wilk, 1965) mostrando que, por meio de alguns estudos empíricos, esse teste é poderoso em várias situações de diferentes distribuições e tamanhos de amostras quando comparados aos resultados de outros testes, como os mencionados anteriormente.

Para a verificação da normalidade por meio dos métodos de *Shapiro-Wilk* e de *Kolmogorov-Smirnov*, pode-se utilizar o *Statistical Package for Social Sciences* (SPSS) versão 17.0 (SPSS, 2008). O SPSS é um pacote estatístico usado para a análise de dados que permite manipular, transformar, criar tabelas e gráficos que resumam a informação obtida. As suas potencialidades vão mais além do que a simples análise descritiva de um conjunto de dados. Também é possível realizar com este *software* procedimentos mais avançados como inferência estatística, teste de hipóteses e estatísticas multivariadas para dados qualitativos e quantitativos.

2.2.2. Método de Yoüden

A elipse de confiança é a técnica gráfica mais utilizada para verificar a compatibilidade entre os laboratórios e segue o método proposto por Yoüden (1959). A utilização da elipse de confiança pode trazer benefícios como: (i) redução do custo de calibração, (ii) verificação simultânea do equipamento e do operador, (iii) comparação do nível de precisão em ensaios com os laboratórios participantes, dentre outros (FORTES *et al.*, 2001). Antes de prosseguir com a explicação do método de Yoüden, se faz necessário definir alguns termos estatísticos que serão utilizados ao longo da explicação:

Erros aleatórios: são erros casuais, indicando que pode ter havido um desempenho pior em uma das amostras. Ocorrem devido à variabilidade dos resultados dentro do laboratório, podendo ter origem no fato do operador não ser devidamente treinado, e/ou devido à erros ocasionais, tais como erros de leitura, cálculo, conversão de valores ou transcrição de resultados (OLIVIERI, 2004).

Erros sistemáticos: são oriundos de condições adversas do laboratório, como por exemplo: modificações não permitidas na metodologia de ensaio ou equipamento não calibrado (OLIVIERI, 2004).

Intervalo de confiança: é um intervalo de valores, limitado por um valor mínimo e um valor máximo, usado para estimar um parâmetro desconhecido da população, de forma que permita afirmar que o verdadeiro valor do parâmetro estará contido nesse intervalo. Também pode ser definido como um intervalo de

valores usado para estimar o verdadeiro valor de um parâmetro populacional. A um intervalo de confiança, associa-se um nível de confiança (TRIOLA, 2008).

Nível de confiança: é a probabilidade de que o intervalo de confiança contenha o verdadeiro valor do parâmetro. O nível de confiança fornece a taxa de sucesso do procedimento usado para a construção do intervalo de confiança. Ele é uma probabilidade ou área $(1 - \alpha)$, que é a proporção de vezes que o intervalo de confiança realmente contém o parâmetro populacional (TRIOLA, 2008).

Nível de significância: é a probabilidade de cometer o erro de tipo I, onde: **erro de tipo I** – deve-se rejeitar a hipótese nula (H_0), quando ela é verdadeira; **erro de tipo II** – deve-se aceitar a hipótese nula (H_0), quando ela é falsa e **hipótese nula (H_0)** – é a negação da hipótese alternativa.

Região crítica (ou região de rejeição): é o conjunto de todos os valores da estatística de teste que leva a hipótese nula a ser rejeitada.

O objetivo da aplicação da técnica da elipse de confiança é a compatibilização de resultados de ensaios, verificando se os desvios encontrados são devidos a erros aleatórios ou sistemáticos. Neste método, pares de resultados (A e B) são lançados no plano cartesiano, onde os resultados das amostras A e B são alocados nos eixos x e y , respectivamente. Depois que os pontos são lançados, é traçada uma linha horizontal, paralela ao eixo x , que corresponde à mediana (ou à média) dos valores do eixo y (resultados da amostra B). Dessa maneira, a quantidade de pontos acima desta linha é igual à existente abaixo da mesma. A segunda linha é traçada na vertical, paralela ao eixo y , que corresponde à mediana (ou à média) dos valores do eixo x (resultados da amostra A) (YOÜDEN, 1959; OLIVIERI, 2004). A Figura 2.2 apresenta uma situação ilustrativa de 16 pares de resultados, onde dois pares se apresentam, evidentemente, afastados dos demais 14 e, portanto, não foram utilizados na determinação da posição das linhas das medianas.

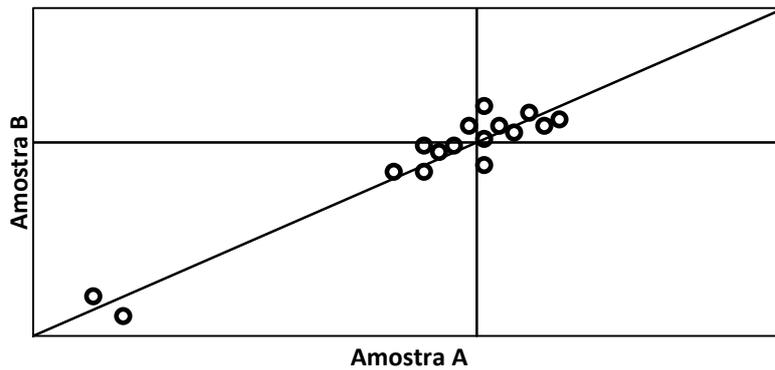


Figura 2.2. Ilustração da dispersão de 16 pares de resultados

A interseção das duas medianas (x e y) divide o espaço em quatro quadrantes. Uma situação ideal seria quando somente erros aleatórios, em níveis não significativos, de precisão do operador estivessem presentes, estando todos os pontos igualmente divididos em todos os quadrantes (Figura 2.3(a)). Isso acontece porque erros positivos e negativos devem ser igualmente prováveis. De acordo com Youden (1959), na maioria dos procedimentos por ele avaliados, os pontos tendem a se concentrar nos quadrantes superior direito e inferior esquerdo (Figura 2.3(b)). Isto significa que os laboratórios tendem a obter resultados elevados em ambas as amostras (A e B) ou resultados baixos em ambas, evidenciando a presença de erros sistemáticos entre os laboratórios, promovendo uma dispersão dos pontos com aspecto de elipse (Figura 2.3(b)).

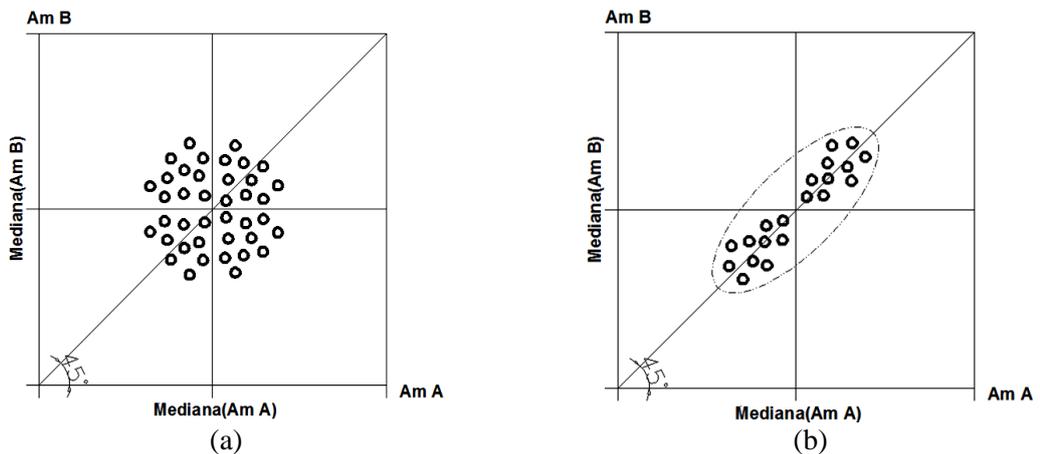


Figura 2.3. Elipse de confiança: (a) situação ideal, onde há predominância de erros aleatórios; (b) somente com erros sistemáticos

A Figura 2.4 apresenta um gráfico contendo nove pontos que foram obtidos a partir dos resultados de um ensaio de absorção em duas amostras de agregados graúdos. Observa-se que tais pontos apresentam uma tendência de dispersão em torno da linha bissetriz dos quadrantes superior direito e inferior esquerdo. De acordo com Youden

(1959), existe uma razão para esperar que a linha diagonal faça um ângulo de 45° com os eixos quando a mesma escala é utilizada para os dois eixos e as duas amostras são suficientemente semelhantes para que a dispersão dos resultados seja praticamente a mesma para cada uma.

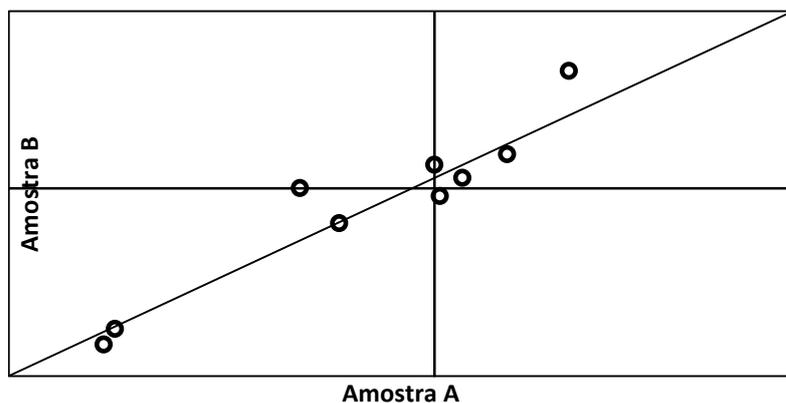


Figura 2.4. Pontos alinhados próximos à linha de 45°

Um procedimento de ensaio que resulta em situações como a apresentada na Figura 2.4 necessita de uma descrição mais cuidadosa. Aparentemente, a norma utilizada é vulnerável a modificações realizadas pelos operadores dos ensaios, refletindo em um efeito sobre os resultados. Dessa maneira, mais do que os laboratórios, as normas dos ensaios poderiam ser consideradas como uma possível fonte de dificuldades, embora esta seja exibida por uma grande dispersão entre os resultados dos diferentes laboratórios. Quando os pontos estão alinhados ao longo da linha de 45° a conclusão que pode ser tirada é que muitos dos laboratórios estão seguindo rigorosamente suas próprias versões do ensaio (YOÜDEN, 1959).

De acordo com Youden (1959), não há possibilidade de que distribuições como a apresentada na Figura 2.4 sejam decorrentes da falta de uniformidade entre as amostras de cada material. Se o material é heterogêneo, algumas amostras resultariam em resultados mais elevados, enquanto outras resultariam em valores mais baixos, e isto seria verdadeiro para o par de amostras. Os resultados dos pares de amostras distribuídas aos laboratórios seriam de quatro tipos: (i) elevado em A e B; (ii) elevado em A e baixo em B; (iii) baixo em A e elevado em B e (iv) baixo em A e B. As quatro possíveis combinações têm a mesma probabilidade de ocorrência e culminariam em resultados de ensaios aproximadamente iguais e divididos nos quatro quadrantes. A

concentração dos pontos em dois quadrantes exclui questionamentos com relação à heterogeneidade das amostras.

Interpretação dos Resultados Dispersos

Conforme já explicado, os resultados referentes aos pares de amostras do laboratório são plotados no eixo cartesiano, de maneira que cada laboratório seja representado por um ponto. Dessa forma, os pontos situados no quadrante superior direito ou no quadrante inferior esquerdo, que estão muito distantes da interseção das linhas medianas e que não estão próximos aos eixos, refletem uma tendência de se obter resultados elevados para as duas amostras ou resultados baixos para as duas amostras. O laboratório mais consistente é aquele cujo ponto está nas proximidades da linha de 45°. Um ponto afastado da interseção das medianas, mas ao longo desta linha, sugere a possibilidade de que o laboratório em questão introduziu algumas modificações no procedimento de ensaio. Um laboratório nesta situação deve verificar, cuidadosamente, a norma técnica estabelecida para a realização do ensaio e localizar a causa do desvio.

A linha que faz um ângulo de 45° através da interseção das medianas torna possível a estimativa de precisão dos dados. Muitas vezes, um programa interlaboratorial compromete-se a fazer distinção entre os laboratórios no que diz respeito à precisão. Isto requer não somente um grande número de medições realizadas por cada laboratório, como a observação de que, normalmente, estas acabam sendo menos importantes quando comparadas aos erros sistemáticos ou erros por descuido.

Ainda de acordo com os estudos de Youden (1959), a distância perpendicular de cada ponto para a linha de 45° pode ser utilizada para formar uma estimativa de precisão (ou o desvio padrão para um resultado individual). Tal estimativa pode ser obtida a partir da multiplicação do comprimento médio das perpendiculares por $\sqrt{\frac{\pi}{2}}$ ou 1,253. Porém, as perpendiculares não precisam ser medidas uma a uma. Em vez disso, o autor propõe um método mais simples para a estimativa da precisão, que consiste em tomar as diferenças, d_i , entre os dois resultados (A e B) obtidos por cada laboratório (Equação 2.1) e, em seguida, calcular a média dessas diferenças, \bar{d} (Equação 2.2).

$$d_i = A_i - B_i \quad (2.1)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d_i}{n} = \frac{(A_1 - B_1) + (A_2 - B_2) + (A_3 - B_3) + \dots + (A_n - B_n)}{n} \quad (2.2)$$

Em seguida, a média (\bar{d}) das diferenças é subtraída de cada diferença (d_i), de modo a se obter a diferença corrigida (d'_i) para cada laboratório (Equação 2.3). Calcula-se, então, a média dos valores absolutos (d'_i), obtendo-se \bar{d}' (Equação 2.4).

$$d'_i = |d_i - \bar{d}| \quad (2.3)$$

$$\bar{d}' = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d'_i}{n} = \frac{|d_1 - \bar{d}| + |d_2 - \bar{d}| + |d_3 - \bar{d}| + \dots + |d_n - \bar{d}|}{n} \quad (2.4)$$

A média dos valores absolutos das diferenças corrigidas, \bar{d}' , quando multiplicada por $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$ (ou 0,086), fornece a estimativa do desvio padrão ($\hat{\sigma}$) (Equação 2.5).

$$\hat{\sigma} = \bar{d}' \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} = \bar{d}' \times 0,086 \quad (2.5)$$

Foram gerados aleatoriamente dados para 16 laboratórios, a fim de exemplificar a explicação fornecida por Youden (1959) para a construção da elipse de confiança, conforme apresentado na Tabela 2.1. e plotados na Figura 2.5. Existem dois pontos que estavam afastados dos demais ao longo da linha de 45°, referentes aos Laboratórios 1 e 14. Estes laboratórios foram excluídos dos cálculos apresentados na Tabela 2.1. As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam os pontos plotados nos gráficos, sendo que o gráfico da Figura 2.5 inclui os laboratórios que apresentaram resultados dispersos (Laboratórios 1 e 14) e a Figura 2.6 exclui estes pontos. A última coluna da Tabela 2.1 apresenta as diferenças entre os resultados ($A_i - B_i$) diminuída da média da diferença entre as duas amostras (\bar{d}). Ao final desta coluna, encontra-se a média dos valores absolutos ($\bar{d}' = 0,0018$), que multiplicado por $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$ ou 0,886 obtém-se 0,0016, como a estimativa do desvio padrão.

Tabela 2.1. Dados gerados aleatoriamente para a construção de uma elipse de confiança

Laboratório	Amostra		$d_i = A_i - B_i$	$d'_i = d_i - \bar{d} $
	A	B		
1	2,634	2,636	-	-
2	2,661	2,662	-0,001	0,001
3	2,665	2,663	0,002	0,002
4	2,662	2,661	0,001	0,001
5	2,664	2,662	0,002	0,002
6	2,659	2,662	-0,003	0,003
7	2,656	2,655	0,001	0,001
8	2,66	2,66	0,000	0,000
9	2,658	2,659	-0,001	0,001
10	2,656	2,659	-0,003	0,003
11	2,66	2,656	0,004	0,004
12	2,66	2,665	-0,005	0,005
13	2,663	2,664	-0,001	0,001
14	2,636	2,633	-	-
15	2,654	2,655	-0,001	0,001
16	2,657	2,658	-0,001	0,001
			\bar{d}	\bar{d}'
Média	2,660	2,660	-0,00043	0,0018

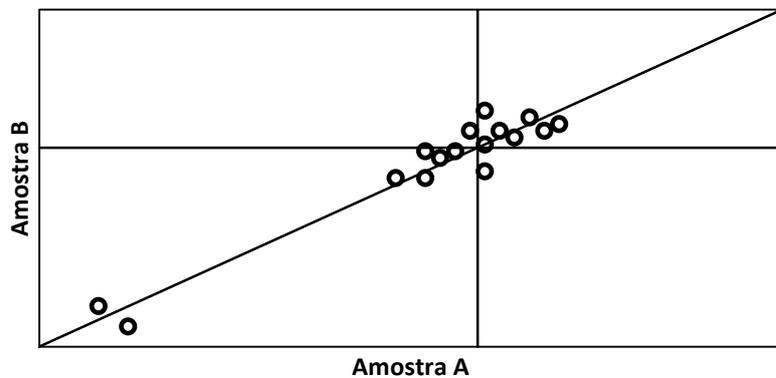


Figura 2.5. Disposição dos pares de resultados no plano cartesiano

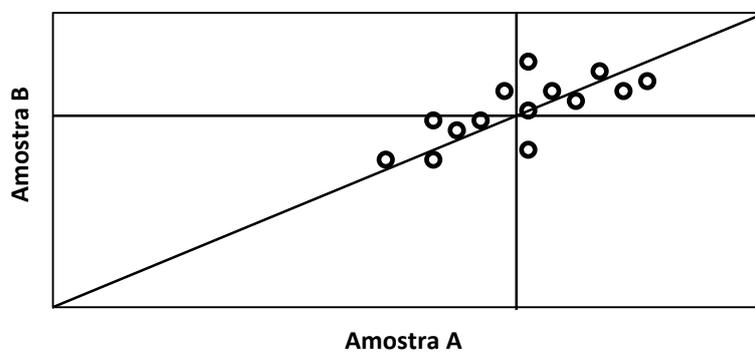


Figura 2.6. Disposição dos resultados no plano cartesiano após retirada dos Laboratórios 1 e 14

A estimativa do desvio padrão da precisão, descrita anteriormente, leva à construção de círculos (com centro na interseção das medianas ou das médias) dentro dos quais um determinado percentual dos pontos dos laboratórios pode ser encontrado, sendo capaz de eliminar todos os desvios ou erros sistemáticos. Os múltiplos do desvio padrão que incluem várias percentagens dos pontos são apresentados na Tabela 2.2, adaptada de Yoüden (1959).

Tabela 2.2. Tabela de probabilidade da distribuição normal circular (Yoüden, 1959)

Percentagem de pontos dentro do círculo ($P = 100x[1 - \exp(-\frac{b^2}{2})]$)	$X = ((100 - P)/100)^2$	$Y = -\ln X$	Múltiplos do desvio padrão ($b=\sqrt{Y}$)
10	0,81	0,211	0,459
20	0,64	0,446	0,668
25	0,56	0,575	0,759
30	0,49	0,713	0,845
40	0,36	1,022	1,011
50	0,25	1,386	1,177
60	0,16	1,833	1,354
70	0,09	2,408	1,552
75	0,06	2,773	1,665
80	0,04	3,219	1,794
90	0,01	4,605	2,146
95	0,00	5,991	2,448
99	0,00	9,210	3,035

Dessa maneira, um círculo cujo raio mede cerca de 2,448 a 3,035 (95% e 99% na Tabela 2.2, respectivamente) vezes o desvio padrão fornece uma idéia do menor círculo possível que se espera obter para conter a maioria dos pontos após a eliminação dos erros que levam os pontos a concentrarem-se nos quadrantes superior direito e inferior esquerdo. Os laboratórios representados pelos pontos que ficam fora desse círculo estão cometendo, de alguma maneira, erros sistemáticos significativos nos seus procedimentos. Multiplicando-se o desvio padrão obtido acima por 2,448 obtém-se o raio do círculo que deve incluir 95% dos laboratórios se os erros constantes individuais pudessem ser eliminados.

Modelo Tradicional da Elipse de Confiança

A técnica tradicional da elipse de confiança foi desenvolvida a partir do método de Yoüden, apresentado anteriormente. Este método vem sendo utilizado no Brasil

desde 1979. A elipse é traçada de maneira que todos os pontos tenham a mesma probabilidade de se situar dentro dela. Tal probabilidade é dada pelo nível de significância adotado. O desenvolvimento de programas computacionais para o traçado da elipse de confiança segue a Equação 2.6, que pode ser solucionada com o auxílio da álgebra vetorial e de matrizes (CHUI *et al.*, 2004; OLIVIERI, 2004):

$$T_\varepsilon = \frac{(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sigma_y^2 - 2(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \sigma_{xy} + (y_i - \bar{y})^2 \cdot \sigma_x^2}{\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2 - \sigma_{xy}^2} \quad (2.6)$$

Onde: ε = nível de significância; T e ε estão relacionados pela expressão: $\varepsilon = 1 - e^{(-T\varepsilon/2)}$; \bar{x} = média dos resultados para a amostra A; \bar{y} = média dos resultados para a amostra B; x_i = resultado obtido pelo laboratório i para a amostra A; y_i = resultado obtido pelo laboratório i para a amostra B; σ_x^2 = desvio padrão dos resultados da amostra A; σ_y^2 = desvio padrão dos resultados da amostra B e σ_{xy} = covariância dos resultados das amostras A e B (CHUI *et al.*, 2004).

O programa que utiliza o modelo tradicional da elipse de confiança baseia-se na estatística clássica (média e desvio padrão), que utiliza parâmetros influenciados por valores extremos. Dessa maneira, se faz necessária a eliminação sucessiva de pontos que são considerados dispersos com relação aos demais, com um determinado nível de confiança. A elipse de confiança traçada a partir da estatística clássica não permite concluir: (i) se as variabilidades obtidas para o par de amostras são aceitáveis e (ii) se todos os laboratórios que estiverem, ou permanecerem dentro da elipse após as eliminações sucessivas dos valores dispersos, têm desempenho satisfatório. Portanto, a elipse de confiança gerada pelo modelo tradicional permite apenas verificar a compatibilidade entre os resultados obtidos pelos diversos laboratórios, detectando aqueles cujos resultados se desviam dos demais e fornecendo informações de modo a orientar os mesmos com relação à ação corretiva a ser tomada (OLIVIERI, 2004).

Este método tradicional para traçado da elipse de confiança apresenta vantagens e desvantagens com relação a outros métodos, dentre as quais, citam-se: (i) visualização da compatibilidade dos resultados entre si (pontos dentro da elipse), (ii) fornecimento de algumas informações relativas ao tipo de erro eventualmente cometido (de caráter aleatório ou sistemático); (iii) não fornecimento de informações sobre o desempenho

dos laboratórios; pontos dentro da elipse de confiança podem ser interpretados como com bom desempenho, o que nem sempre é verdade, seriam necessárias informações adicionais; (iv) apresentação de distorções na interpretação quando existem poucos participantes e (v) quando existem resultados muito dispersos entre si, muito provavelmente com variabilidade não aceitável, posicionamento de todos os pontos dentro da elipse, dando uma falsa idéia de bom desempenho.

Devido a problemas ocorridos quando da aplicação do método tradicional para construção da elipse de confiança, Olivieri (2004) desenvolveu um novo programa para o traçado da elipse de confiança, chamado Elipse de Confiança Aceitável. Ambos os métodos (tradicional e aceitável) são baseados nos conceitos desenvolvidos por Youden. No método tradicional, os resultados posicionados dentro da elipse indicam apenas que existe uma compatibilização entre os mesmos, no nível de confiança adotado, não sendo possível, afirmar se a variabilidade apresentada pelos pontos dentro da elipse é ou não aceitável, ou se os laboratórios têm bom desempenho ou não. O modelo Aceitável não considera a variabilidade apresentada como consenso do grupo, mas como uma variabilidade aceitável, além de fornecer maior número de informações aos laboratórios dispersos e utilizar fundamentos de estatística robusta (Olivieri, 2004).

Para o traçado da elipse de confiança aceitável, pode-se utilizar a Equação 2.6 substituindo-se os seguintes valores de média (\bar{x} ou \bar{y}), pela mediana (md_x ou md_y) e de desvio padrão (σ_x ou σ_y) pelo desvio padrão aceitável (σ_{ax} ou σ_{ay}), conforme Equação 2.7.

$$T_{\varepsilon} = \frac{(x_i - md_x)^2 \cdot (\sigma_{ay})^2 - 2 \cdot (x_i - md_x)(y_i - md_y) \cdot \sigma_{axy} + (y_i - md_y)^2 \cdot (\sigma_{ax})^2}{(\sigma_{ax}^2) \cdot (\sigma_{ay})^2 - (\sigma_{axy})^2} \quad (2.7)$$

Novamente, a dispersão dos pontos ao longo do eixo maior da elipse está associada a erros sistemáticos, enquanto que a dispersão ao longo do eixo menor está associada a erros aleatórios. Laboratórios cujos pontos se situam fora da elipse ou não se encontram no gráfico, devem reexaminar seu procedimento de ensaio, localizando e corrigindo a fonte de desvio (Figuras 2.7 e 2.8) (OLIVIERI *et al.*, 2004; CHUI *et al.*, 2004; FORTES *et al.*, 2004). De acordo com OLIVIERI (2004), as fontes causadoras

dos erros aleatórios e sistemáticos são diversas, conforme observado na Figura 2.9, adaptada do referido trabalho.

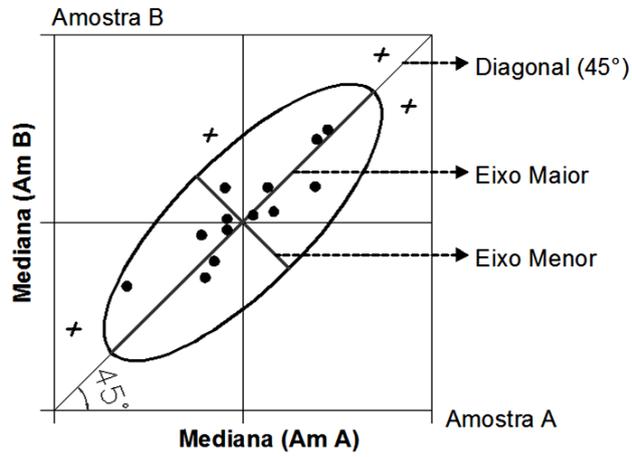


Figura 2.7. Modelo representativo de uma elipse de confiança (adaptado de Olivieri, 2004)

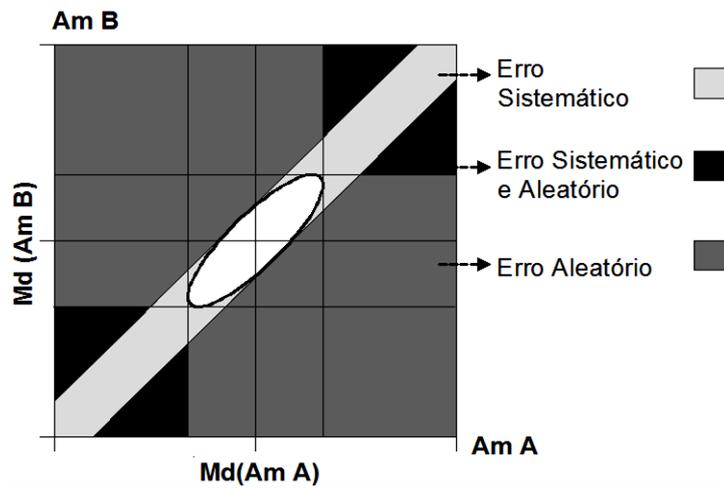
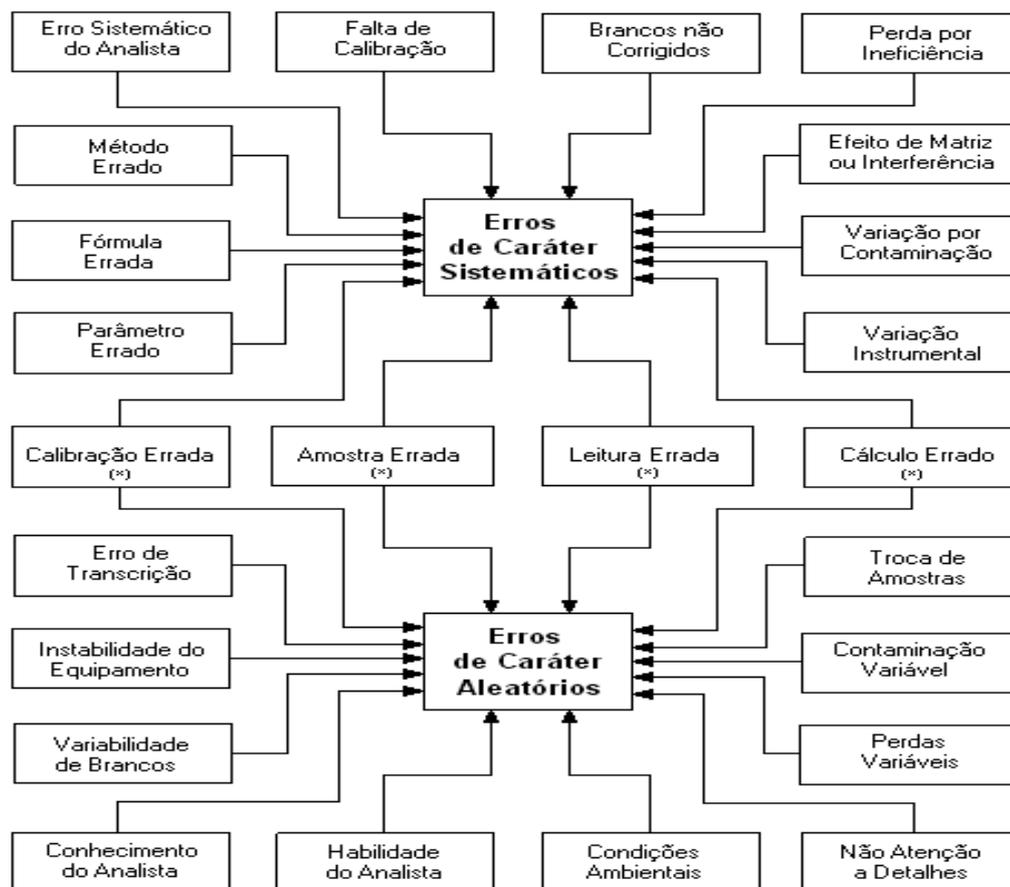


Figura 2.8. Indicação dos tipos de erros possíveis no gráfico da elipse de confiança (adaptado de FORTES et al., 2004)



* Fontes que podem causar erros de caráter sistemático ou aleatório, dependendo de como elas atuam durante a análise.

Figura 2.9. Erros de caráter sistemáticos e aleatórios associados a suas fontes

(adaptado de OLIVIERI, 2004)

2.2.3. Z-score

O z-score representa uma medida da distância relativa do parâmetro determinado em um laboratório em relação a um valor de referência. Trata-se de um método estatístico que determina a variabilidade dos resultados de ensaios utilizando um par de resultados, obtendo-se a repetitividade e a reprodutibilidade (INMETRO, 2007). O valor de z-score, z , de cada laboratório é apresentado em um gráfico (Figura 2.10) e identificado pelo seu número código, que é usado para manter, de modo confidencial, a identidade do laboratório. A aceitação de desempenho do laboratório segue o seguinte critério (FORTES *et al.*, 2001; CHUI *et al.*, 2004; PTA, 2008):

	$ z \leq 2$	Desempenho Satisfatório
2 <	$ z < 3$	Desempenho Questionável
	$ z \geq 3$	Desempenho Insatisfatório

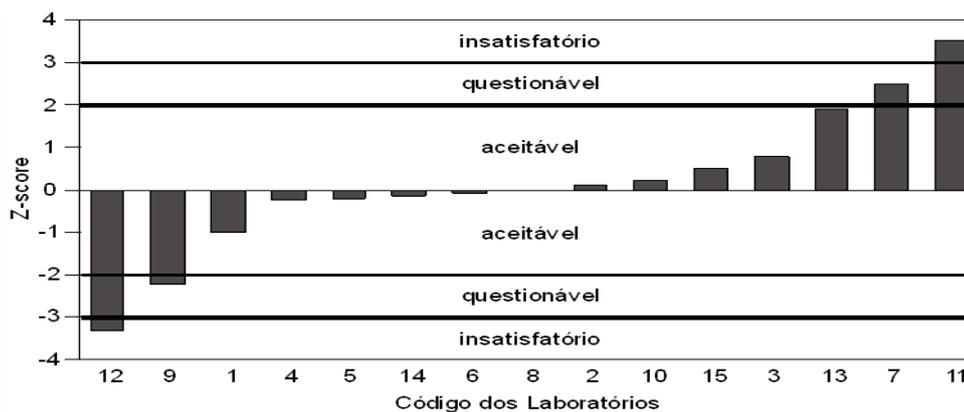


Figura 2.10. Gráfico representativo do z-score

O valor de z pode ser obtido a partir da fórmula $z = (x - \mu)/\sigma$, onde x é o valor do resultado obtido pelo laboratório participante, μ é a estimativa do valor de referência e σ é a estimativa do desvio padrão para μ . No entanto, há casos onde não há um valor de referência, considerado como verdadeiro. Então, a partir de recomendações feitas pela norma ISO 13528/2002, e por programas intelaboratoriais como o da NATA, por exemplo, tem-se empregado a estatística robusta para análise dos resultados. Trata-se de uma abordagem utilizada para minimizar os efeitos causados pela presença dos valores extremos (*outliers*). Dessa forma, para a determinação do z-score robusto, são usadas a mediana, md , e o Intervalo Interquartil Normalizado, IQN , em vez de μ e σ , respectivamente (CHUI *et al.*, 2004; PTA, 2008).

O IQN é a medida de variabilidade dos resultados e é dado pela multiplicação do intervalo interquartil, IQ , pelo fator 0,7413. Este fator vem da distribuição normal padrão, que torna o IQN comparável ao desvio padrão. Por sua vez, o IQ é dado por $IQ=Q3-Q1$, onde $Q1$ e $Q3$ são os quartis (CHUI *et al.*, 2004; PTA, 2008). Os quartis ($Q1$, $Q2$ e $Q3$) são valores que dividem uma amostra, depois de ordenada, em quatro partes iguais:

- (i) O primeiro quartil, $Q1$, separa os 25% inferiores dos valores ordenados dos 75% superiores;
- (ii) O segundo quartil, $Q2$, coincide com a mediana, separando os 50% inferiores dos valores ordenados dos 50% superiores e
- (iii) O terceiro quartil, $Q3$, separa os 75% inferiores dos valores ordenados dos 25% superiores.

Para avaliar a variabilidade entre laboratórios e dentre laboratórios o z-score robusto é calculado a partir dos resultados dos ensaios realizados em pares de amostras (A e B). Então, o z-score robusto entre laboratórios, ZE , é calculado com base na soma padronizada (S) do par de resultados, dada pela Equação 2.8, e o z-score robusto dentre laboratórios, ZD , baseia-se na diferença padronizada (D), sendo dada pela Equação 2.9.

$$S=(A+B)/2 \quad (2.8)$$

$$D = (|A - B|)/\sqrt{2} \quad (2.9)$$

Finalmente, o ZE é obtido pela Equação 2.10 e o ZD pela Equação 2.11 (CHUI *et al.*, 2004; PTA, 2008).

$$ZE = \frac{S - md(S)}{IQN(S)} \quad (2.10)$$

$$ZD = \frac{D - md(D)}{IQN(D)} \quad (2.11)$$

2.2.4. Testes Estatísticos

Antes da análise e interpretação de resultados obtidos por laboratórios envolvidos em ensaios de proficiência, se faz necessária a realização de testes estatísticos a fim de verificar a existência de valores dispersos (*outlier*). Um *outlier* é um valor amostral que não é representativo quando comparado com o conjunto de dados, sendo o maior ou o menor dos valores. A presença de um *outlier* pode exercer uma grande influência sobre os parâmetros característicos da distribuição normal: média e desvio padrão. Esse tipo de valor situa-se além das faixas de três a quatro desvios padrão em torno da média. Então, os valores dispersos podem ser calculados utilizando-se diversos testes estatísticos, dentre os quais se podem citar: (i) Teste de *Dixon* e (ii) Teste de *Cochran*.

2.2.4.1. TESTE DE DIXON

O objetivo do teste de *Dixon* é verificar a existência de valores dispersos nas extremidades do conjunto de dados. Este teste é recomendado pela ISO 5725-1986 e é

feito em resultados individuais. Ele consiste em: (i) classificar os resultados em ordem crescente $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ e (ii) determinar $D_{calculado}$, de acordo com um dos pares das equações descritas adiante, sendo que se refere ao menor valor do conjunto de dados (Equações 2.11 a 2.16), e está relacionado ao total de resultados a ser avaliado. Se o total de resultados estiver entre 3 e 7, determinam-se os valores de D a partir das Equações 2.11 e 2.12. Se o total de resultados estiver entre 8 e 12, determinam-se os valores de D a partir das Equações 2.13 e 2.14. Finalmente, se o total de resultados estiver entre 13 e 40, determinam-se os valores utilizando as Equações 2.15 e 2.16.

$$\text{Se } 3 \geq n \geq 7 \quad D_{calc-mín} = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1} \quad \text{e} \quad D_{calc-máx} = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1} \quad (2.11) \text{ e } (2.12)$$

$$\text{Se } 8 \geq n \geq 12 \quad D_{calc-mín} = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1} \quad \text{e} \quad D_{calc-máx} = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_2} \quad (2.13) \text{ e } (2.14)$$

$$\text{Se } 13 \geq n \geq 40 \quad D_{calc-mín} = \frac{X_3 - X_1}{X_{n-2} - X_1} \quad \text{e} \quad D_{calc-máx} = \frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_3} \quad (2.15) \text{ e } (2.16)$$

Os valores de D são comparados aos valores críticos da Tabela de *Dixon* (Tabela 2.3). Sempre devem ser verificados os valores máximo e mínimo do grupo de dados, a partir do cálculo do $D_{calc-mín}$ e do $D_{calc-máx}$, respectivamente. Se o valor de $D_{calculado}$ for maior do que o valor crítico constante na Tabela ($D_{crítico}$), então o resultado extremo correspondente é considerado disperso e deve ser retirado do conjunto de dados utilizado para o cálculo da média e do desvio padrão. Para o conjunto de dados resultante, calcular novamente os valores de $D_{calc-mín}$ e de $D_{calc-máx}$ até que todos os valores sejam considerados aceitos.

Tabela 2.3. Valores críticos para o teste de *Dixon* (adaptado da ISSO 5725-1986)

Número de laboratórios (<i>n</i>)	Grau de Confiança (%)		Número de laboratórios (<i>n</i>)	Grau de Confiança (%)	
	95	99		95	99
3	0,970	0,994	22	0,468	0,544
4	0,829	0,926	23	0,459	0,535
5	0,710	0,821	24	0,451	0,526
6	0,628	0,740	25	0,443	0,517
7	0,569	0,680	26	0,436	0,510
8	0,608	0,717	27	0,429	0,502
9	0,564	0,672	28	0,423	0,495
10	0,530	0,635	29	0,417	0,489
11	0,502	0,605	30	0,412	0,483
12	0,579	0,579	31	0,407	0,477
13	0,611	0,697	32	0,402	0,472
14	0,586	0,670	33	0,397	0,467
15	0,565	0,647	34	0,393	0,462
16	0,646	0,627	35	0,388	0,458
17	0,529	0,610	36	0,384	0,454
18	0,514	0,594	37	0,381	0,450
19	0,501	0,580	38	0,377	0,466
20	0,489	0,567	39	0,374	0,442
21	0,478	0,555	40	0,371	0,438

2.2.4.2. TESTE DE COCHRAN

A identificação de *outliers* também pode ser feita por meio do Teste de *Cochran* (ISO 5725-1986), que tem como objetivo verificar se a variância dos resultados obtidos por um laboratório é diferente da variância dos demais laboratórios. Para o caso de duas amostras por laboratório, deve-se proceder da seguinte maneira: (i) calcular as amplitudes A_i (diferença entre os resultados do par de amostras) para cada conjunto i de duas repetições, $i=1, 2, 3, \dots, n$; (ii) verificar o valor da máxima amplitude $A_{m\acute{a}x}$; (iii) determinar $A_{m\acute{a}x}^2$ e o somatório de todos os A_i^2 e (iv) calcular o valor de $C_{calculado}$, conforme Equação 2.16. Se o número de amostras for maior que dois, utiliza-se o desvio padrão ($\hat{\sigma}_i$) no lugar da amplitude (Equação 2.17).

$$C_{calculado} = \frac{A_{m\acute{a}x}^2}{\sum_{i=1}^n A_i^2} \quad (2.16)$$

$$C_{calculado} = \frac{\hat{\sigma}_{m\acute{a}x}^2}{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}_i^2} \quad (2.17)$$

O valor $C_{calculado}$ é comparado aos valores críticos da Tabela 2.4, que é uma adaptação da tabela estatística constante na norma ISO 5725-1986. Se o valor de $C_{calculado}$ for menor que o respectivo $C_{crítico}$ tabelado, significa que todos os valores do conjunto de dados são aceitos e o teste termina. Caso contrário, o par de resultados relativo à $A_{m\acute{a}x}$ é considerado disperso. Para o conjunto de dados resultante, calcular novamente os valores de $C_{calculado}$ até que todos os valores sejam considerados aceitos. Na Tabela 2.4 constam os valores críticos de C somente para casos em que há dois resultados por laboratório. Na tabela constante no Anexo A da norma ISO 5725-1986, são encontrados os valores de C para os casos onde o número de resultados por laboratório varia de dois a seis.

Tabela 2.4. Valores críticos para o teste de *Cochran* (adaptado da ISO 5725-1986)

Número de laboratórios (<i>n</i>)	Grau de Confiança (%)		Número de laboratórios (<i>n</i>)	Grau de Confiança (%)	
	95	99		95	99
3	0,967	0,993	22	0,365	0,450
4	0,906	0,968	23	0,354	0,437
5	0,841	0,928	24	0,343	0,425
6	0,781	0,883	25	0,334	0,413
7	0,727	0,838	26	0,325	0,402
8	0,680	0,794	27	0,316	0,391
9	0,638	0,754	28	0,308	0,382
10	0,602	0,718	29	0,300	0,372
11	0,570	0,684	30	0,293	0,363
12	0,541	0,653	31	0,286	0,355
13	0,515	0,624	32	0,280	0,347
14	0,492	0,599	33	0,273	0,339
15	0,471	0,575	34	0,267	0,332
16	0,452	0,553	35	0,262	0,325
17	0,434	0,532	36	0,256	0,318
18	0,418	0,514	37	0,251	0,312
19	0,403	0,496	38	0,246	0,306
20	0,389	0,480	39	0,242	0,300
21	0,377	0,465	40	0,237	0,394

2.2.5. Estatística Robusta Adaptada

Para o tratamento dos resultados de um programa interlaboratorial, também podem ser utilizadas, em programas interlaboratoriais no Brasil, ferramentas da estatística robusta adaptada. O procedimento consiste em determinar a mediana ($\hat{\mu}$) do conjunto de resultados e calcular as diferenças absolutas entre os valores individuais obtidos pelos laboratórios e a mediana. Em seguida, é determinada a Mediana Absoluta dos Desvios (MAD). O desvio padrão ($\hat{\sigma}_x$) é obtido multiplicando-se a MAD pelo fator 1,4826. Quanto maior for o número de laboratórios participantes melhor será a estimativa, que é determinada pela Equação 2.18. Finalmente, o valor de ($\hat{\sigma}_x$) é somado e/ou subtraído do valor da mediana, conforme a Equação 2.19, gerando as estimativas dos limites superiores e inferiores dos dados (AZEVEDO *et al.*, 2004):

$$\hat{\sigma}_x = \text{MAD} \times 1,4826 \times \sqrt{\frac{n-1}{n}} \quad (2.18)$$

$$\text{Limites} = \hat{\mu} \pm \hat{\sigma}_x \quad (2.19)$$

Os resultados dos laboratórios são plotados em ordem crescente em um gráfico, que apresenta o desempenho de cada participante em um determinado ensaio (Figura 2.11). De acordo com Azevedo *et al.* (2004), os valores pertencentes ao intervalo de um desvio padrão são usados na estimativa da média aritmética e do desvio do programa. Resultados fora do intervalo de mais ou menos três desvios padrão ($\pm 3S$) são classificados como *outliers*. Este método foi utilizado no programa Programa Interlaboratorial de Lubrificantes (PIL) do IBP.

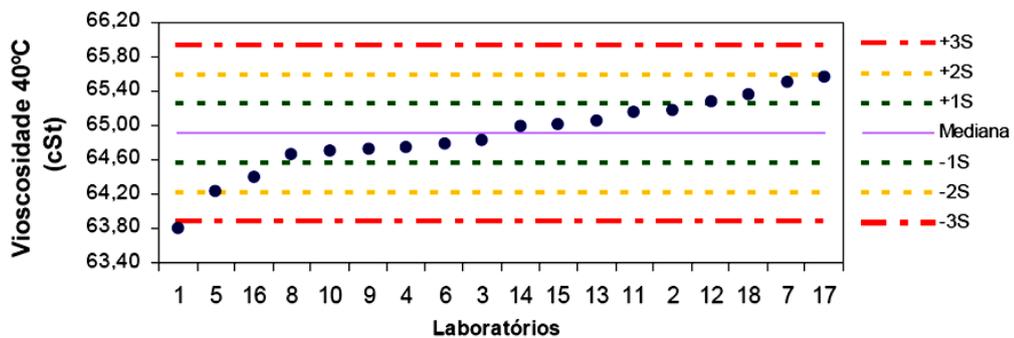


Figura 2.11. Análise dos resultados do ensaio de viscosidade do PIL do IBP

(adaptada de AZEVEDO *et al.*, 2004)

2.3. CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS

Os agregados são importantes na composição das misturas asfálticas, pois correspondem à aproximadamente 77% de seu volume e 94% de seu peso (BERNUCCI *et al.*, 2007). As propriedades dos agregados são de fundamental importância para a pavimentação. A seleção de agregados adequados é determinante para gerar misturas asfálticas com desempenho satisfatório. Desse modo, propriedades como resistência à abrasão, adesividade ao ligante betuminoso, forma e granulometria do agregado são essenciais para se determinar a qualidade do material a ser utilizado.

A perfeita execução dos procedimentos de caracterização de agregados permite obter resultados representativos, que são determinantes na escolha adequada de materiais capazes de resistir às cargas as quais o pavimento será submetido. Nesta seção são apresentados alguns procedimentos fundamentais no processo de caracterização dos agregados, com o detalhamento de cada etapa para realização dos métodos de ensaio, seguindo os passos descritos pela respectiva norma.

2.3.1. Granulometria

O procedimento para a determinação da granulometria consiste em se determinar a distribuição das partículas de agregado por tamanho. Estão ligadas a este processo diversas propriedades de uma mistura asfáltica, tais como: estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente (CUNHA, 2004). A distribuição granulométrica assegura a estabilidade da camada de revestimento asfáltico, por estar relacionada ao entrosamento entre as partículas e ao conseqüente atrito entre elas (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A norma DNER-ME 083/98 indica todos os procedimentos a serem executados para a determinação da composição granulométrica de agregados. A granulometria do agregado é representada por uma curva granulométrica, onde a ordenada indica a porcentagem total passante, em peso, em determinada peneira, enquanto a abscissa expressa o tamanho das aberturas das peneiras em escala logarítmica ou elevado à potência de 0,45 (BERNUCCI *et al.*, 2007). O gráfico da Figura 2.12 representa um modelo de curva granulométrica para três tipos de agregados.

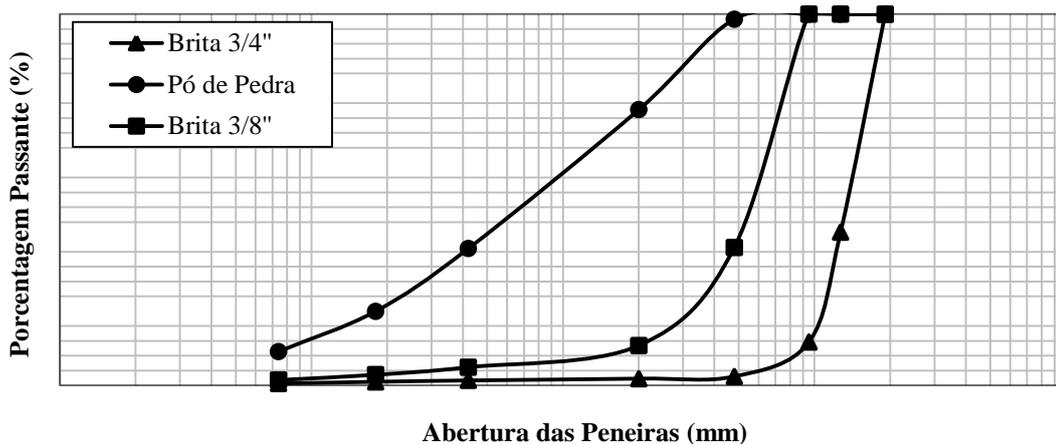


Figura 2.12. Granulometria de material pétreo

A preparação da amostra para este ensaio consiste em secar o agregado na estufa e, em seguida, passar este em uma série de peneiras padronizadas. A quantidade de material necessária para o ensaio é determinada pela dimensão máxima característica do agregado, a partir da norma DNER-ME 083/98. Os agregados podem ser peneirados manualmente ou com a utilização de um peneirador mecânico. A distribuição dos diferentes tamanhos dos grãos é calculada por meio da comparação entre o material passante em cada peneira e o total da amostra ensaiada (BERNUCCI *et al.*, 2007). A Figura 2.13 apresenta algumas etapas para o ensaio de granulometria.

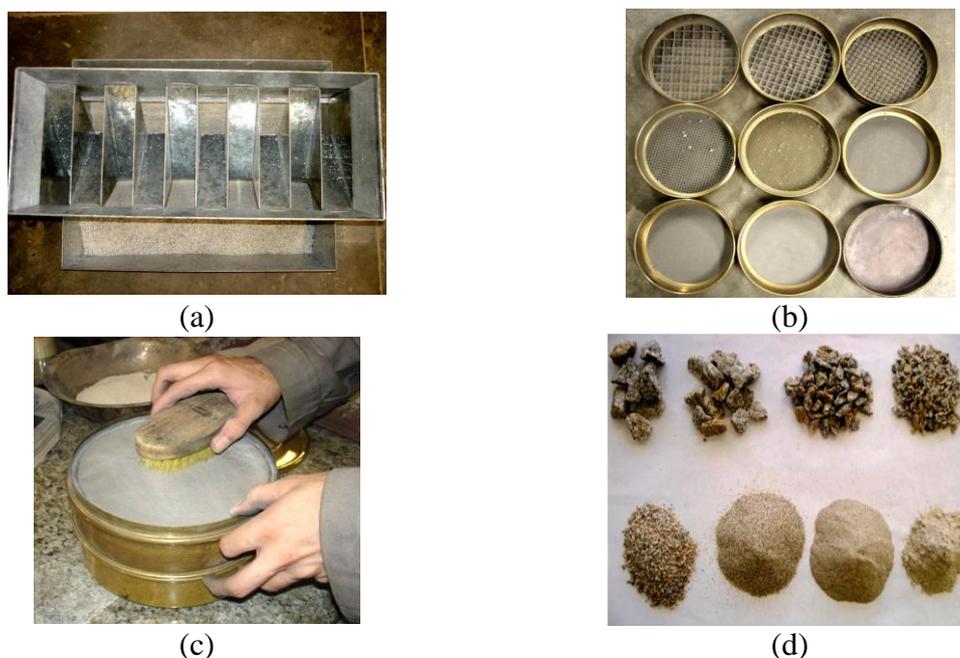


Figura 2.13. Etapas do ensaio de granulometria: (a) quartearamento da amostra a ser ensaiada; (b) série de peneiras por onde passarão os agregados; (c) limpeza das peneiras com a escova e (d) frações obtidas ao final do ensaio

2.3.2. Abrasão Los Angeles

Os agregados utilizados em pavimentação são submetidos a diversos processos de manipulação, tais como: britagem, armazenamento, lançamento, espalhamento, compactação. Em seguida, os mesmos passam a resistir ao tráfego e a transmitir as cargas para as camadas inferiores (GOUVEIA, 2006). Desse modo, os agregados devem apresentar resistência suficiente para ultrapassar todos esses processos de maneira que a degradação seja mínima, dentro de um limite aceitável, ou sem sofrer degradação para não comprometer a qualidade do pavimento.

O ensaio de abrasão Los Angeles pode ser realizado seguindo uma das seguintes normas técnicas: ABNT NBR NM 51/2001; DNER-ME 035/1998; ASTM C 131/2006; ASTM C 535/2003. Trata-se de um ensaio que procura estabelecer a qualidade de um agregado em função de sua utilização. Este ensaio é utilizado por aproximadamente 94% das agências rodoviárias dos Estados Unidos. Foi desenvolvido na década de 1920 pelo *Municipal Testing Laboratory* da cidade de Los Angeles, Califórnia, para a avaliação da resistência à degradação ou ao desgaste por abrasão e impacto, por meio da máquina Los Angeles (GOUVEIA, 2006).

O ensaio representa um parâmetro determinante para a avaliação da resistência à degradação ou ao desgaste por abrasão e impacto. Consiste em colocar uma amostra de agregado graúdo juntamente com esferas de aço, com aproximadamente 47,6mm de diâmetro e peso entre 390 e 445g, dentro do tambor Los Angeles. A máquina passa a girar durante alguns ciclos de revoluções (500 rotações para as graduações A, B, C e D) e frequência de rotação de 30 a 33rpm (DNER-ME 035/1998).

No ensaio, uma amostra representativa é lavada e seca, de acordo com as recomendações descritas no processo de preparação da amostra, indicadas na norma DNER-ME 035/98. Em seguida, a amostra selecionada é peneirada para obtenção das quantidades necessárias para a realização do ensaio. Essas quantidades são determinadas de acordo com a granulometria do material.

A carga abrasiva a ser utilizada é função da granulometria da amostra. Antes de usar as esferas, deve ser verificado se as mesmas estão com os pesos dentro dos limites estabelecidos pela norma e se as dimensões e uniformidades da superfície são

adequadas. Em seguida, pesa-se a carga abrasiva juntamente com o material a ser ensaiado, colocando-os dentro da máquina para iniciar o ensaio (Figura 2.14).

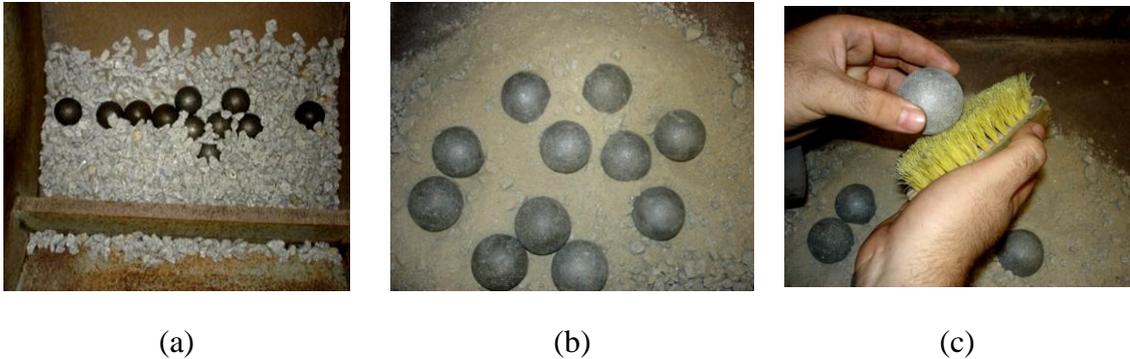


Figura 2.14. Ensaio Los Angeles: (a) carga abrasiva e agregados antes do ensaio; (b) ao final do ensaio e (c) limpeza das esferas com escova para retirar os finos aderentes

O atrito entre as esferas, o agregado e o tambor simulam o processo de usinagem e desgaste sofrido pelo material. Dessa maneira, são reproduzidos impactos entre os próprios agregados, uns sobre os outros, e a degradação, gerada pelo contato com as esferas e as paredes do tambor, promove abrasão entre as partes (GOUVEIA, 2006).

Finalizada a série de rotações, todo o material deve ser retirado do tambor. As esferas devem ser limpas para evitar perdas que afetem o resultado final. Em seguida, se faz passar o material na peneira de 1,7mm, desprezando-se o material passante (Figura 2.15). O material retido na peneira de 1,7mm é lavado e seco em estufa a uma temperatura de 105 a 110°C durante, no mínimo, 3h e, em seguida, é pesado.



Figura 2.15. Ensaio Los Angeles: (a) peneiramento do material com a peneira de 1,7mm; (b) descarte do material passante e (c) lavagem do material retido na peneira de 1,7mm

O resultado do ensaio é a porcentagem de perda do material gerado pelo desgaste mecânico do material devido ao seu contato com as esferas e o tambor, ou seja, a porcentagem de material graúdo que se desgastou durante o processo de rotação. A

porcentagem degradada é determinada pela diferença entre a massa inicial e a massa final da amostra ensaiada, como mostra a Equação 2.17:

$$A_{LA} = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (2.17)$$

Onde: A_{LA} = abrasão Los Angeles; m_i = massa inicial da amostra colocada na máquina e m_f = massa final da amostra lavada e seca, após o ensaio.

De acordo com DNER-ES 313/97, o desgaste deve ser igual ou inferior a 40% e expresso com aproximação de 1%. A interpretação do resultado deverá levar em consideração a composição mineralógica, a estrutura da rocha e a respectiva aplicação do agregado.

2.3.3. Índice de Forma

As propriedades de forma dos agregados para uso em pavimentação estão relacionadas à distribuição da estrutura interna de misturas asfálticas, além de influenciar a compactação e o desempenho mecânico das mesmas. O uso de agregados de forma angular ou cúbica proporciona aumento de estabilidade da mistura asfáltica devido ao maior intertravamento e atrito interno entre suas partículas. Os agregados com cantos arredondados não possuem intertravamento adequado, tendendo a deslizarem uns sobre os outros, resultando em uma estrutura granular mais fraca e, portanto, em misturas menos estáveis (GOUVEIA, 2006).

Partículas individuais de agregados, de tamanhos específicos, são medidas para que se determinem as razões entre largura e espessura, comprimento e largura, ou comprimento e espessura. Agregados chatos ou alongados, para algumas aplicações em engenharia, podem oferecer dificuldades em sua utilização e aplicação. Para a determinação do índice de forma dos agregados existem alguns procedimentos, quais sejam: ASTM D 4791/99 (método do *Caliper*); ABNT NBR 7809/06 (método do paquímetro) e DNER-ME 086/94 (método dos crivos). Além desses, também pode ser utilizada a norma ASTM D 5821-01 que calcula a quantidade de partículas fraturadas de agregado, o que pode ser relacionado ao índice de forma do material. O método dos crivos (DNER ME 086/94 Agregado – Determinação do Índice de Forma) fornece um valor adimensional por meio de uma fórmula que relaciona a quantidade de agregado

retido em determinado tamanho de crivo circular com a quantidade de agregado retido em um determinado tamanho de crivo retangular. O método do paquímetro (ABNT NBR 7809/06 Agregado graúdo – Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro) calcula a média ponderada, de acordo com cada fração analisada, das relações entre o comprimento e a espessura de cada uma das partículas de agregado medidas.

ASTM D 4791/99 – método do Caliper

O ensaio de índice de forma proposto pela ASTM D 4791 – 1999 proporciona meios para comparar os valores encontrados com as especificações que normatizam esse tipo de material ou determinar as características de forma de agregados graúdos. O ensaio utiliza um paquímetro especial, denominado *Caliper*. Este aparato pode ser de confeccionado de várias maneiras, mas todos consistem de uma base com um braço móvel sobre ela. Contudo, alguns possuem na sua base dois pontos fixos entre os quais o braço está montado, de forma que as aberturas entre o braço e os pontos mantêm uma razão constante, permitindo-se que a posição de eixo e, conseqüentemente, a razão de abertura desejada seja ajustada. Outros possuem vários pontos fixos (Figura 2.16), permitindo que várias razões de abertura (1:2; 1:3; 1:4 e 1:5) possam ser medidas simultaneamente. Uma proporção de 1:5, por exemplo, significa que um agregado deve possuir para sua maior dimensão um valor cinco vezes maior do que o valor de sua menor dimensão.

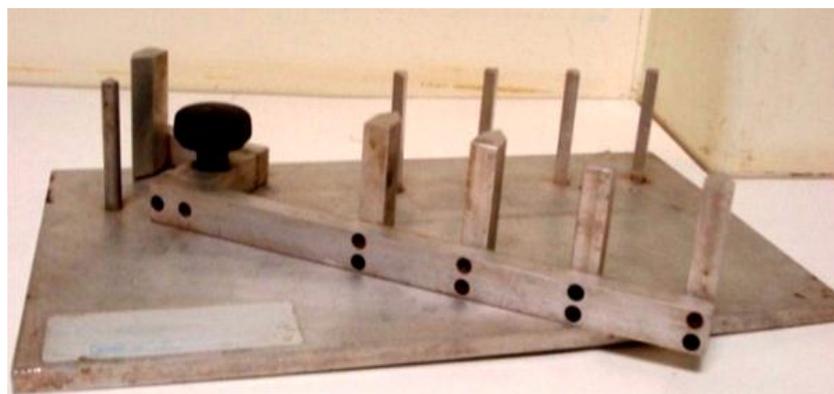


Figura 2.16. Modelo de um Caliper para determinação do percentual de partículas chatas e alongadas

O procedimento de ensaio consiste em peneirar a amostra a ser avaliada de acordo com as recomendações da norma ASTM C 136/2006. Utilizando-se o material

retido na peneira de 9,5mm (3/8”) ou na peneira de 4,75mm (Nº 4) – conforme requerido pela especificação adotada. Em seguida, reduz-se cada fração em uma quantidade de, no mínimo, 10% da amostra original (de acordo com ASTM C 702-98, 2003) até que sejam obtidas aproximadamente 100 partículas para cada fração requerida. Depois, procede-se como descrito adiante: (i) *Teste de partícula chata* – posiciona-se a maior abertura do paquímetro em um espaço equivalente à largura da partícula. Considera-se a partícula chata se sua espessura passar pelo menor espaço do paquímetro; (ii) *Teste de partícula alongada* – posiciona-se a maior abertura do paquímetro em um espaço equivalente ao comprimento da partícula. Considera-se a partícula alongada se sua largura passar pelo menor espaço do paquímetro e (iii) *Teste de partícula chata e alongada* – posiciona-se a maior abertura do paquímetro em um espaço equivalente ao comprimento da partícula. Considera-se a partícula chata e alongada se sua espessura passar pelo menor espaço do paquímetro. Ensaia-se cada partícula de cada fração selecionada, classificando-as como: (i) chatas, (ii) alongadas ou (iii) nem chatas nem alongadas. Em seguida, determina-se a proporção da amostra em cada grupo classificado.

Em paquímetros similares aos da Figura 2.16, posiciona-se a menor abertura do equipamento (Figura 2.17(a)) com um espaço equivalente à espessura da partícula. Considera-se a partícula chata e alongada se esta, posicionada longitudinalmente (em função de seu comprimento) (Figura 2.17(b)), não passar pelo maior espaço do paquímetro relativo à proporção desejada.



(a)



(b)

Figura 2.17. Ensaio de índice de forma: (a) posicionamento da partícula na menor abertura e (b) posicionamento da partícula na maior abertura

Após os agregados serem classificados nos grupos: (i) chatos e alongados ou (ii) não chatos e alongados, determina-se a proporção da amostra em cada grupo classificado. Por fim, calcula-se a porcentagem de partículas chatas ou alongadas (com precisão de 1%) para cada tamanho de peneira maior do que 9,5mm (3/8”) ou 4,75mm (Nº 4), conforme for requerido.

ABNT NBR 7809/06 – Método do paquímetro

A norma ABNT NBR 7809/2006 estabelece o método para determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica maior do que 9,5mm, pelo método do paquímetro. Neste método, as quantidades mínimas a serem ensaiadas são determinadas de acordo com a fração granulométrica, contida na norma. Após a seleção da amostra, esta deve ser lavada e seca em estufa a temperatura de 105°C, até constância de massa. Em seguida, deve-se realizar a análise granulométrica do material de acordo com a norma DNER-ME 083/98, desprezando as frações passantes na peneira de 9,5mm, além daquelas cujas porcentagens retidas individuais, em massa, sejam iguais ou menores do que 5%.

Cada fração (acima da peneira de 9,5mm) obtida a partir da análise granulométrica deve ser quarteada conforme indicado na norma DNER-PRO-199/96, até a obtenção do número de grãos necessários, Equação 2.20:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \times F_i \quad (2.20)$$

Onde: 200 é o número de grãos necessários para a realização do ensaio; N_i é o número de grãos a serem medidos na fração i ; F_i é a porcentagem de massa retida individual da fração i . NOTA: Quando N_i for fracionário, deve ser arredondado para o inteiro mais próximo.

Em seguida, efetuar com o auxílio do paquímetro, manual ou digital, a medida do comprimento “ c ”, maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão, e da espessura “ e ”, menor distância possível entre planos paralelos entre si em qualquer direção do grão, de cada um dos grãos obtidos (Figura 2.18).



Figura 2.18. Ensaio de índice de forma: (a) amostras a serem ensaiadas (frações retidas nas peneiras 1/2" e 3/8") e (b) medição das partículas

O cálculo do índice de forma é feito pela ponderação entre a média da relação c/e de todos os grãos medidos de cada fração granulométrica e a porcentagem retida em cada peneira. O resultado do ensaio possui grande influência sobre a estabilidade da mistura asfáltica, pois os agregados lamelares são facilmente quebrados pela ação do tráfego, dando origem à formação acelerada de “panelas” na pista da rodovia. Prefere-se utilizar agregados de textura rugosa e arestas cúbicas, pois os mesmos tendem a desenvolver maior atrito interno e melhor adesividade. Um bom agregado é livre de partículas muito alongadas, lamelares, achatadas e arredondadas (BERNUCCI *et al.*, 2007).

2.3.4. Adesividade

Um problema freqüente na malha rodoviária brasileira é o aparecimento de “panelas” em rodovias, causadas pela desagregação da camada de rolamento. Esse defeito pode ser gerado por diversos fatores, tais como: a má execução das camadas granulares, a utilização de materiais inadequados ou até os fatores externos como o clima. No entanto, outro fator determinante na desagregação do pavimento pode estar relacionado a uma propriedade dos agregados, a adesividade ao ligante betuminoso.

Uma ligação adesiva deficiente entre o agregado e o ligante pode prejudicar a função de absorção de carga realizada pelo pavimento. A falta de adesividade compromete o intertravamento da mistura asfáltica diminuindo a estabilidade necessária para que o pavimento apresente bom desempenho mecânico. Acredita-se que a perda da adesividade está associada, principalmente, às características dos agregados, particularmente regida pelas propriedades físico-química da superfície dos mesmos (CURTIS, 1990).

A adesão é um fenômeno de superfície dependente do contato entre o agregado e o ligante. Trata-se de uma relação mútua entre os materiais, de forma a se manter a coesão na mistura asfáltica (GOUVEIA *et al.*, 2004). HUANG *et al.* (2003) afirmaram que a perda da resistência adesiva das misturas asfálticas corresponde à perda de componentes resultantes da ligação na interface ligante/agregado na mistura.

A água aprisionada na interface agregado/ligante prejudica a aderência entre estes materiais. O ensaio de adesividade a ligante betuminoso DNER-ME 078/94 simula o agregado envolvido com o ligante na presença de água. Dessa forma, podemos avaliar se houve ou não descolamento da partícula de ligante. No referido ensaio, 500g de agregado graúdo passando na peneira de 19mm e retido na peneira de 12,7mm são lavadas e colocadas em água destilada durante um minuto, em seguida, a amostra é levada para estufa, a 120°C, por um período de duas horas.

O ligante deve ser aquecido em estufa a 120°C, e o agregado aquecido a 100°C. Dentro de um recipiente de porcelana, como indicado no método (DNER-ME 078/94), o agregado é envolvido pelo ligante. Com o auxílio de uma espátula, procede-se ao completo envolvimento do agregado. O agregado envolvido pelo ligante é colocado sobre uma superfície lisa, a fim de que o ligante esfrie ou cure, em seguida, este é colocado dentro de um frasco de vidro totalmente coberto por água destilada (Figura 2.19(a)). O frasco é mantido em estufa durante 72 horas a uma temperatura de 40°C.

O resultado do ensaio é verificado apenas observando o comportamento do ligante (se houve ou não descolamento da película depois das 72 horas). Dessa forma, o resultado pode ser analisado como satisfatório, ou seja, sem deslocamento (Figura 2.19(b)), ou não satisfatório quando houver total ou parcial deslocamento da película de ligante sobre o agregado.



(a)



(b)

Figura 2.19. Ensaio de adesividade: (a) agregados cobertos por água destilada e (b) agregados ao final do ensaio

2.3.5. Equivalente de Areia (EA)

Os agregados devem encontrar-se livres de materiais como argila, matéria orgânica, pó, silte, etc., pois, em contato com estes, a adesão com o ligante fica prejudicada. Os materiais plásticos, também, provocam retração e inchamento, que são fenômenos indesejáveis. A limpeza de um agregado é determinada através do ensaio de equivalente de areia, que verifica a presença de material plástico no agregado.

De acordo com a norma brasileira DNER-ME 054/97, Equivalente de Areia (EA) significa a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas em norma.

Nesse ensaio, uma amostra de agregado, com tamanhos de partículas menores do que 4,8mm, medida em volume numa cápsula, é colocada em uma proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído e mantida em repouso por 20 minutos. Em seguida o conjunto é agitado por 30 segundos e, após completar a proveta com a solução até um nível predeterminado, este é deixado em repouso por mais 20 minutos. Após esse período, é determinada a altura de material floculado em suspensão (h_1). Com um bastão padronizado que é introduzido na proveta, é determinada a altura de agregado depositado por sedimentação (h_2). O EA é determinado pela Equação 2.21:

$$EA = h_2/h_1 \times 100 \quad (2.21)$$

Atualmente, as propriedades de agregados sugeridas pelo Superpave estabelecem alguns valores mínimos para o EA conforme o aumento do volume de tráfego, sendo indiferente quanto à camada do pavimento na qual o agregado será utilizado. De acordo com GOUVEIA (2006), um valor de EA igual a 50% é especificado como o mínimo admissível para rodovias com volume de tráfego considerado alto. Enquanto que para as rodovias com volumes de tráfego médio e baixo são especificados valores mínimos do EA igual a 45% e 40%, respectivamente. No Brasil, o valor mínimo do EA é de 55% para qualquer volume de tráfego.

Na norma portuguesa NP EN 933-8/2002, a umidade das amostras para o ensaio deve ser obtida durante a secagem das mesmas ao ar, sendo exigido expressamente que as amostras não devem ser secas em estufa. A norma americana ASTM D2419-02 recomenda que a amostra para o ensaio deve ser seca até constância de massa à temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e resfriada à temperatura ambiente antes do ensaio. Além disso, a referida norma afirma que os resultados em amostras que não foram secas, geralmente, fornecem resultados menores do que os ensaios obtidos a partir de amostras idênticas, mas que foram secas. O método brasileiro DNER-ME 054/97 diz que, se a amostra inicial não estiver úmida, esta deverá ser umedecida antes do peneiramento. Além disso, se o agregado gráudo apresentar finos aderentes que não se desprendam durante o peneiramento, deve-se secá-lo e esfregá-lo com as mãos, juntando-se os finos resultantes ao material que passou na peneira (Figuras 2.20 e 2.21). Dessa maneira, observa-se que não é especificado no procedimento brasileiro um teor de umidade para as amostras, nem um método de secagem para as mesmas.



Figura 2.20. Ensaio de Equivalente de Areia: (a) umedecimento, (b) peneiramento e (c) verificação da existência de finos sobre os agregados gráudos

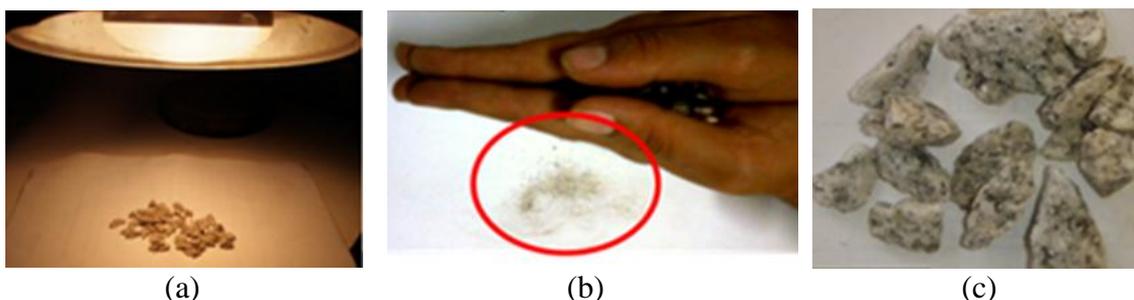


Figura 2.21. Ensaio de Equivalente de Areia: (a) secagem dos agregados graúdos, (b) atrito entre as mãos e os agregados, a fim de eliminar os finos e (c) verificação da existência de finos sobre os agregados graúdos

FREIRE *et al.* (2009) avaliaram a influência do teor de umidade no resultado final do ensaio de EA e identificaram as diferenças resultantes da metodologia de secagem das amostras. Estes autores caracterizaram 11 amostras de agregados provenientes de pedreiras diversas. Dessa forma, para cada agregado, foram preparadas e ensaiadas amostras contendo os seguintes teores de umidade: 0,1%, 1,0% e 2,0%, que estão enquadrados dentro dos limites preconizados na norma portuguesa NP EN 933-8 (0 a 2%). Além disso, também foram preparadas e ensaiadas amostras obtidas a partir de: (i) materiais secos em estufa a 105°C e (ii) peneiramento com teor de umidade superior (2%) e posteriormente seca ao ar até ficar com teor de umidade inferior ou igual a 0,1%.

Estes autores (FREIRE *et al.*, 2009) observaram que a variação do teor de água inicial das amostras não conduziu a uma variação significativa dos resultados obtidos, estando a variabilidade obtida dentro da repetibilidade permitida pelo ensaio. Também não houve diferenças significativas nos valores de EA obtidos para amostras preparadas nas mesmas condições (peneiradas com teor de umidade inferior ou igual a 0,1%) e posteriormente ensaiadas com diferentes teores de umidade. No entanto, o teor de umidade utilizado quando da preparação da amostra (peneiramento para obtenção de material passante na peneira de 2mm), pode ter alguma influência na granulometria final da amostra sujeita ao ensaio. Este fato pode afetar o resultado do ensaio de EA, devendo-se garantir que no peneiramento da amostra não haja aglomeração dos materiais mais finos (FREIRE *et al.*, 2009).

2.3.6. Densidade Aparente e Absorção do Agregado Graúdo

Para a realização do ensaio de densidade aparente e absorção do agregado graúdo, são encontradas as seguintes normas técnicas: ABNT NBR NM 53/2009; AASHTO T85/1991; ASTM C 127/2007; DNER ME 081/1998; DNER ME 195/1997. No Brasil, são mais utilizados os métodos do DNER (atual DNIT), pois são nacionais e fornecidos gratuitamente pelo órgão rodoviário.

Neste ensaio é determinada, por meio da massa do agregado seco em estufa, a massa do agregado na condição de Superfície Saturada Seca (SSS) e através da leitura na balança que corresponde à massa do agregado submerso em água, a densidade aparente do agregado. Esta é a razão entre a massa e o volume da porção impermeável de um agregado. A absorção, que é o aumento da massa de agregado devido ao preenchimento de seus vazios com água, é calculada a partir dos valores da massa do agregado seco e da massa do agregado na condição SSS. A norma brasileira não prevê o cálculo da densidade real (D_r), que pode ser calculada através da fórmula proposta pela norma ASTM C 127-07: $D_r = MS / (MS - L)$, onde MS = massa do agregado seco em estufa, em g; e L = leitura na balança correspondente ao agregado submerso em água, em g. A Figura 2.22 apresenta algumas etapas do ensaio de densidade.



Figura 2.22. Densidade aparente e absorção: (a) pesagem inicial; (b) lavagem sobre a peneira nº4; (c) secagem em estufa até massa constante; (d) imersão por 24h; (e) secagem da superfície do agregado com um pano absorvente e (f) pesagem imersa

A determinação da densidade real dos agregados influencia diretamente o cálculo da Densidade Máxima Teórica (DMT) de uma mistura asfáltica, que é efetuado

a partir da ponderação das densidades reais dos materiais componentes da mistura (ABNT NBR 12891/93). Dessa maneira, falhas no procedimento de determinação da densidade real podem levar o projetista de mistura asfáltica a obter valores de DMT equivocados e, por conseguinte, escolher um teor ótimo de ligante incorreto.

2.3.7. Densidade Real do Agregado Miúdo

O ensaio de densidade real do agregado miúdo pode ser efetuado utilizando-se uma das normas técnicas: ABNT NBR NM 52/2003; ASTM C 127/2004; AASHTO T84/1991; ASTM C 128; DNER ME 084/1995; DNER ME 194/1998. No Brasil, os métodos do DNER (atual DNIT) são os mais utilizados, por serem nacionais e fornecidos gratuitamente pelo órgão rodoviário. A Figura 2.23 apresenta as principais etapas para a determinação da densidade real do agregado miúdo. O ensaio é feito em amostra de 500g, seca em estufa até massa constante, que é inserida dentro de um picnômetro limpo e seco, cuja capacidade seja de 500ml. Registra-se a massa do conjunto picnômetro mais amostra seca. Em seguida, adiona-se água destilada ao conjunto picnômetro mais amostra e leva-se para aquecimento, tendo o cuidado de agitar o picnômetro para evitar superaquecimento (Figura 2.23).

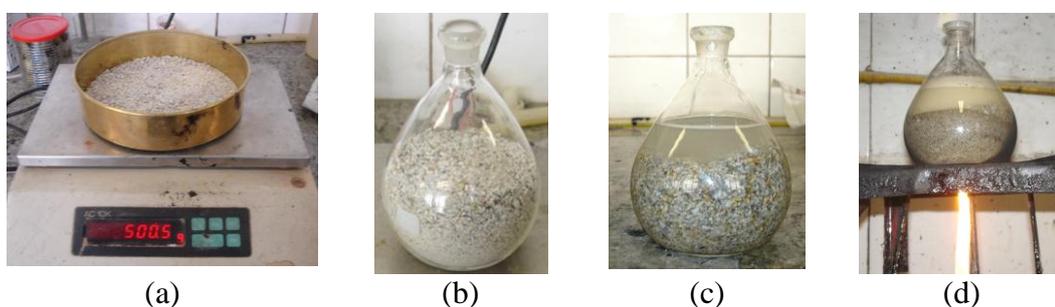


Figura 2.23. Ensaio de densidade real do agregado miúdo: (a) amostra inicial de 500g; (b) picnômetro mais amostra seca; (c) picnômetro mais amostra mais água para aquecimento e (d) aquecimento do conjunto picnômetro mais amostra mais água

Antes de cada pesagem do picnômetro, deve-se verificar se o mesmo encontra-se limpo e seco. Após o aquecimento, ao fazer a complementação do volume do picnômetro com água destilada, deve ser tomado o devido cuidado com relação à temperatura da vidraria, pois esta influenciará diretamente na quantidade de água a ser adicionada e, por conseguinte, no valor da pesagem e da densidade obtida ao final do ensaio (Figura 2.24).

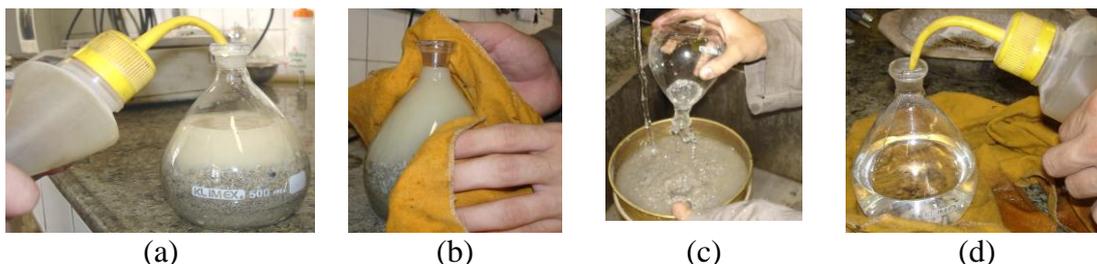


Figura 2.24. Ensaio de densidade real do agregado miúdo: (a) enchimento do picnômetro com água destilada até a marca de referência; (b) limpeza do picnômetro para pesagem; (c) retirada da amostra de dentro do picnômetro e (d) enchimento do picnômetro com água destilada

2.4. CONCRETO ASFÁLTICO

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT-ES 031/2006), Concreto Asfáltico (CA) é uma mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (fíler), se necessário, e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), espalhada e compactada a quente. Estes materiais devem satisfazer às normas pertinentes e às especificações aprovadas pelo DNIT. Quanto ao tipo de ligante asfáltico, podem ser utilizados: CAP 30/45, CAP 50/70 e CAP 85/100. Quanto ao tipo de agregado, existem algumas exigências que devem ser satisfeitas.

O controle de qualidade dos agregados consta dos seguintes ensaios: abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98); índice de forma superior a 0,5 (DNER-ME 086); durabilidade, apresentando perda inferior a 12% (DNER-ME 089); adesividade (DNER-ME 079/94). Os ensaios de rotina que devem ser realizados são: granulometria (DNER-ME 083/98); equivalente de areia do agregado miúdo (DNER-ME 054/97) e granulometria do fíler (DNER-ME 083/98).

Se o CA contiver DOPE (agente melhorador de adesividade), também deve ser efetuado o ensaio em estufa de filme fino rotativo (RTFOT) (ASTM D 2872/2004) ou o ensaio do Efeito do Calor e do Ar (ECA) (ASTM D 1754/1997), degradação induzida pela umidade (DNER-ME 138/94) e ensaio para determinação do índice de forma para o agregado graúdo (DNER-ME 086/94).

Nas misturas asfálticas também deve haver uma avaliação do desempenho mecânico, que pode ser feita por meio dos ensaios: estabilidade Marshall (DNER-ME 043/95) e resistência à tração por compressão diametral (DNER-ME 138/94).

2.5. LABORATÓRIOS PARTICIPANTES DO PROGRAMA INTERLABORATORAL DA REDE ASFALTO N/NE

A REDE ASFALTO N/NE é um arranjo composto, em 2007, por um grupo de nove instituições (UFAM, UFPA, UEMA, UFC, UFRN, UFCG, UFPE, UFS e UFBA) em nove estados das regiões Norte e Nordeste do Brasil, coordenada pela UFC (Figura 2.25). A REDE tem como objetivo auxiliar na montagem de infra-estrutura física e de pessoal para que esses grupos possam atender às demandas locais referentes à pavimentação.



Figura 2.25. Universidades integrantes da REDE ASFALTO N/NE

Quando da formação da REDE ASFALTO N/NE, havia apenas dois grupos com atuação na área da pavimentação, a UFC e a UFCG. As demais instituições possuíam grupos de geotecnia, porém sem pesquisas na área de pavimentação. Dessa maneira, a REDE ASFALTO N/NE foi iniciada como uma rede de difusão, devido à carência de pessoal na área de pavimentação nas universidades do N/NE. Com isso, estes grupos foram capazes de fazer surgir (em alguns casos, re-surgir) a área de pavimentação em suas instituições, montando uma infraestrutura básica, criando disciplinas na graduação e áreas de concentração e linhas de pesquisa na pós-graduação. Quanto às equipes de trabalho presentes em cada instituição, a Tabela 2.5 informa a quantidade de pesquisadores ligados aos projetos da REDE ASFALTO N/NE ao final do ano de 2008.

Tabela 2.5. Equipe executora

Universidade	Doutores	Mestres	Graduados	Técnicos	TOTAL
UFAM	2	3	4	1	10
UFPA	2	1	0	0	3
UEMA	2	2	0	2	6
UFC	10	3	3	4	20
UFRN	4	1	0	0	5
UFCG	2	1	1	1	5
UFPE	4	1	0	1	6
UFBA	1	4	4	2	11
UFS	3	1	1	2	7
Total	30	17	13	13	73

A seguir, é apresentada uma breve descrição da infraestrutura física dos laboratórios envolvidos na REDE ASFALTO N/NE e que participaram do Programa Interlaboratorial apresentado nessa dissertação.

2.5.1. Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

O Grupo de Geotecnia (GEOTEC) juntamente com o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFAM participam da REDE ASFALTO N/NE desde 2002. O GEOTEC visa desenvolver alternativas para a melhoria dos pavimentos da região Norte. Possui parcerias importantes (Petrobras/UNB-Sol, Ministério dos Transportes), e ao mesmo tempo obteve financiamento de órgãos de fomento – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), por meio de concorrência por editais públicos, o que lhe permitiu solidificar seus conhecimentos. O grupo conta com uma equipe de dez pessoas. Dentre os membros desse grupo, três pessoas atuam diretamente no PC-02 da REDE ASFALTO N/NE.

O laboratório do GEOTEC possui uma área física de 816m² e conta com os seguintes equipamentos: *Universal Technical Machine* (prensa computadorizada; secador de ar e compressor); kit para ensaio RaTT (*Creep* confinado); *Beam Fatigue* – aparelho para execução de testes de fadiga em viga; compactador Marshall automático; prensa Marshall; *Rice test*; banho maria; extrator de betume; viscosímetro *Saybolt/Furol*; aparelho para determinação de ponto de fulgor e misturador com manta aquecedora.

2.5.2. Universidade Federal do Pará (UFPA)

A UFPA possui o Laboratório de Engenharia Civil, que é estruturado com os equipamentos básicos para dosagem de misturas asfálticas. Há ainda o Laboratório de Eco-Compósitos do Departamento de Engenharia Mecânica, que possui um moinho do tipo MA-590 com almofariz/pistilo motorizado e um reômetro Haake modelo RS-6000. O laboratório de Eco-compósitos mantém parceria com o Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, para as análises que não podem ser feitas na UFPA.

2.5.3. Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

A UEMA possui o Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LSP/UEMA), que é referência em pavimentação no estado do Maranhão. A carência ainda de pessoal se dá, sobretudo, por não haver um programa de mestrado implantado na área.

2.5.4. Universidade Federal do Ceará (UFC)

A UFC possui o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), que foi construído anteriormente à fundação da REDE, ainda em 1999. Destacam-se os seguintes equipamentos: simulador de tráfego laboratorial com mesa compactadora; dois compactadores Superpave; dois compactadores Marshall; *Universal Testing Machine* (UTM); prensa Marshall; *Rice test*; banho maria; extrator de betume; viscosímetro *Saybolt/Furol*; aparelho para determinação de ponto de fulgor; sete estufas; cinco balanças eletrônica; Iatrosan; *Jar Test*; LWT; WTAT; dois misturadores mecânicos de misturas asfálticas, equipamento Los Angeles, dentre outros. Além do LMP, existem como laboratórios parceiros: Laboratório de Polímeros; Centro de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) do Nordeste (Departamento de Química Orgânica e Inorgânica) e manutenção do equipamento de RMN; Laboratório de Computação Gráfica (LCG) – também conhecido como Lab4, que pertence ao grupo de Computação Gráfica (CRAb) do Departamento de Computação da UFC e que faz parte do grupo de Laboratórios de Pesquisa em Computação (LIA) desse mesmo departamento. O LMP conta com uma equipe de 53 pessoas trabalhando nas diversas áreas da pavimentação: misturas asfálticas, ligantes asfálticos, solos, modelagem computacional, automação e gerência de pavimentos.

2.5.5. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

A UFRN possui o Laboratório de Asfalto, que esteve desativado até o início dos projetos da REDE ASFALTO N/NE. O laboratório voltou ao funcionamento a partir de uma reforma do seu espaço físico, da aquisição de equipamentos básicos para a realização de ensaios em materiais para pavimentação e da recuperação dos equipamentos existentes. A UFRN possui uma equipe de cinco pessoas envolvidas nos projetos da REDE ASFALTO.

2.5.6. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

A UFPE possui o Laboratório de Pavimentos, estruturado com os equipamentos básicos para dosagem de misturas asfálticas e um equipamento de carga repetida. A área de pavimentos asfálticos no que diz respeito à pesquisa e formação de pessoal é historicamente deficiente em Pernambuco e, antes da existência da REDE ASFALTO N/NE, não havia pesquisas nesta área. Vale destacar as diversas dissertações de mestrado desenvolvidas em tempo parcial, com o apoio da COPPE/UFRJ, da UFC e da UFCG, e contando com a participação de empresas.

2.5.7. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

A UFCG possui o Laboratório de Engenharia de Pavimentos, que conta com uma área de 326m², onde funciona parte das pesquisas relacionadas à REDE. Este laboratório têm se mantido principalmente com recursos oriundos de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento, consultorias e serviços técnicos, sendo muitos deles financiados por instituições públicas e empresas privadas.

Existe também o Laboratório de Infra-Estrutura, que possui uma área de 450m² onde são realizados ensaios de infra-estrutura, de solos, de ligante asfáltico e de misturas asfálticas. Neste laboratório podem ser encontrados os seguintes equipamentos: prensa hidráulica de 150ton, prensa de CBR, equipamento Los Angeles, britador de mandíbulas, conjunto de equipamentos para realização de ensaios de distribuição dos tamanhos de partículas de solos, compactador Marshall automático, prensa Marshall, Compactador Giratório Superpave (CGS), viscosímetro Brookfield, estufas, prensa de CBR "in situ", penetrômetro sul africano, penetrômetro estático, banho maria, ductilômetro, viscosímetro *Saybolt/Furol*, misturador de Concreto

Asfáltico (CA), ensaio de placa, sonda rotativa para extração de Corpos de Prova (CP) de misturas asfálticas e de concreto de cimento Portland, bomba a vácuo, dentre outros. Finalmente, há o Laboratório de Solos I, com área e 531m², destinado à realização de ensaios para caracterização de solos e agregados.

2.5.8. Universidade Federal da Bahia (UFBA)

A UFBA possui o Laboratório de Geotecnia e iniciou a montagem do Laboratório de Pavimentação (móvel e fixo). Este laboratório possui os seguintes equipamentos: agitador; aparato para viscosidade cinemática; balanças de 5 e 10kg; banho maria; bomba de vácuo; centrífuga; dois compactadores automáticos; compactador giratório; equipamento para ensaio triaxial dinâmico; quatro estufas; estufa RTFOT; extrator de CP; dois extratores de ligantes; jogo completo de peneiras; misturador automático (novo); penetrômetro; reômetro de cisalhamento dinâmico; soquete manual; vaso de pressão; viscosímetro *Saybolt/Furol*, dentre outros.

2.5.9. Universidade Federal de Sergipe (UFS)

A UFS possui o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação, onde podem ser encontrados os seguintes equipamentos: vaso aberto Cleveland para determinação do ponto de fulgor de ligantes; aparelho para determinação do ponto de amolecimento (anel e bola de ligantes); termômetro digital (70 a 1200°C); destilador de água – capacidade para cinco litros por hora (110V); aparelho extrator de betume Soxhlet; soquete eletro-mecânico para moldagem de CPs tipo Marshall; equipamentos para ensaios de Mini-MCV e Mini-CBR; reômetro de cisalhamento dinâmico-mecânico, modelo CSA II da TA Instruments, para estudos reológicos de ligantes, ensaios de carga repetida para solos e misturas asfálticas. A UFS conta com um grupo de sete pessoas trabalhando no PC-02 da REDE ASFALTO N/NE.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O LMP/UFC foi o responsável pela preparação e envio das amostras de agregados, ligante asfáltico e mistura asfáltica solta do Ceará para as demais oito universidades participantes da REDE ASFALTO N/NE, bem como pela análise dos resultados dos ensaios de caracterização e da dosagem Marshall das misturas asfálticas.

3.1.1. Agregados

Os agregados utilizados são de origem granítica e provenientes da pedreira de Itaitinga (Figura 3.1), situada a aproximadamente 30km da cidade de Fortaleza/CE. Coletaram-se aproximadamente duas toneladas de material britado (brita $\frac{3}{4}$ ”, brita $\frac{3}{8}$ ” e pó-de-pedra), seguindo o procedimento descrito na norma DNER-PRO 120/97: “Coleta de amostras de agregados”. Os agregados foram levados ao LMP/UFC, onde se realizaram os processos de homogeneização e quarteamento, de maneira manual e de acordo com a norma DNER-PRO 199/96: “Redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório”.



Figura 3.1. Localização da pedreira de Itaitinga

A divisão do material foi feita em recipientes plásticos com capacidade para 30 litros, devidamente lacrados com tampa e fita adesiva (Figura 3.2). Dessa maneira, o material estava protegido contra qualquer tipo de contaminação externa ou de derramamento. Os recipientes foram etiquetados com a especificação do material, o objetivo do seu uso e os endereços de origem e de destino. Cada universidade recebeu

dois recipientes contendo pó-de-pedra, dois contendo brita 3/8'' e três contendo brita 3/4''.

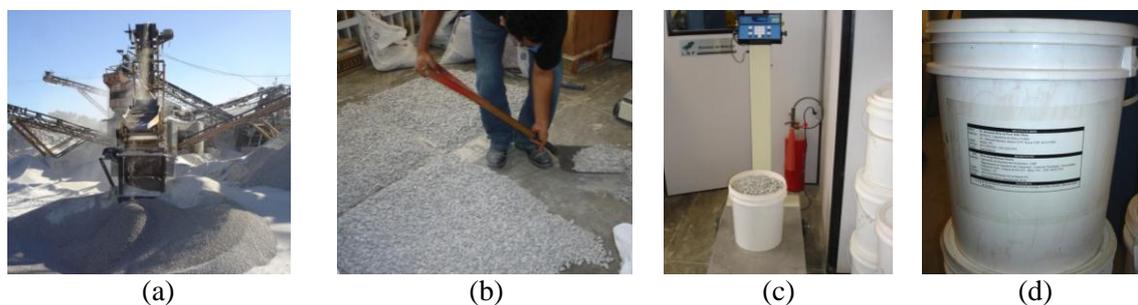


Figura 3.2. Amostras: (a) coleta; (b) homogeneização e quartearmento; (c) pesagem e (d) etiquetagem dos agregados

Os agregados foram caracterizados com relação à absorção e densidade de agregado graúdo (DNER-ME 081/98); abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98); densidade real – agregado miúdo (DNER-ME 084/95); densidade real do fíler (DNER-ME 085/94); equivalente de areia (DNER-ME 054/97); granulometria (DNER-ME 083/98); índice de forma (ABNT NBR 7809/06) e adesividade a ligante betuminoso (DNER-ME 078/94).

3.1.2. Cimento Asfáltico de Petróleo

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) utilizado nessa pesquisa foi fornecido pela Lubrificantes do Nordeste (Lubnor/Petrobras) e é caracterizado por penetração como um CAP 50/70, de acordo com a nova especificação brasileira (ANP, 2005). Este é proveniente do petróleo nacional Fazenda Alegre e atendeu a todas as especificações da ANP. Cada universidade recebeu um recipiente contendo em média 20kg de CAP 50/70, proveniente da mesma remessa fornecida pela Lubnor/Petrobras.

3.1.3. Mistura Asfáltica Solta

Para facilitar a análise do procedimento de dosagem Marshall, foram enviadas amostras de mistura asfáltica solta aos laboratórios. Essas misturas foram utilizadas para compactação de CPs no compactador Marshall de cada laboratório participante. Dessa maneira, com os resultados de densidade aparente e do Volume de vazios (Vv) dos CPs obtidos, foi possível detectar: a necessidade de calibração ou não dos compactadores; a ocorrência de falhas na pesagem hidrostática e os erros de cálculo para a determinação da densidade aparente das amostras.

Foram preparadas 45 amostras de mistura asfáltica solta, de maneira que cada um dos nove laboratórios participantes recebesse cinco amostras. A mistura asfáltica utilizada é do tipo CA, com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0mm, e curva granulométrica de projeto que se enquadra na faixa C do DNIT 031/2006-ES (Figura 3.3). A curva da Figura 3.3 também apresenta a composição granulométrica dos agregados utilizados na mistura asfáltica. Foi preparada uma mistura contendo 20% de brita 3/4", 44% de brita 3/8" e 36% de pó-de-pedra.

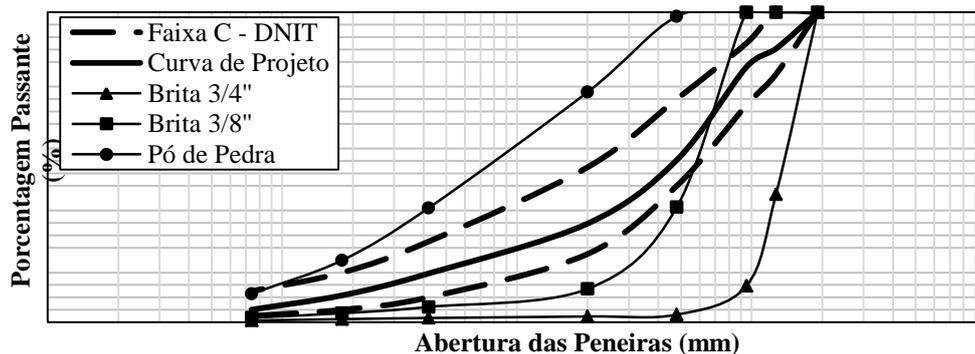


Figura 3.3. Curva granulométrica e granulometria dos agregados

As amostras foram preparadas individualmente no LMP/UFC por um mesmo operador de modo a reduzir as incertezas associadas ao fator humano. Os agregados foram fracionados utilizando a seguinte série de peneiras de malha quadrada: 19,1mm – 12,7mm – 9,5mm – 4,8mm – 2,0mm – 0,42mm – 0,18mm – 0,075mm. A separação dos agregados para a preparação das misturas se deu com controle peneira a peneira (Figura 3.4(a)). Os agregados foram aquecidos à temperatura de 175°C e o ligante à temperatura de 165°C (Figura 3.4(b)). Essas temperaturas foram determinadas a partir do gráfico de viscosidade *versus* temperatura do CAP (ASTM D 4402 – 06), conforme Figura 3.5. Em seguida, as misturas foram resfriadas e armazenadas em sacos plásticos limpos (Figuras 3.4(c) e 3.4(d)), para evitar contaminação, e devidamente etiquetados.



Figura 3.4. Preparação das amostras de mistura asfáltica solta: (a) controle peneira a peneira dos agregados; (b) ligante aquecido a 165°C; (c) resfriamento e preparação das amostras e (d) amostras ensacadas

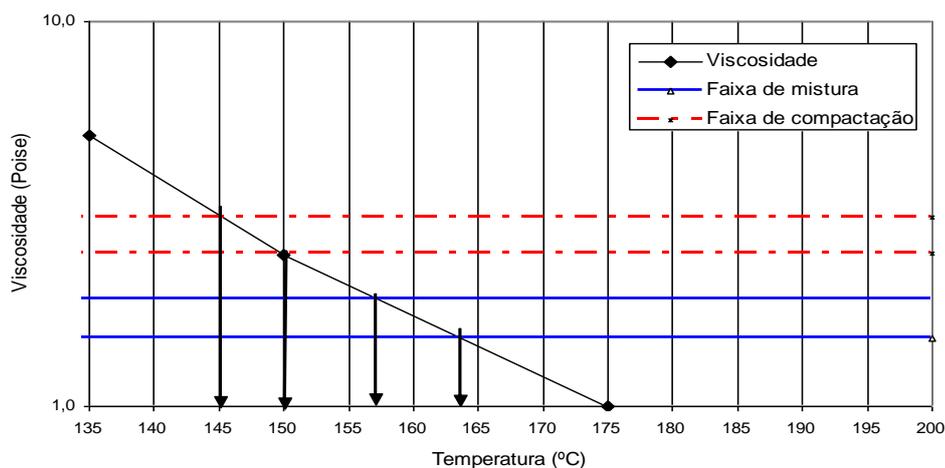


Figura 3.5. Gráfico da viscosidade *versus* temperatura do CAP 50/70 utilizado

Os procedimentos de mistura e compactação de cada CP pelos laboratórios seguiram os seguintes passos:

- 1) Destorrear a mistura asfáltica contida na embalagem de plástico e transferir para uma bandeja metálica limpa;
- 2) Manter a temperatura da estufa estável a 150°C (temperatura de compactação) e deixar estabilizar;
- 3) Inserir a bandeja, contendo a mistura asfáltica, dentro da estufa com temperatura estabilizada a 150°C e deixar aquecer durante 30 minutos;
- 4) Retirar a mistura da estufa e, com o uso de um termômetro, conferir se a temperatura da mesma é de 150°C;
- 5) Prosseguir com a compactação (75 golpes por face), observando atentamente as recomendações constantes no item 5.3 do método DNER-ME 043/95;

- 6) Após a retirada do CP do molde, efetuar a retirada das bordas com uma espátula;
- 7) Determinar a densidade aparente (G_{mb}) das amostras a partir do método DNER-ME 117/94, que consiste em deixar o CP esfriar à temperatura ambiente ($25\pm 5^{\circ}\text{C}$) e registrar sua massa seca, M_s . Em seguida, mergulhar o CP em água a $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 4 ± 1 minutos e registrar a massa imersa, M_{sub} . Calcular o volume do CP por meio da expressão $V = M_s - M_{sub}$ e, finalmente, calcular a densidade aparente utilizando a fórmula: $G_{mb} = M_s/V$;
- 8) Após a determinação das densidades, proteger os CPs contra impactos em embalagens de plástico-bolha e os encaminhar ao LMP/UFC para realização de nova pesagem.

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros volumétricos obtidos quando essa mistura foi dosada na UFC. Espera-se, então, que os laboratórios obtenham resultados semelhantes a estes para as cinco amostras compactadas por eles.

Tabela 3.1. Parâmetros de dosagem Marshall (75 golpes por face)

Parâmetro	Valor	Tolerância
G_{mb}	2,31	$\pm 0,02$ (DNER-ME 117/94)
Vv (%)	4,0	$\pm 0,4$
DMT*	2,409	-

Além dos materiais para caracterização, também foram distribuídos para os laboratórios participantes normas técnicas necessárias à realização dos ensaios e formulários contendo instruções de procedimentos e espaços para preenchimento com os resultados e possíveis observações. Todos os ensaios de caracterização dos agregados foram feitos em duas amostras semelhantes de acordo com a respectiva norma. Para garantir a precisão do operador, foi recomendado que uma mesma pessoa conduzisse o ensaio nas duas amostras. Não havendo, porém, necessidade de todos os ensaios serem desenvolvidos pelo mesmo operador.

Na primeira parte do programa, foi decidido que o laboratório organizador não poderia opinar com relação aos procedimentos dos ensaios para não tendenciar os

resultados. Foi orientado para que cada laboratório fizesse os ensaios conforme a capacidade da sua estrutura. Essa etapa foi essencial para a avaliação do nível de clareza e eficiência das normas. Cada laboratório tentou realizar os ensaios utilizando somente as informações disponíveis nas normas e nos formulários enviados. Desta forma, foi proposta leitura atenta das normas, discussão dentro de cada laboratório a respeito das respectivas dúvidas e realização dos ensaios da maneira que cada grupo melhor entendesse.

Terminada a fase de caracterização dos agregados, as universidades enviaram ao LMP/UFC os formulários devidamente preenchidos com os resultados dos ensaios, observações relevantes e fotos registradas durante os mesmos. Os resultados obtidos foram estatisticamente analisados por meio dos métodos da elipse de confiança tradicional, da elipse de confiança aceitável (robusta), do z-score robusto, e dos testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran*.

3.2. METODOLOGIA

Nesta seção é apresentado um estudo estatístico das possíveis dispersões de resultados dos ensaios de caracterização dos agregados e das dosagens das misturas asfálticas que podem ocorrer entre os laboratórios participantes, buscando compatibilizar os resultados. As atividades foram divididas da seguinte maneira:

- 1) Convite às universidades a participarem do programa;
- 2) Levantamento dos ensaios que cada universidade é capaz de realizar com a infraestrutura disponível;
- 3) Coleta de agregado granítico na Pedreira de Itaitinga no estado do Ceará;
- 4) Aquisição de ligante asfáltico junto à Lubnor/Petrobras;
- 5) Compra de recipientes para armazenamento do material granítico;
- 6) Homogeneização, quarteamento e divisão do material;
- 7) Preparação de cartas convites e etiquetas para identificação dos recipientes (Anexo);

- 8) Envio do material para as universidades;
- 9) Preparação de formulários com instruções de procedimentos e com espaços para preenchimento com os resultados e possíveis observações (Anexo);
- 10) Caracterização dos agregados. Cada ensaio de caracterização, listado abaixo, foi realizado em duas amostras pelo mesmo operador:
 - Análise granulométrica (DNER-ME 083/98);
 - Absorção e densidade de agregado graúdo (DNER 081/98);
 - Densidade real de agregado miúdo (DNER-ME 084/95);
 - Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98);
 - Equivalente de areia (DNER-ME 054/97);
 - Índice de forma (ABNT NBR 7809/2006);
 - Adesividade a ligante betuminoso (DNER-ME 078/94).
- 11) Envio dos resultados para o LMP/UFC;
- 12) Análise e divulgação, por parte do LMP/UFC, dos resultados de caracterização de agregados;
- 13) Envio de cinco amostras de mistura asfáltica solta para os participantes, com o objetivo de verificar a necessidade de calibração dos compactadores Marshall, das balanças e das estufas. Além disso, essa atividade foi realizada para facilitar a compreensão dos resultados de dosagem Marshall obtidos anteriormente. Após concluir a compactação e as pesagens, cada universidade enviou os CPs compactados para a UFC, a fim de que fosse realizada uma nova pesagem das amostras;
- 14) Dosagem de misturas asfálticas por cada universidade utilizando a metodologia Marshall. Para esta etapa, foram usados os resultados de

caracterização de agregados obtidos na primeira etapa dos ensaios. O objetivo desta decisão foi de verificar a influência da caracterização dos agregados na determinação do teor de projeto de ligante. A determinação da G_{mb} e o cálculo do V_v foram feitos utilizando a DMT calculada. Os agregados foram fracionados para a confecção dos CPs;

- 15) Análise, divulgação dos resultados parciais e solicitação da repetição de alguns ensaios para uniformizar os procedimentos;
- 16) Análise e divulgação dos resultados do procedimento de compactação Marshall das cinco amostras;
- 17) Intervenção em algumas universidades a fim de corrigir possíveis erros cometidos.

CAPÍTULO 4

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo apresenta a análise estatística dos resultados dos ensaios, utilizando as ferramentas elipse de confiança tradicional, elipse de confiança aceitável (robusta), z-score robusto e os testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran*. O programa utilizado para o traçado das elipses foi o INTERLAB2001, desenvolvido pela JCOLIVIERI Consultoria para a interpretação de resultados de programas interlaboratoriais, indicando os tipos de erros eventualmente cometidos (sistemáticos ou aleatórios). Este *software* é livre e está disponível no *site* da referida empresa consultora na internet (OLIVIERI, 2009). Todas as elipses foram traçadas com um grau de confiança de 95%. Os valores de z-score robusto foram obtidos por meio de planilhas elaboradas no *Microsoft Office Excel*.

O programa para traçado da elipse de confiança foi elaborado com o intuito de interpretar resultados de ensaios físicos e físico-químicos, calibrações ou análises químicas, obtidos em Programas Interlaboratoriais. Esta técnica estatística, bivariada, mostra de uma forma visual (gráfica) a compatibilização dos resultados entre laboratórios participantes de um Programa Interlaboratorial. Além disso, ela faz comentários sobre os tipos de erros aleatórios e/ou sistemáticos cometidos pelos participantes, orientando-os quanto a eventuais ações corretivas. A última versão do Programa da Elipse de Confiança de 2001 e o respectivo Aplicativo (Programa Computacional Amigável) encontram-se também disponíveis (OLIVIERI, 2004).

A partir de 2004, para desenvolvimento da Dissertação de Mestrado: Programas Interlaboratoriais - Proposta de Modelo para Interpretação de Resultados de Análises Químicas (Olivieri, 2004), o Programa da Elipse de Confiança foi atualizado e reformulado, utilizando-se estatística robusta e variabilidades aceitáveis (OLIVIERI, 2004). Esta versão foi denominada Elipse de Confiança Aceitável, e permite verificar também, além do que verifica as versões anteriores, o desempenho dos laboratórios participantes de um Programa Interlaboratorial.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1. Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo: DNER-ME 081/98

Densidade Aparente (Brita 3/4'')

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para a determinação da densidade aparente da brita 3/4'' por nove laboratórios. A partir do teste de *Dixon*, para a identificação de valores dispersos, consideraram-se *outliers* a Amostra A do Laboratório 1 e as duas amostras do Laboratório 2. O teste de *Cochran* foi efetuado com um grau de confiança de 95%, mas nenhum laboratório apresentou o par de amostras considerado como disperso.

Conforme apresentado na Tabela 4.1, a mediana da soma padronizada, $Md(S)$, dos ensaios foi de 3,70 e o Intervalo Interquartílico Normalizado, IQN , for igual a 0,027. Observa-se que os Laboratórios 1 e 6 apresentaram desempenho questionável e que o Laboratório 2 apresentou comportamento insatisfatório (Tabela 4.1 e Figura 4.1).

Tabela 4.1. Densidade aparente da brita 3/4''

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,55	2,57	3,62	-2,8	Questionável
2	1,61	1,62	2,28	-52,8	Insatisfatório
3	2,63	2,61	3,71	0,4	Satisfatório
4	2,61	2,60	3,69	-0,3	Satisfatório
5	2,62	2,62	3,71	0,3	Satisfatório
6	2,66	2,66	3,76	2,5	Questionável
7	2,62	2,61	3,70	0,2	Satisfatório
8	2,59	2,60	3,67	-1,0	Satisfatório
9	2,62	2,61	3,70	0,0	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	$Md(S)$	$Q1(S)$	$Q3(S)$	$IQ=(Q3-Q1)$	$IQN=(IQ \times 0,7413)$
	3,70	3,67	3,71	0,036	0,027

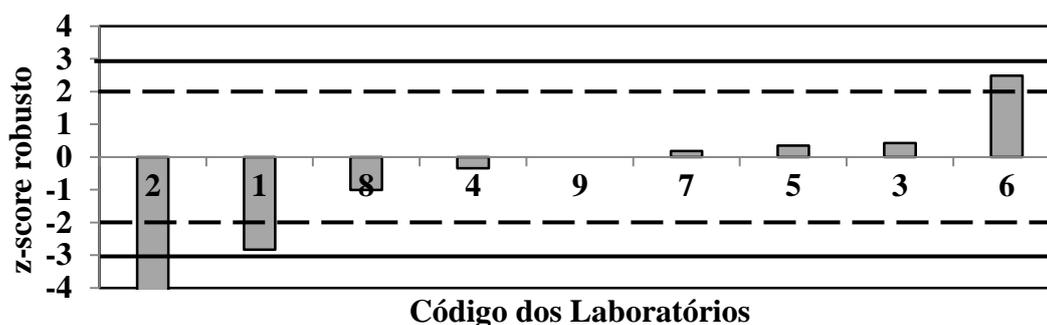


Figura 4.1. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/4''

A Tabela 4.2 e a Figura 4.2 apresentam os resultados das análises de z-score robusto após a repetição de ensaios pelos Laboratórios 1 e 2. Observa-se que o Laboratório 1 permaneceu com desempenho considerado insatisfatório, mas o Laboratório 2 passou a ter desempenho satisfatório. Além disso, percebe-se que o Laboratório 8 deixou de ser considerado satisfatório e passou a ser questionável. Isso se deve ao fato de que, após a repetição dos ensaios pelos laboratórios considerados com o desempenho questionável ou insatisfatório, são feitos novos cálculos. Então, os laboratórios que possuem um resultado diferente dos demais podem se tornar insatisfatórios. Quanto ao Laboratório 6, este permaneceu com comportamento tido como insatisfatório por não ter realizado a repetição do ensaio. Quando da realização dos testes de *Dixon* e de *Cochran*, após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2, nenhum resultado foi considerado disperso.

Tabela 4.2. Densidade aparente da brita 3/4” após correções dos Laboratórios 1 e 2

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,56	2,57	3,63	-4,9	Insatisfatório
2	2,62	2,61	3,70	0,0	Satisfatório
3	2,63	2,61	3,71	0,8	Satisfatório
4	2,61	2,60	3,69	-0,7	Satisfatório
5	2,62	2,62	3,71	0,6	Satisfatório
6	2,66	2,66	3,76	4,8	Insatisfatório
7	2,62	2,61	3,70	0,3	Satisfatório
8	2,59	2,60	3,67	-2,0	Questionável
9	2,62	2,61	3,70	-0,1	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	3,70	3,69	3,71	0,018	0,014

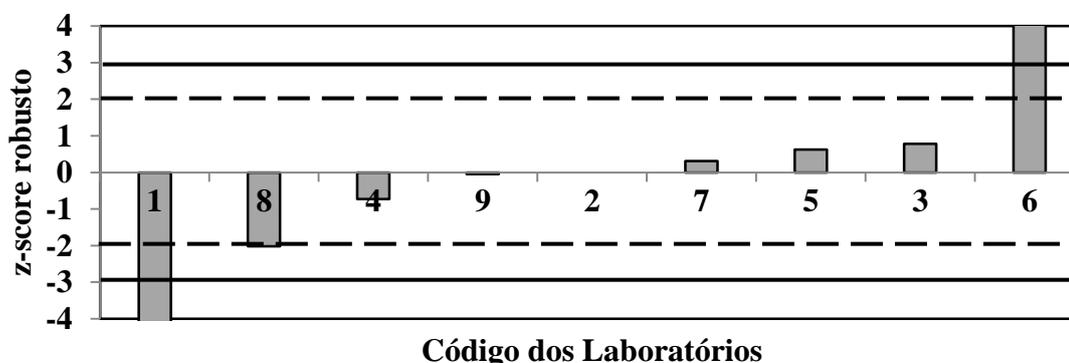


Figura 4.2. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/4”, após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

A Figura 4.3(a) apresenta a posição de cada laboratório com relação à elipse de confiança tradicional do ensaio de densidade aparente da brita 3/4”, traçada pelo programa INTERLAB2001 (utiliza média e desvio padrão). A média para a amostra A foi de 2,501, com desvio padrão de 0,336, e para a amostra B foi de 2,501, com desvio padrão de 0,331. Verifica-se que a elipse praticamente não se formou, possuindo um formato muito alongado, devido ao fato de quase todos os pontos estarem próximos ao cruzamento das retas que passam pela média dos valores x e y . No entanto, é possível observar que o ponto representativo do Laboratório 2 está distante dos demais e se situa no quadrante inferior esquerdo (indicado pela seta), pois obteve resultados baixos para ambas as amostras.

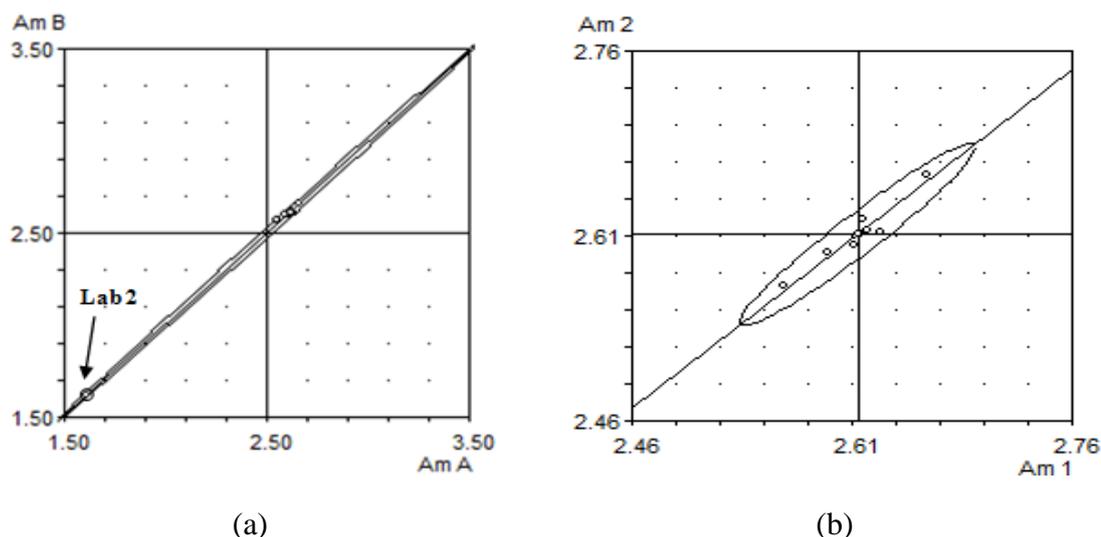


Figura 4.3. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

O que pode ter acontecido com o conjunto de dados em questão é que os erros sistemáticos podem ter se sobrepostos aos erros aleatórios. Dessa maneira, o conjunto de dados está com boa repetitividade dentro do laboratório, porém com má reprodutibilidade entre os laboratórios. Esse tipo de erro pode ser caracterizado como erro sistemático, pois os resultados das duas amostras são semelhantes entre si, porém menores do que os resultados das amostras dos demais participantes. Possivelmente, equipamentos como a balança ou a estufa podem estar descalibrados ou, então, pode ter acontecido algum erro sistemático de interpretação da norma.

Nas Figuras 4.4(a) e (b) apresentam-se as elipses de confiança para o mesmo ensaio (densidade aparente da brita 3/4”), quando traçadas pelo programa Elipse de

Confiança Aceitável (OLIVIERI, 2004), antes e depois da correção dos resultados apenas pelo Laboratório 2. Como o referido programa só está disponível para uso pelo autor do mesmo (OLIVIERI, 2004), então não houve tempo hábil para incluir os resultados do Laboratório 1 nas elipses após a repetição dos ensaios. Observa-se, claramente, que a maioria dos pontos está agrupada próxima à interseção das linhas medianas e que um único ponto (Laboratório 2) encontra-se afastado dos demais ao longo da linha bissetriz (Figura 4.4(a)). Na Figura 4.4(b) todos os laboratórios estão dentro da elipse, sendo, portanto, considerados com desempenhos satisfatórios. Vale lembrar que no caso da Elipse de Confiança Aceitável são utilizados conceitos de estatística robusta, sendo utilizados a mediana e o desvio padrão aceitável, em vez de média e desvio padrão como é usado na Elipse de Confiança Tradicional.

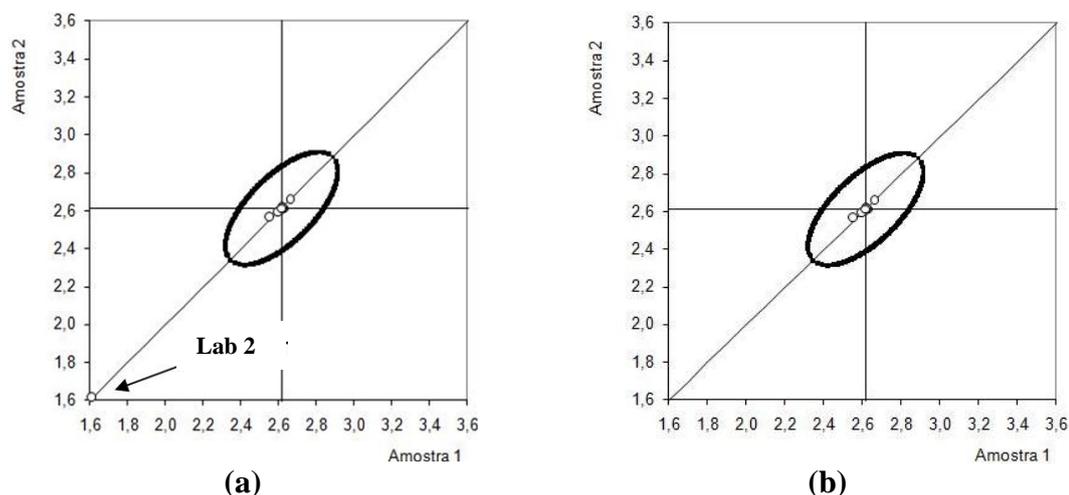


Figura 4.4. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 2

As possíveis causas de erros nos resultados dos ensaios de densidade aparente do agregado graúdo são: (i) obtenção incorreta da massa da amostra ensaiada; (ii) depois de lavada, secagem incorreta da amostra em estufa, para posterior imersão em água durante 24 ± 4 h; (iii) falta de resfriamento da amostra ao ar, à temperatura ambiente, durante o período de 1 a 3h, antes da imersão da mesma em água; (iv) falta de imersão da amostra durante 24 ± 4 h; (v) falta de secagem da amostra até massa constante, antes da determinação da massa seca; (vi) falta do procedimento de tara do cesto para pesagem hidrostática não foi determinada por meio da pesagem do mesmo em água; (vii) falta de controle da temperatura da estufa entre 105 e 110°C ou (viii) erros de cálculo ou erros de leitura da balança.

Densidade Real (Brita 3/4'')

A Tabela 4.3 apresenta a análise dos resultados dos ensaios de densidade real da brita 3/4'' considerando os resultados obtidos pelos nove laboratórios. Observa-se que os Laboratórios 1 e 2 obtiveram desempenho insatisfatório ($z \leq -3$) e questionável ($-3 < z < -2$), respectivamente, que também podem ser observados na Figura 4.5. Os valores de densidade real calculados pelos Laboratórios 1 e 2 estão abaixo do valor de referência (mediana). Este erro influencia o resultado final da dosagem Marshall, com relação ao cálculo da DMT e do Vv dos CPs, que assumem valores inferiores aos que deveriam assumir caso não houvesse o erro, levando o projetista a escolher um teor ótimo de ligante abaixo do recomendado. Foi sugerida a correção dos erros pelos laboratórios para que fossem feitos novos cálculos para a determinação dos valores de DMT para todos os teores de ligante testados na dosagem Marshall. A partir do teste estatístico de *Dixon*, para a identificação de valores dispersos, verificaram-se que as amostras A e B do Laboratório 1 são consideradas *outliers*. Para o teste de *Cochran*, com grau de confiança de 95%, o par de amostras do Laboratório 2 foi considerado disperso.

Tabela 4.3. Densidade real da brita 3/4''

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,53	2,54	3,58	-5,9	Insatisfatório
2	2,63	2,60	3,70	-2,0	Questionável
3	2,67	2,66	3,77	0,5	Satisfatório
4	2,66	2,65	3,76	0,1	Satisfatório
5	2,63	2,63	3,72	-1,2	Satisfatório
6	2,66	2,66	3,77	0,5	Satisfatório
7	2,64	2,64	3,73	-0,9	Satisfatório
8	2,65	2,66	3,75	0,0	Satisfatório
9	2,66	2,65	3,75	0,0	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	3,75	3,72	3,76	0,040	0,029

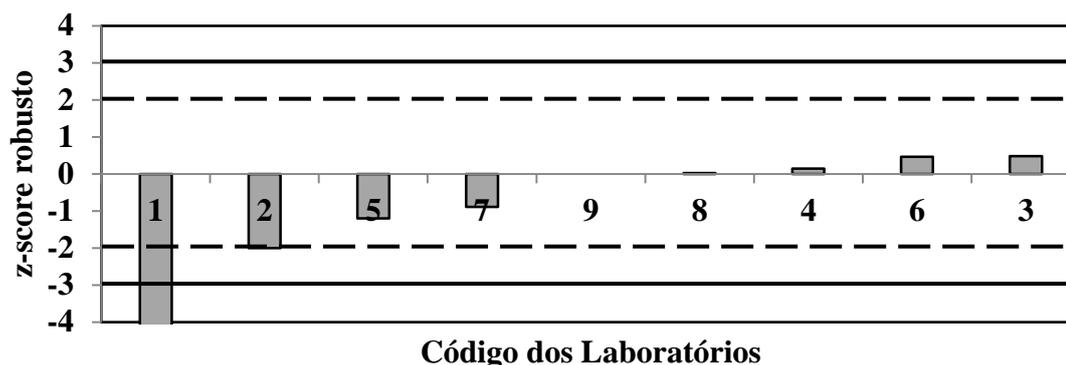


Figura 4.5. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/4'

A Tabela 4.4 e a Figura 4.6 apresentam os resultados das análises dos valores de z-score robusto após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2. Observa-se que, com os novos resultados fornecidos pelos Laboratórios 1 e 2, estes passaram a assumir um comportamento satisfatório, enquanto que os Laboratórios 5 e 7 assumiram desempenho questionável. Quando da realização do teste estatístico de *Dixon*, nenhum resultado foi considerado disperso. Porém, o resultado do teste estatístico de *Cochran* considerou o par de amostras do Laboratório 4 como disperso.

Tabela 4.4. Densidade real da brita 3/4' após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,653	2,650	3,75	-0,38	Satisfatório
2	2,669	2,668	3,77	1,46	Satisfatório
3	2,666	2,663	3,77	1,03	Satisfatório
4	2,664	2,651	3,76	0,27	Satisfatório
5	2,628	2,631	3,72	-2,75	Questionável
6	2,664	2,664	3,77	0,97	Satisfatório
7	2,635	2,637	3,73	-2,05	Questionável
8	2,654	2,656	3,75	0,00	Satisfatório
9	2,656	2,653	3,75	-0,05	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	Md(S)	Q1(S)	Q3(S)	$IQ=(Q3-Q1)$	$IQN=(IQ \times 0,7413)$
	3,755	3,750	3,767	0,018	0,013

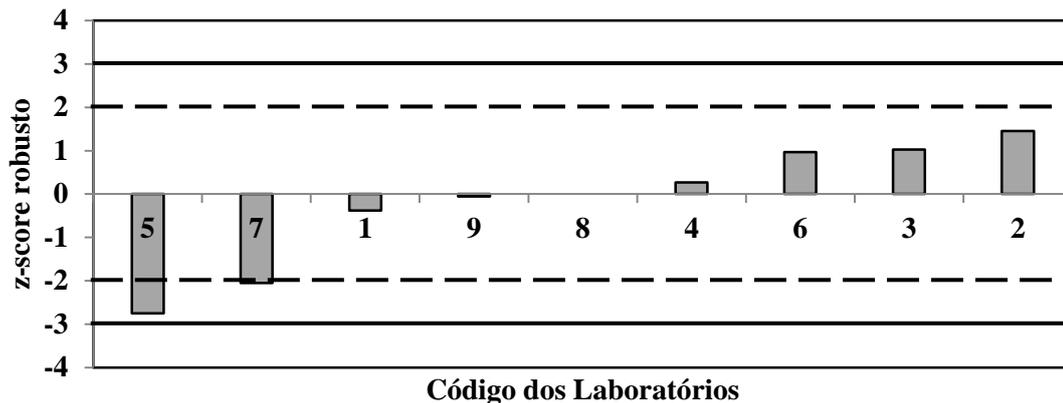


Figura 4.6. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/4'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

As Figuras 4.7(a) e (b) apresentam a posição de cada laboratório com relação à Elipse de Confiança (INTERLAB2001) do ensaio de densidade real da brita 3/4'', antes e depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2. A média para a amostra A foi de 2,654, com desvio padrão de 0,014 e para a amostra B foi de 2,653, com desvio padrão de 0,012 (Figura 4.7(b)). Verifica-se que os Laboratórios 1 e 2 estão afastados dos demais na elipse da Figura 4.7(a).

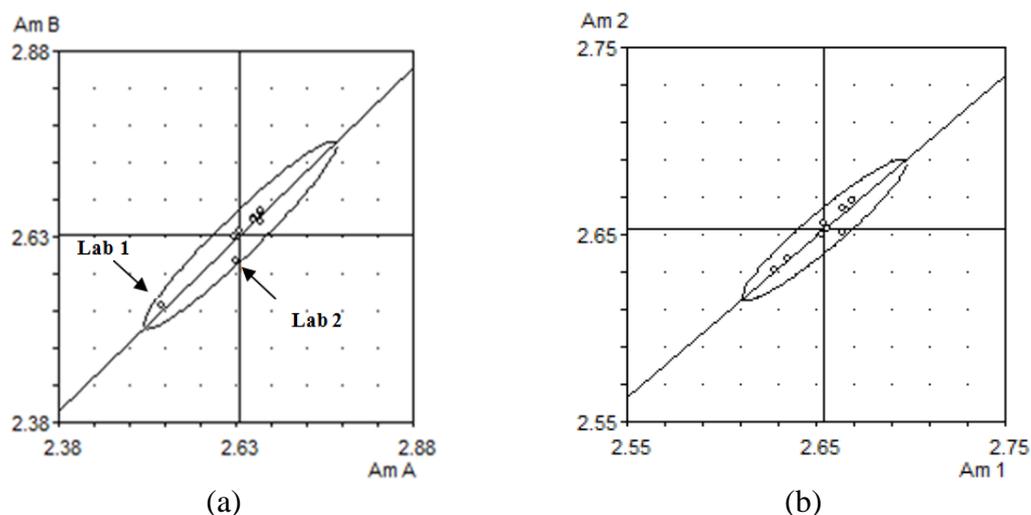


Figura 4.7. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001 para o ensaio de densidade real da brita 3/4'': (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

As Figuras 4.8(a) e (b) apresentam as elipses traçadas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável, antes da repetição dos ensaios pelo Laboratório 2. Observa-se, contudo, que todos os resultados dos laboratórios encontram-se dentro da Elipse de Confiança e próximos ao cruzamento das linhas medianas. Todos os laboratórios obtiveram desempenho considerado satisfatório antes e após a análise, inclusive os

Laboratórios 1 e 2, que foram tidos como com desempenhos insatisfatórios na análise do z-score robusto.

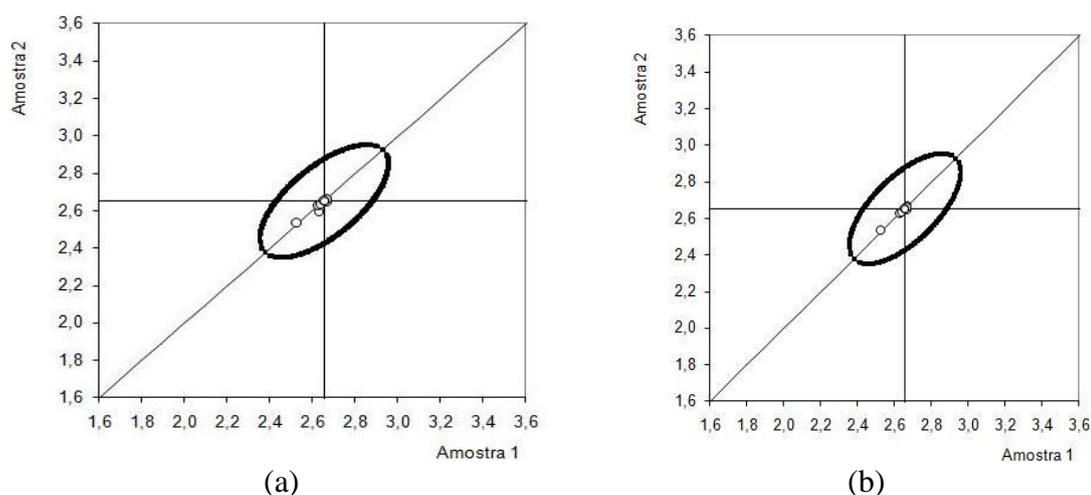


Figura 4.8. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 2

Absorção (Brita $\frac{3}{4}$ '')

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção da brita $\frac{3}{4}$ '' são apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.9. Os testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran* consideraram todos os resultados como não dispersos. Os valores de $Md(S)$ e de IQN foram 0,83 e 0,57, respectivamente. Todos os laboratórios obtiveram resultados satisfatórios no que diz respeito à classificação do z-score robusto.

Tabela 4.5. Resultados do ensaio de absorção da brita $\frac{3}{4}$ ''

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	1,00	1,17	1,53	1,2	Satisfatório
2	0,20	0,21	0,29	-0,9	Satisfatório
3	0,52	0,72	0,88	0,1	Satisfatório
4	0,77	0,69	1,03	0,4	Satisfatório
5	0,17	0,12	0,21	-1,1	Satisfatório
6	0,05	0,05	0,07	-1,3	Satisfatório
7	0,19	0,18	0,26	-1,0	Satisfatório
8	0,89	0,85	1,23	0,7	Satisfatório
9	0,59	0,59	0,83	0,0	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	$Md(S)$	$QI(S)$	$Q3(S)$	$IQ=(Q3-QI)$	$IQN=(IQ \times 0,7413)$
	0,83	0,26	1,03	0,77	0,57

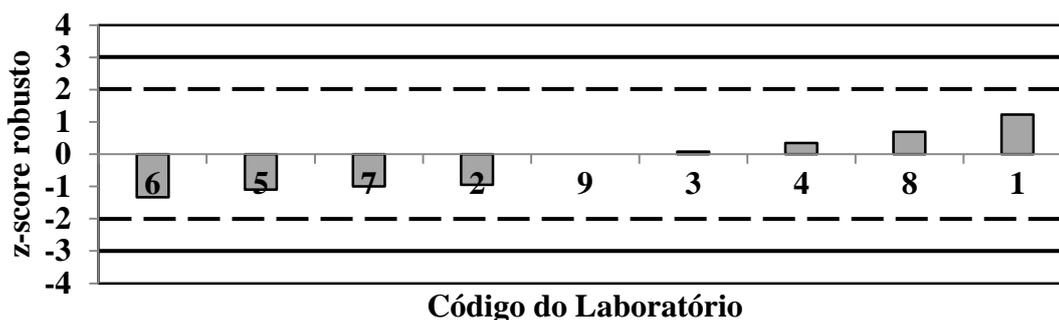


Figura 4.9. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de absorção da brita 3/4''

A obtenção do resultado de absorção do agregado graúdo se dá a partir do ensaio de Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo: DNER-ME 081/98. Então, a partir deste único ensaio, obtêm-se três parâmetros (densidade aparente, densidade real e absorção). Dessa maneira, os laboratórios que obtiveram desempenho insatisfatório para algum dos três parâmetros, repetiram o ensaio, obtiveram três novos parâmetros e tais parâmetros foram utilizados nas análises de desempenho. Por exemplo, os Laboratórios 1, 2 e 6 obtiveram desempenho satisfatório para o ensaio de absorção, porém, obtiveram desempenho insatisfatório na determinação da densidade aparente e/ou real. Por isso, estes laboratórios enviaram novos resultados de absorção para uma nova análise.

Dessa maneira, a Tabela 4.6 e a Figura 4.10 apresentam os resultados de absorção após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6. Observa-se que os Laboratórios 1, 5 e 7 passaram a apresentar um desempenho insatisfatório em relação aos demais laboratórios.

Tabela 4.6. Resultados do ensaio de absorção da brita 3/4'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	1,30	1,20	1,77	3,6	Insatisfatório
2	0,76	0,81	1,11	0,4	Satisfatório
3	0,52	0,72	0,88	-0,8	Satisfatório
4	0,77	0,69	1,03	0,0	Satisfatório
5	0,17	0,12	0,21	-4,0	Insatisfatório
6	0,81	0,76	1,11	0,4	Satisfatório
7	0,19	0,18	0,26	-3,7	Insatisfatório
8	0,89	0,85	1,23	1,0	Satisfatório
9	0,59	0,59	0,83	-1,0	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQ=(IQ×0,7413)</i>
	1,03	0,83	1,11	0,279	0,207

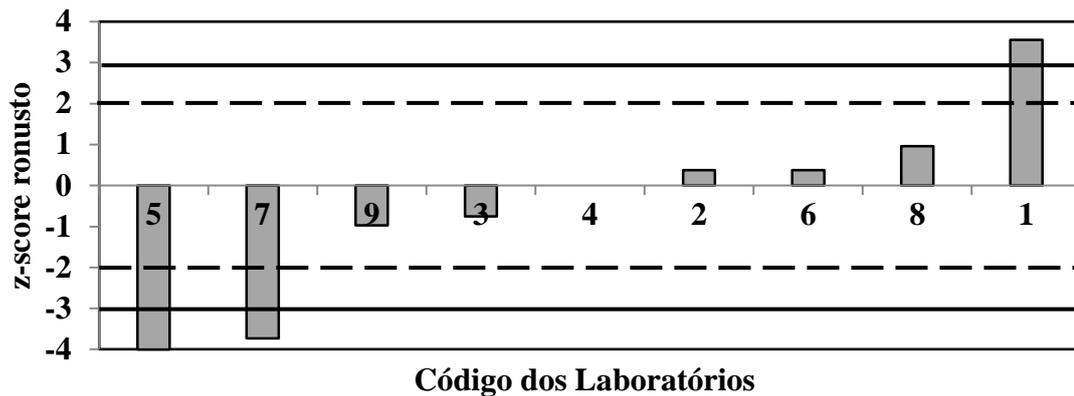


Figura 4.10. Gráfico do z-score para o ensaio de absorção da brita $\frac{3}{4}$ '', após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6

As Figuras 4.11(a) e (b) apresentam as elipses de confiança tradicionais (estatística clássica – média e desvio padrão) para o ensaio de absorção da brita $\frac{3}{4}$ '', antes e depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6. Observa-se que, após a repetição, três pontos ficaram afastados dos demais (indicados pelas setas), representando a dispersão dos resultados dos Laboratórios 1, 5 e 7.

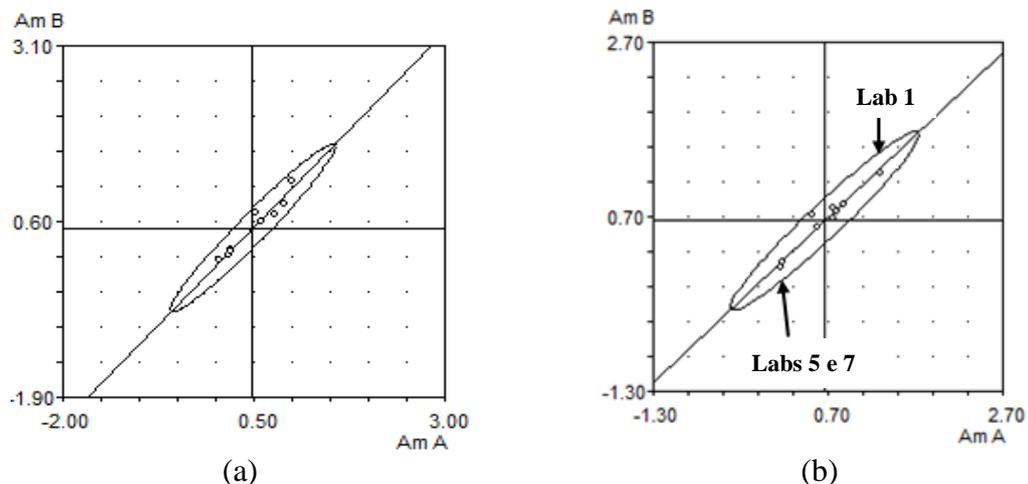


Figura 4.11. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da correção e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 2 e 6

As Figuras 4.12(a) e (b) apresentam as elipses geradas pelo Programa Elipse de Confiança Aceitável, antes e depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6 (lembrando que foi explicado anteriormente que os resultados do Laboratório 1 para os novos ensaios não aparecem nas Elipses de Confiança Aceitáveis, pois estas foram traçadas pelo autor do programa, não havendo tempo hábil para incluir os resultados gerados pelo Laboratório 1). A partir de análises efetuadas pelo programa, com relação à Figura 4.12(a), os Laboratórios 1, 2, 5, 6 e 7 possuem desempenho insatisfatório, com

presença de erro sistemático; os Laboratórios 3 e 9 possuem desempenho insatisfatório, com presença de erro aleatório; e os Laboratórios 4 e 8 possuem desempenho insatisfatório, com ocorrência de erros aleatório e sistemático. Observa-se que o Laboratório 6 sequer aparece na Figura 4.12(a), porque os valores obtidos por ele foram muito baixos com relação aos demais laboratórios (ver Tabela 4.5).

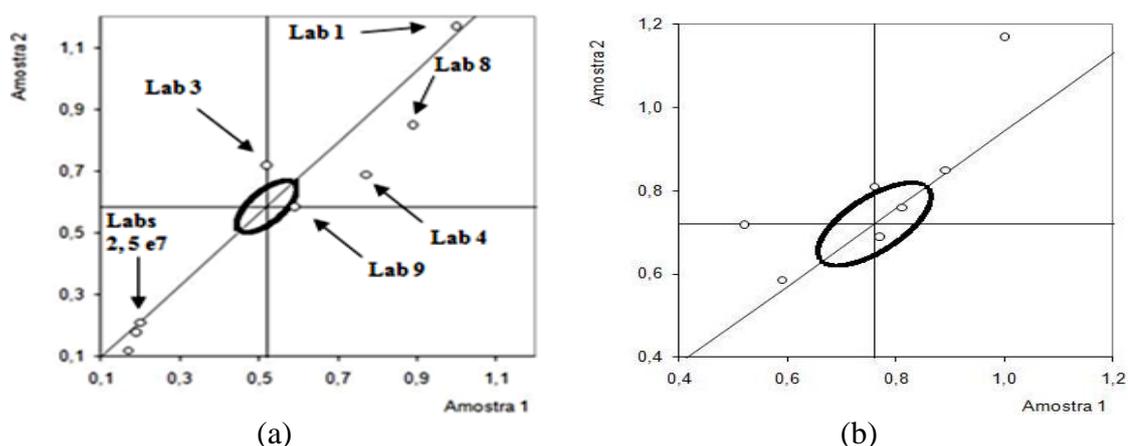


Figura 4.12. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6

Com relação à situação após repetição dos ensaios (Figura 4.12(b)), o programa constatou que os Laboratórios 4 e 6 apresentaram desempenho satisfatório; os Laboratórios 2 e 3 apresentaram desempenho insatisfatório, com presença de erro aleatório; os Laboratórios 5, 7, 8 e 9 apresentaram desempenho insatisfatório, com presença de erro sistemático e o Laboratório 1 apresentou desempenho insatisfatório, com ocorrência de erros aleatório e sistemático. Lembrando que erros aleatórios são erros ocasionais, que indicam que houve variabilidade de resultados dentro do laboratório, podendo ter origem em erros de leitura, em conversão de valores, em transcrição de resultados, etc. Erros sistemáticos são provenientes de condições adversas do laboratório, como, por exemplo, a existência de um equipamento não calibrado.

O acontecimento deste tipo de dispersão dos resultados revela desvantagem da análise por meio da mediana dos valores obtidos. A inexistência de um valor tido como referência somada à ocorrência de resultados dispersos leva a análises que podem ser duvidosas. Esse tipo de dispersão de resultados pode ser devido à seguinte etapa do ensaio: “Remover a amostra da água e espalhá-la sobre um pano absorvente no tamanho adequado até que as películas visíveis de água sejam eliminadas. Enxugar as partículas

maiores uma a uma. Tomar os cuidados necessários para evitar a evaporação de água dos poros durante a operação de secagem da superfície dos grãos. Após, determinar a massa da amostra na condição SSS e registrar o valor obtido (Mh), com aproximação de 0,5g (DNER-ME 081/98)".

Neste momento do ensaio de absorção, o valor de Mh irá depender do que o operador considera "películas visíveis de água". Cada operador poderá ter um critério diferente. Além disso, a secagem da superfície dos grãos também depende exclusivamente de como o operador verificará a evaporação na água dos poros.

Densidade Aparente (Brita 3/8'')

A Tabela 4.7 mostra os resultados obtidos para a determinação da densidade aparente da brita 3/8'' por nove laboratórios. O teste estatístico de *Dixon* considerou as duas amostras referentes ao Laboratório 2 como *outliers*, enquanto que o teste estatístico de *Cochran*, efetuado com um grau de confiança de 95%, não identificou nenhum laboratório com par de amostras disperso.

Conforme apresentado na Tabela 4.7, a mediana da soma padronizada, $Md(S)$, dos ensaios foi de 3,59 e o Intervalo Interquartil Normalizado, IQN , igual a 0,082. Observa-se, então, que os valores obtidos para S de cada laboratório são bem próximos ao valor da mediana, à exceção do Laboratório 2. Este participante apresentou um valor de S mais disperso, resultando em um desempenho insatisfatório ($|z| \geq 3$) (Tabela 4.7 e Figura 4.13).

Tabela 4.7. Densidade aparente da brita 3/8''

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,46	2,47	3,49	-1,3	Satisfatório
2	1,62	1,63	2,30	-15,9	Insatisfatório
3	2,58	2,58	3,65	0,7	Satisfatório
4	2,55	2,54	3,59	0,0	Satisfatório
5	2,60	2,60	3,67	0,9	Satisfatório
6	2,50	2,51	3,54	-0,7	Satisfatório
7	2,58	2,58	3,65	0,7	Satisfatório
8	2,55	2,54	3,59	0,0	Satisfatório
9	2,58	2,59	3,65	0,7	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	$Md(S)$	$Q1(S)$	$Q3(S)$	$IQ=(Q3-Q1)$	$IQN=(IQ \times 0,7413)$
	3,59	3,54	3,65	0,110	0,0818

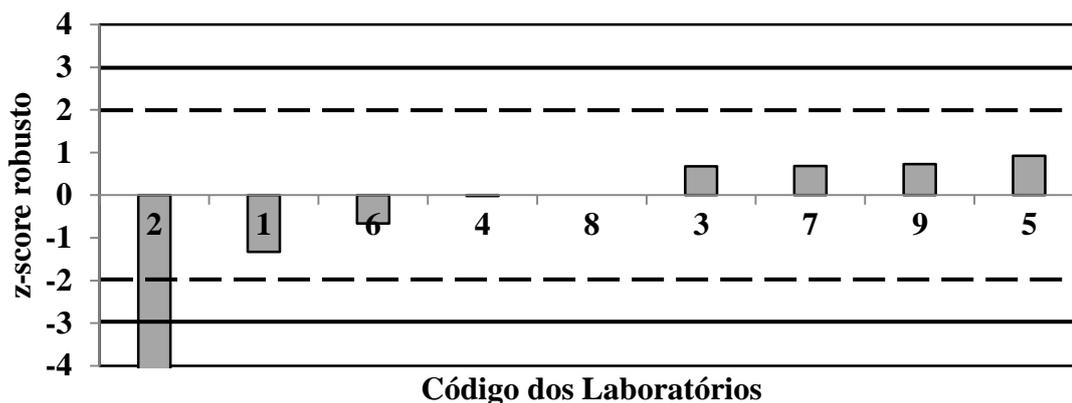


Figura 4.13. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/8''

Conforme mencionado no item 4.1.1.5., Absorção (Brita 3/4''), os laboratórios com desempenho insatisfatório para algum dos três parâmetros (densidade aparente, densidade real e absorção) repetiram o ensaio de determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo (DNER-ME 081/98), obtendo três novos parâmetros, sendo tais parâmetros utilizados nas análises de desempenho. Este caso aconteceu com o Laboratório 1, com relação ao ensaio de densidade aparente da brita 3/8'', obtendo desempenho insatisfatório na determinação da densidade real da brita 3/8'' (que será mostrado no próximo item) e, por isso, enviou novos resultados de densidade aparente, densidade real e absorção.

A Tabela 4.8 e a Figura 4.14 apresentam os resultados das análises z-score após a repetição de ensaios pelos Laboratórios 1 e 2. Observa-se que os Laboratórios 1 e 2 passaram a apresentar desempenho satisfatório. Além disso, percebe-se que o Laboratório 6 deixou de ser satisfatório e passou a ter desempenho questionável. Quando da realização dos testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran*, após os novos ensaios realizados pelos Laboratórios 1 e 2, nenhum resultado foi considerado disperso.

Tabela 4.8. Densidade aparente da brita 3/8'' após repetições dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,57	2,50	3,59	-1,4	Satisfatório
2	2,58	2,59	3,66	0,1	Satisfatório
3	2,58	2,58	3,65	0,0	Satisfatório
4	2,55	2,54	3,59	-1,3	Satisfatório
5	2,60	2,60	3,67	0,5	Satisfatório
6	2,50	2,51	3,54	-2,4	Questionável
7	2,58	2,58	3,65	0,0	Satisfatório
8	2,55	2,54	3,59	-1,2	Satisfatório
9	2,58	2,59	3,65	0,1	Satisfatório
Parâmetros estatísticos	Md(S)	Q1(S)	Q3(S)	$IQ=(Q3-Q1)$	$IQN=(IQ \times 0,7413)$
	3,65	3,59	3,65	0,061	0,045

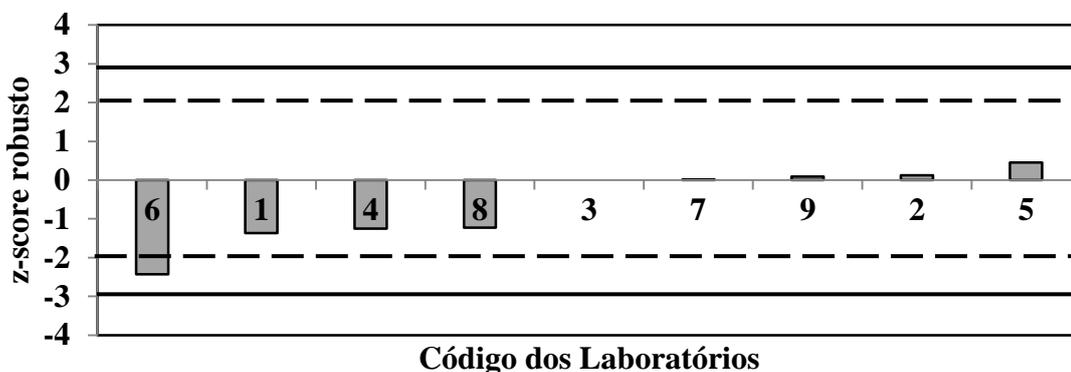


Figura 4.14. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade aparente da brita 3/8'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

As Figuras 4.15(a) e (b) apresentam a posição dos laboratórios com relação às elipses de confiança do ensaio de densidade aparente da brita 3/8'', traçadas pelo programa INTERLAB2001. Para o grupo de resultados da Figura 4.15(a), a média para a amostra A foi de 2,446, com desvio padrão de 0,314, e para a amostra B foi de 2,447, com desvio padrão de 0,309. Para o grupo de resultados da Figura 4.15(b), a média para a amostra A foi de 2,564, com desvio padrão de 0,029, e para a amostra B foi de 2,558, com desvio padrão de 0,037. Observa-se que a elipse da esquerda possui um formato tão alongado quanto aquele do ensaio de densidade aparente da brita 3/4'', onde o ponto representativo do Laboratório 2 também está afastado dos demais (Figura 4.3). Após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2, a elipse apresentou-se mais aberta (Figura 4.15(b)).

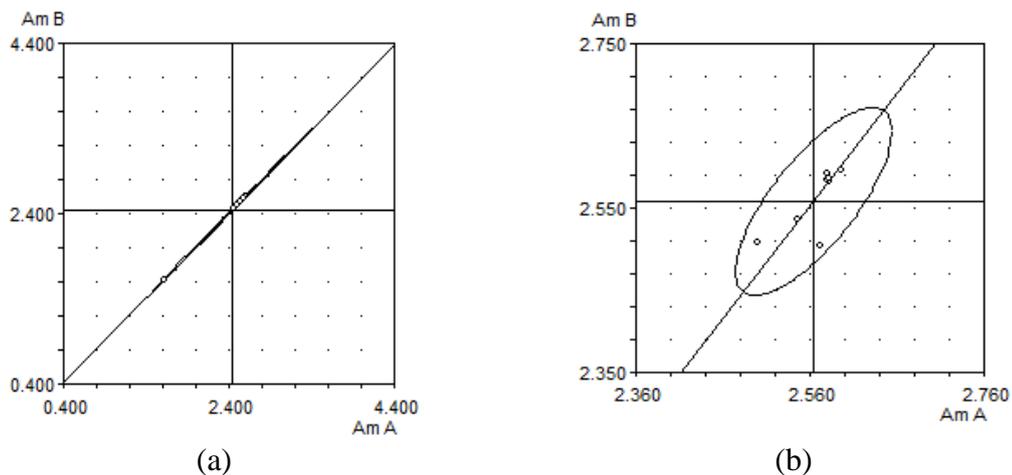


Figura 4.15. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

A Figura 4.16 apresenta as elipses de confiança para o mesmo ensaio, quando traçadas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável.

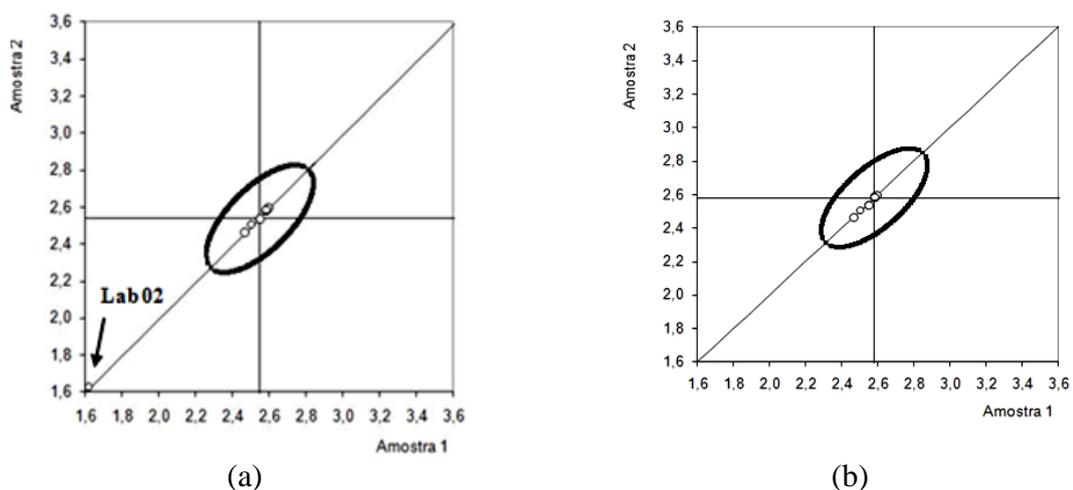


Figura 4.16. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 02

Os comentários gerados pelo programa utilizado para plotar a Figura 4.16(a) consideram que os Laboratórios 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 possuem desempenho satisfatório, e que Laboratório 2 possui desempenho insatisfatório, com presença de erro sistemático, oriundo de condições adversas do laboratório. Com relação à Figura 4.16(b) todos os Laboratórios apresentaram desempenhos satisfatórios.

Densidade Real (Brita 3/8'')

A Tabela 4.9 apresenta o resultado do ensaio de densidade real da brita 3/8''. O valor de $Md(S)$ obtido foi de 3,705 e o IQN foi igual a 0,030. Verifica-se que os Laboratórios 1 e 2 apresentaram resultados insatisfatórios, quando classificados pelo

método do z-score robusto (Tabela 4.9 e Figura 4.17). A partir do teste estatístico de *Dixon* nenhum resultado foi considerado disperso. Porém, para o teste estatístico de *Cochran* o par de amostras dos Laboratórios 2, 3 e 4 foram considerados dispersos por apresentarem amplitudes elevadas com relação aos demais laboratórios.

Tabela 4.9. Densidade real da brita 3/8''

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,39	2,40	3,39	-10,3	Insatisfatório
2	2,52	2,55	3,59	-3,9	Insatisfatório
3	2,67	2,66	3,77	2,0	Satisfatório
4	2,62	2,62	3,70	0,0	Satisfatório
5	2,62	2,63	3,71	0,3	Satisfatório
6	2,62	2,62	3,71	0,0	Satisfatório
7	2,61	2,62	3,70	-0,2	Satisfatório
8	2,65	2,65	3,75	1,3	Satisfatório
9	2,64	2,65	3,74	1,2	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	3,705	3,700	3,741	0,041	0,030



Figura 4.17. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/8''

A Tabela 4.10 e a Figura 4.18 apresentam os dados dos laboratórios após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2. Observa-se que ambos os laboratórios passaram a apresentar um desempenho satisfatório. Os testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran* não detectaram resultados dispersos após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2.

Tabela 4.10. Densidade real da brita 3/8'' após repetições dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,66	2,63	3,74	0,0	Satisfatório
2	2,66	2,69	3,78	1,4	Satisfatório
3	2,67	2,66	3,77	1,0	Satisfatório
4	2,62	2,62	3,70	-1,1	Satisfatório
5	2,62	2,63	3,71	-0,8	Satisfatório
6	2,62	2,62	3,71	-1,0	Satisfatório
7	2,61	2,62	3,70	-1,2	Satisfatório
8	2,65	2,65	3,75	0,3	Satisfatório
9	2,64	2,65	3,74	0,1	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	3,74	3,71	3,75	0,041	0,030

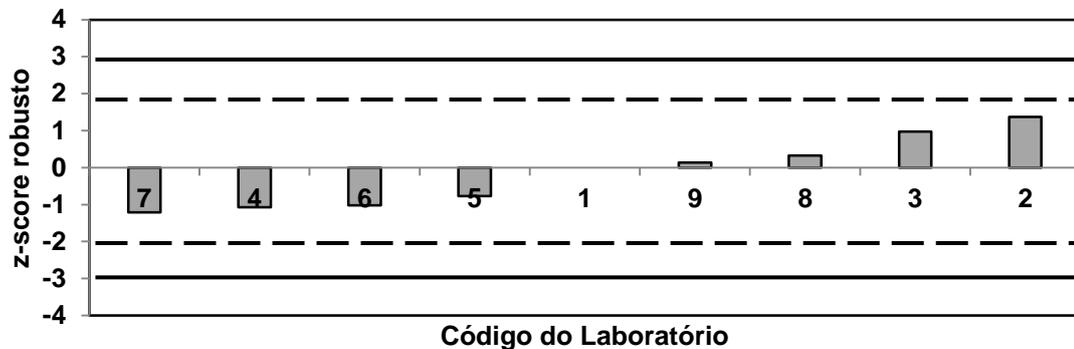


Figura 4.18. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real da brita 3/8'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

As Figuras 4.19(a) e (b) apresentam as elipses de confiança do ensaio de densidade real da brita 3/8''. Observa-se, na Figura 4.19, que os pontos representativos dos Laboratórios 1 e 2 encontram-se visivelmente afastados dos demais, caracterizando a dispersão dos seus resultados. Os demais pontos encontram-se próximos ao encontro das linhas (médias) que dividem os quadrantes. Na Figura 4.19(b), percebe-se que a elipse está mais aberta e os pontos encontram-se mais próximos ao encontro das linhas médias após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2.

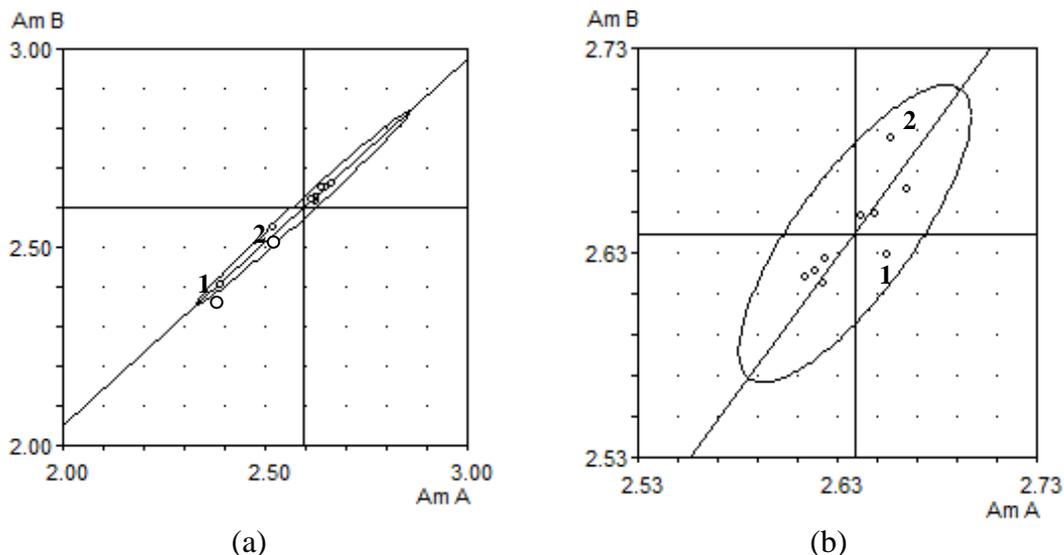


Figura 4.19. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

As Figuras 4.20(a) e (b) apresentam as elipses geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável antes e após a repetição pelo Laboratório 2. Não foi possível incluir o Laboratório 1 no traçado da elipse da Figura 4.20(b), por isso este Laboratório ainda apresenta-se com resultado disperso em relação aos demais. Contudo, o programa considerou que todos os laboratórios possuem desempenho satisfatório para as elipses das Figuras 4.20(a) e (b).

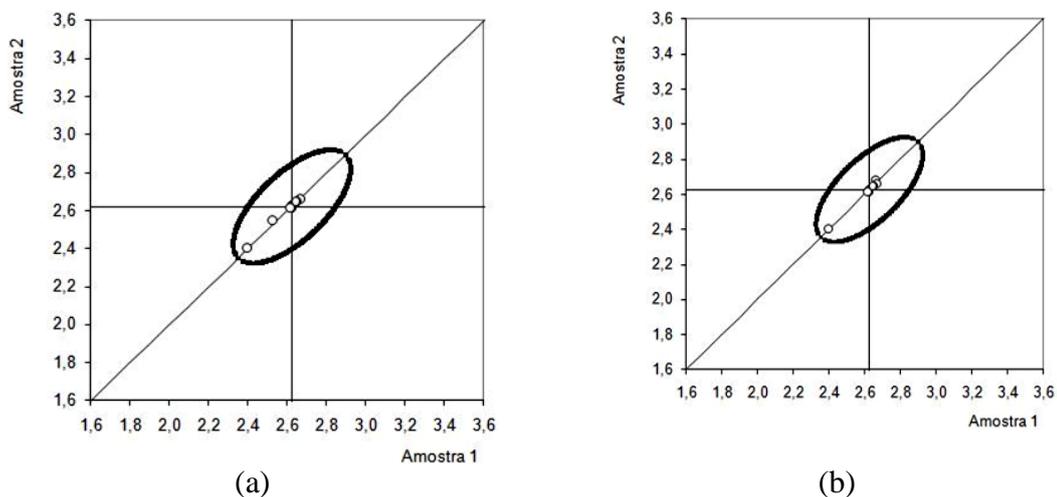


Figura 4.20. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 1

Absorção (Brita 3/8'')

A Tabela 4.11 apresenta o resultado do ensaio de absorção da brita 3/8''. O valor de $Md(S)$ obtido foi de 1,65 e o IQN foi igual a 0,74. Verifica-se que todos os

laboratórios apresentaram resultados satisfatórios, quando classificados pelo método do z-score robusto (Tabela 4.11 e Figura 4.21). A partir dos testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran*, todos os resultados foram aceitos, não havendo evidência de valores dispersos. Apesar disso, percebe-se que os laboratórios obtiveram resultados muito dispersos entre si, onde os valores de absorção variaram de 0,40 a 2,17, indicando que pode ter havido erros sistemáticos. O método do z-score robusto utilizado não considerou nenhum laboratório com resultado tido como insatisfatório. Então, deve-se buscar métodos mais sensíveis a este tipo de dispersão.

Tabela 4.11. Absorção (%) da brita 3/8''

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	1,97	2,17	2,93	1,7	Satisfatório
2	1,00	1,01	1,42	-0,3	Satisfatório
3	1,22	1,17	1,69	0,1	Satisfatório
4	1,17	1,16	1,65	0,0	Satisfatório
5	0,82	0,85	1,18	-0,6	Satisfatório
6	1,74	1,74	2,46	1,1	Satisfatório
7	0,40	0,42	0,58	-1,4	Satisfatório
8	1,51	1,68	2,26	0,8	Satisfatório
9	0,89	0,89	1,26	-0,5	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	Md(S)	Q1(S)	Q3(S)	$IQ=(Q3-Q1)$	$IQN=(IQ \times 0,7413)$
	1,65	1,26	2,26	1,00	0,74

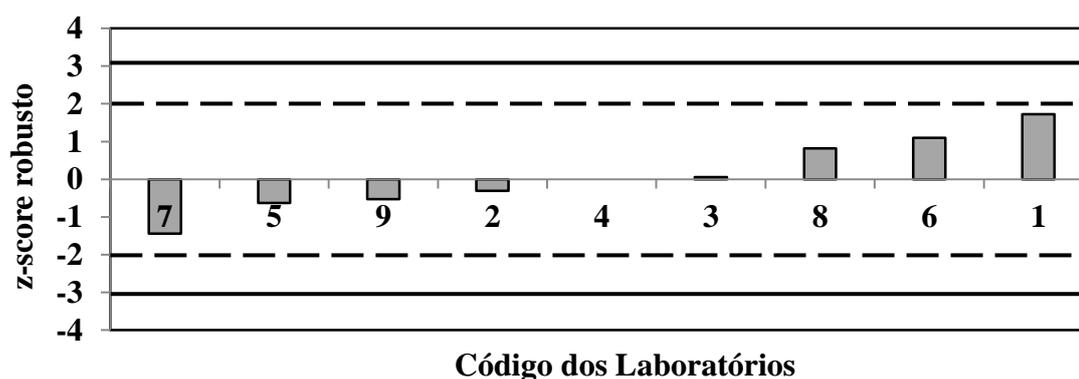


Figura 4.21. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de absorção da brita 3/8''

A Tabela 4.12 e a Figura 4.22 apresentam os dados dos laboratórios após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2. Estes laboratórios repetiram os resultados devido ao desempenho insatisfatório obtido por cada um na determinação dos parâmetros de densidade real e/ou densidade aparente da brita 3/8''. Percebe-se que, praticamente, não houve alteração na classificação dos laboratórios.

Tabela 4.12. Absorção (%) da brita 3/8'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	1,20	1,90	2,19	0,7	Satisfatório
2	1,24	1,58	1,99	0,4	Satisfatório
3	1,22	1,17	1,69	0,0	Satisfatório
4	1,17	1,16	1,65	-0,1	Satisfatório
5	0,82	0,85	1,18	-0,7	Satisfatório
6	1,74	1,74	2,46	1,1	Satisfatório
7	0,40	0,42	0,58	-1,6	Satisfatório
8	1,51	1,68	2,26	0,8	Satisfatório
9	0,89	0,89	1,26	-0,6	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	1,69	1,26	2,19	0,940	0,693

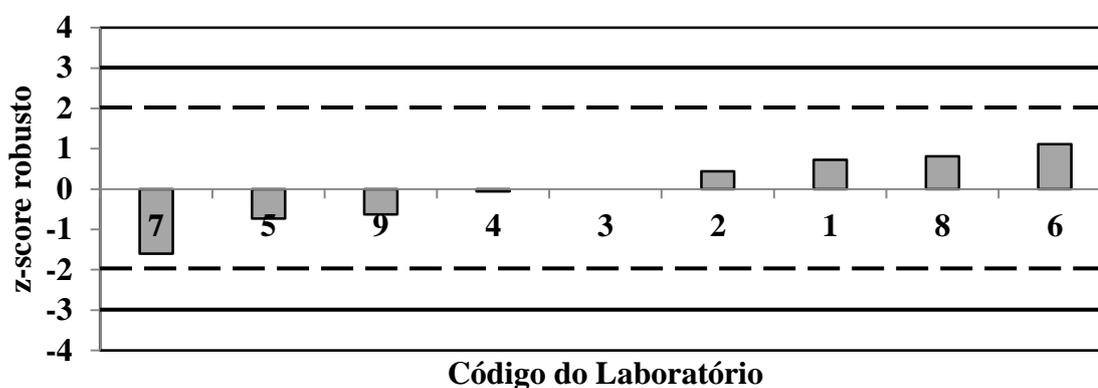


Figura 4.22. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de absorção da brita 3/8'' após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

As Figuras 4.23(a) e (b) apresentam as elipses de confiança do ensaio de absorção da brita 3/8''. Pode-se confirmar a presença dos erros sistemáticos, pois todos os pontos estão espalhados ao longo da linha diagonal, sendo alguns bem afastados da intercessão das retas que dividem os quadrantes e distribuídos entre o quadrante superior direito ou inferior esquerdo.

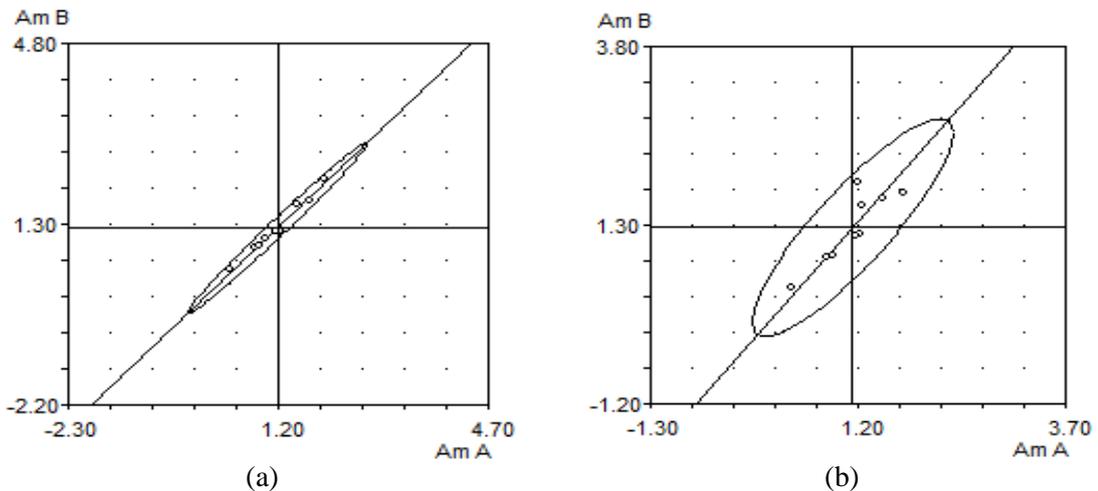


Figura 4.23. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2

O comentário gerado pelo programa Elipse de Confiança Aceitável para a Figura 4.24(a) considera que os Laboratórios 3 e 4 obtiveram desempenho satisfatório; o Laboratório 2 apresentou desempenho insatisfatório, com presença de erro aleatório; os Laboratórios 5, 6, 7 e 9 apresentaram desempenho insatisfatório, com presença de erro sistemático; e os Laboratórios 1 e 8 obtiveram desempenho insatisfatório, com presença de erros aleatório e sistemático. Com relação à Elipse de Confiança traçada após a repetição dos ensaios pelo Laboratório 2 (Figura 4.24(b)), tem-se que: os Laboratórios 3 e 4 apresentam desempenhos satisfatórios e os Laboratórios 2, 5, 6, 7 e 9, apresentam desempenhos insatisfatórios, com presença de erro sistemático. O Laboratórios 1 e 8 apresentam desempenhos insatisfatórios com presença de erro aleatório e sistemático.

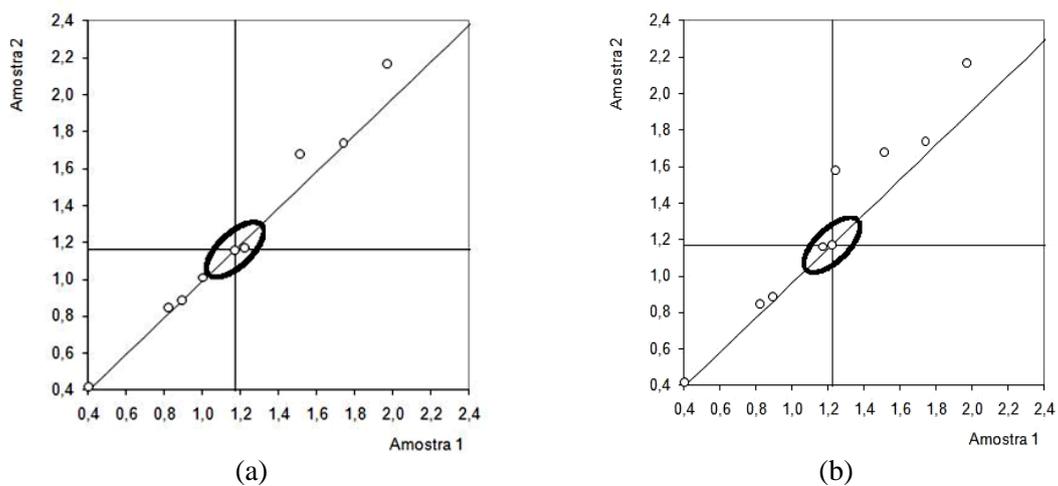


Figura 4.24. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelo Laboratório 2

4.1.2. Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles para a brita 3/4” foi concluído por apenas oito laboratórios participantes (Tabela 4.13). Os testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran* consideraram todos os resultados como não dispersos. Os valores de *Md(S)* e de *IQN* obtidos foram de 59,1 e 2,474, respectivamente. A análise dos valores de z-score robusto mostra que os Laboratórios 2, 5 e 7 apresentaram desempenhos insatisfatórios ou questionáveis, de acordo com a técnica do z-score robusto (Figura 4.25).

Tabela 4.13. Resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles da brita 3/4”

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	38,4	39,0	54,7	-1,8	Satisfatório
2	34,3	35,0	49,0	-4,1	Insatisfatório
3	42,6	41,7	59,6	0,2	Satisfatório
4	40,8	42,4	58,8	-0,1	Satisfatório
5	46,5	45,6	65,1	2,4	Questionável
6	41,0	41,4	58,3	-0,3	Satisfatório
7	45,9	44,7	64,0	2,0	Questionável
8	41,2	42,7	59,3	0,1	Satisfatório
9	–	–	–	–	–
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	59,1	57,4	60,7	3,338	2,474

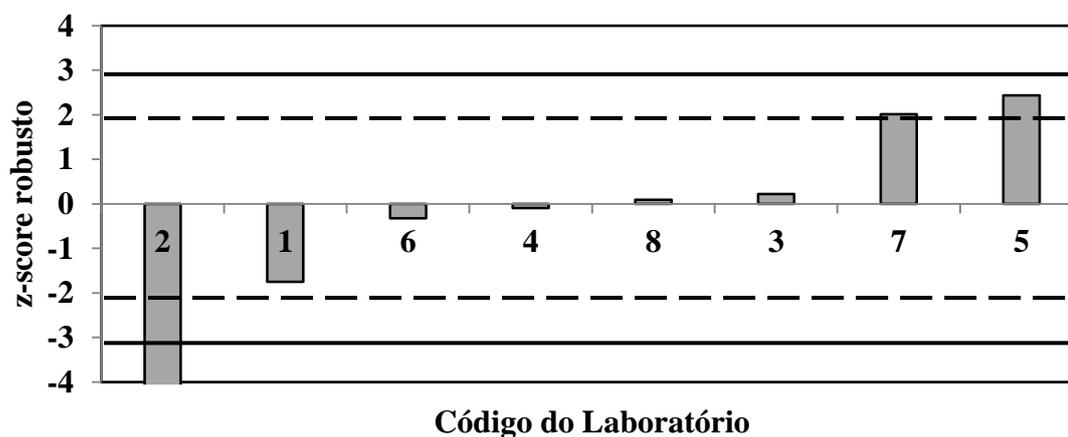


Figura 4.25. Gráfico do z-score para o ensaio de Abrasão Los Angeles

Os Laboratórios 1, 5 e 7 fizeram novos ensaios, mas o Laboratório 5 continuou com desempenho questionável. O Laboratório 2 não repetiu o procedimento, alegando que as esferas utilizadas para a realização do ensaio estavam bastante gastas, não

possuindo a massa mínima necessária para serem utilizadas como carga abrasiva. Os resultados da repetição dos ensaios se encontram na Tabela 4.14 e na Figura 4.26.

Tabela 4.14. Análise dos resultados de abrasão Los Angeles da brita ¾” após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	43,8	42,8	61,2	1,2	Satisfatório
2	34,3	35,0	49,0	-5,9	Insatisfatório
3	42,6	41,7	59,6	0,3	Satisfatório
4	40,8	42,4	58,8	-0,1	Satisfatório
5	45,7	45,6	64,5	3,2	Questionável
6	41,0	41,4	58,3	-0,5	Satisfatório
7	39,1	40,1	55,9	-1,8	Satisfatório
8	41,2	42,7	59,3	0,1	Satisfatório
9	0,0	0,0			Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ = (Q3-Q1)</i>	<i>IQN = (IQ × 0,7413)</i>
	59,1	57,7	60,0	2,323	1,722

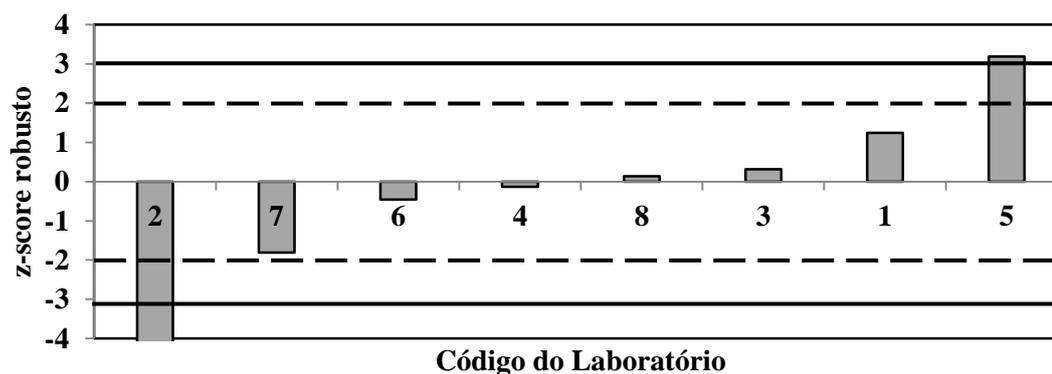


Figura 4.26. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de Abrasão Los Angeles após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7

Observa-se na elipse de confiança (Figuras 4.27(a) e (b)) a ocorrência de erros sistemáticos, caracterizados pelos pontos dispersos ao longo do eixo maior, bem como erros aleatórios, que podem ser verificados pela presença de pontos no quadrante superior esquerdo e inferior direito. Os erros sistemáticos cometidos por estes laboratórios podem ter sido ocasionados devido ao tempo de uso das esferas utilizadas no ensaio de abrasão. Esferas novas causam maior desgaste ao material se comparadas a esferas mais antigas. Observa-se, na Figura 4.27(b), que os resultados continuam dispersos ao longo da reta diagonal, mesmo depois da intervenção.

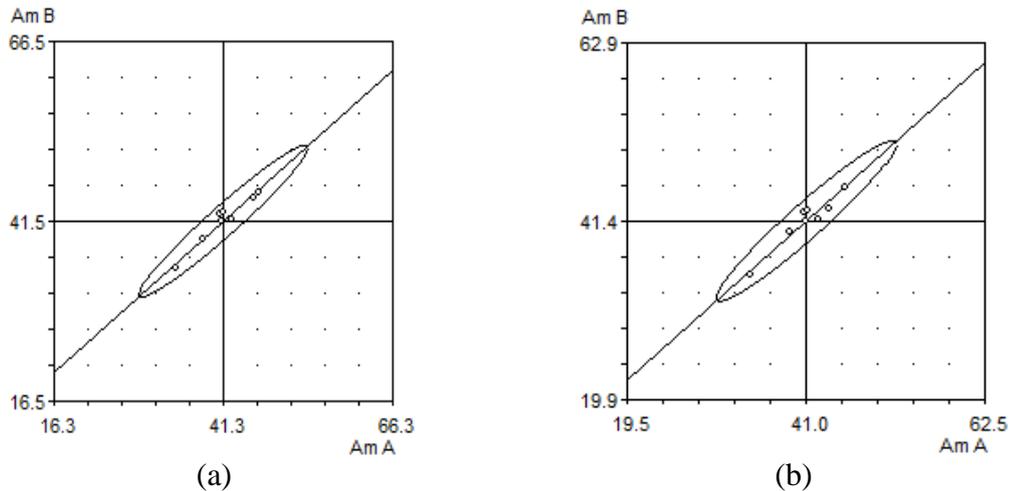


Figura 4.27. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7

As Figuras 4.28(a) e (b) apresentam as elipses traçadas por meio do programa Elipse de Confiança Aceitável. A partir de comentários gerados pelo programa, para a Figura 4.28(a), os Laboratórios 1, 3, 4, 6 e 8 apresentam desempenhos satisfatórios e os Laboratórios 2, 5 e 7 apresentam desempenhos insatisfatórios, com presença de erros sistemáticos. Após intervenção, (Figura 4.28(b)), os Laboratórios 2 e 5 apresentam desempenhos insatisfatórios, com ocorrência de erro sistemático, e os demais Laboratórios apresentam desempenhos satisfatórios.

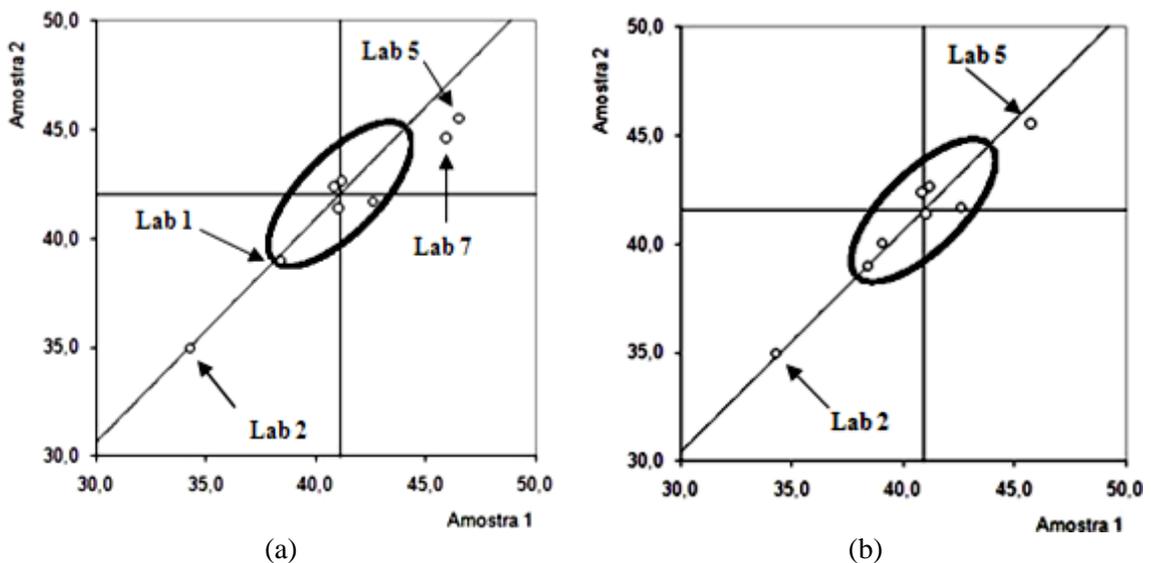


Figura 4.28. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 5 e 7

4.1.3. Índice de Forma

A Tabela 4.15 mostra os resultados obtidos para a determinação do índice de forma da brita $\frac{3}{4}$ por nove laboratórios. O teste estatístico de *Dixon* indicou que as

duas amostras do Laboratório 8 são consideradas dispersas com relação às demais amostras do grupo. O teste estatístico de *Cochran* foi efetuado com um grau de confiança de 95% e mostrou que não há evidência de valores dispersos. Os valores de $Md(S)$ e de IQN obtidos foram de 3,38 e 1,070, respectivamente. A análise dos valores de z-score robusto mostra que os Laboratórios 1, 6 e 8 apresentaram desempenhos insatisfatórios ou questionáveis (Figura 4.29).

Tabela 4.15. Resultados do ensaio de índice de forma da brita $\frac{3}{4}$ ''

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	0,50	0,60	0,78	-2,4	Questionável
2	2,44	2,34	3,38	0,0	Satisfatório
3	2,60	3,00	3,96	0,5	Satisfatório
4	2,81	2,34	3,64	0,2	Satisfatório
5	2,55	2,62	3,66	0,3	Satisfatório
6	0,46	0,56	0,72	-2,5	Questionável
7	1,56	1,56	2,21	-1,1	Satisfatório
8	5,90	5,70	8,20	4,5	Insatisfatório
9	2,11	2,04	2,93	-0,4	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	$Md(S)$	$Q1(S)$	$Q3(S)$	$IQ = (Q3 - Q1)$	$IQN = (IQ \times 0,7413)$
	3,38	2,21	3,66	1,450	1,070

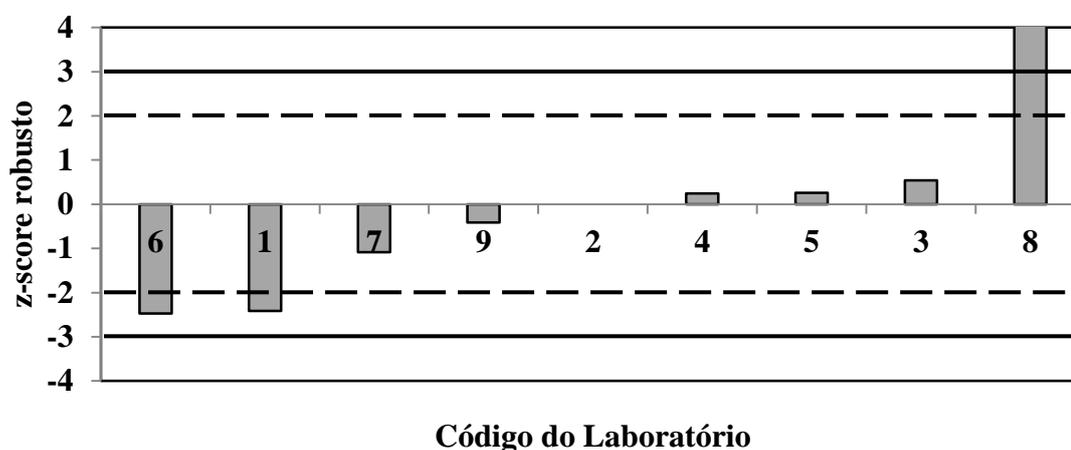


Figura 4.29. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de índice de forma da brita $\frac{3}{4}$ ''

Os Laboratórios 1, 3, 4 e 6 repetiram os ensaios de índice de forma, e os resultados são apresentados na Tabela 4.16 e na Figura 4.30. Ressalta-se que os Laboratório 3 e 4 repetiram os ensaios porque estes foram tidos como insatisfatórios quando avaliados por meio da elipse de confiança, que será mostrada adiante. Os Laboratórios 6 e 7 obtiveram desempenhos questionáveis e o Laboratório 5 obteve

desempenho insatisfatório. O teste estatístico de *Dixon* foi realizado mais uma vez e o par de amostras do Laboratório 8 continuou sendo o único considerado disperso com relação aos demais do grupo, por não ter repetido o ensaio.

Tabela 4.16. Índice de forma após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 3, 4 e 6

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,5	2,6	3,6	0,4	Satisfatório
2	2,4	2,3	3,4	0,0	Satisfatório
3	2,8	2,7	3,9	0,7	Satisfatório
4	2,3	2,4	3,3	-0,1	Satisfatório
5	2,6	2,6	3,7	0,5	Satisfatório
6	1,4	1,5	2,1	-2,4	Questionável
7	1,6	1,6	2,2	-2,2	Questionável
8	5,9	5,7	8,2	9,0	Insatisfatório
9	2,1	2,0	2,9	-0,8	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	3,4	2,9	3,7	0,721	0,535

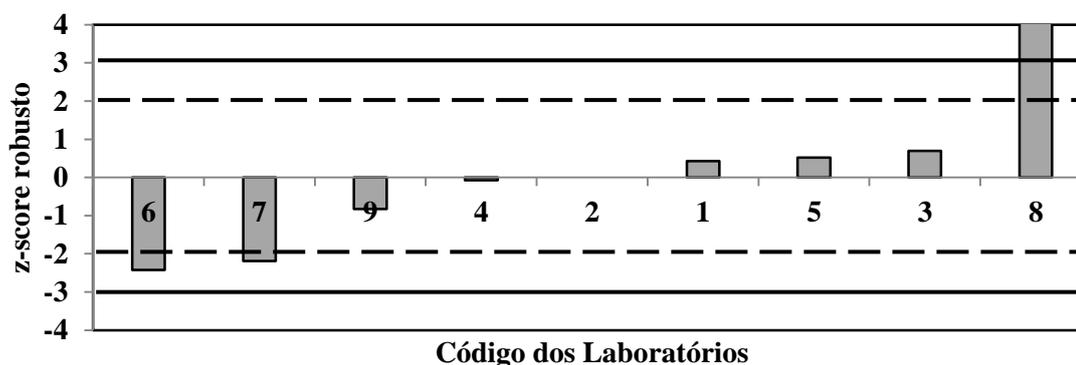


Figura 4.30. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de índice de forma após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 3, 4 e 6

As elipses de confiança para o ensaio de índice de forma são apresentadas nas Figuras 4.31(a) e (b), utilizando o programa INTERLAB2001, e nas Figuras 4.32(a) e (b), utilizando o programa Elipse de Confiança Aceitável.

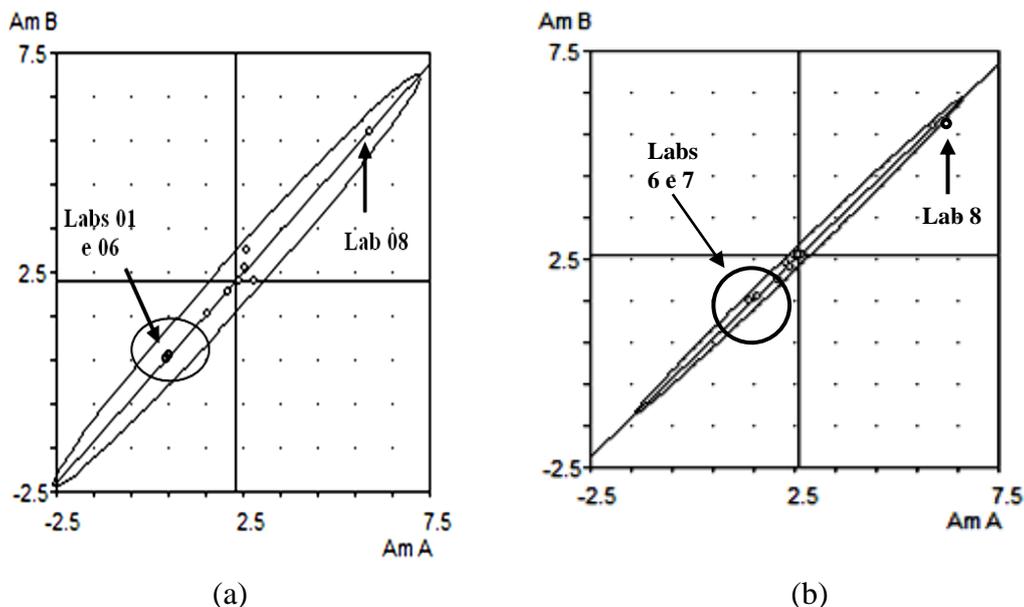


Figura 4.31. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1, 3, 4 e 6

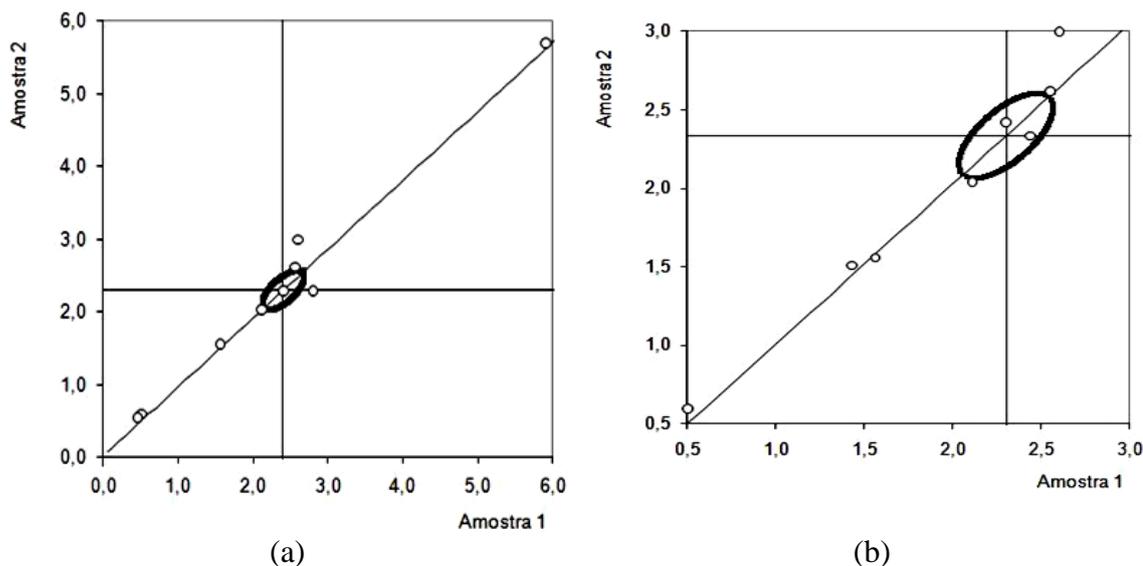


Figura 4.32. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos resultados pelos Laboratórios 4 e 6

Para o traçado da elipse da Figura 4.32(b), somente foi possível incluir os novos resultados dos Laboratórios 4 e 6, pois a data em que as elipses foram traçadas antecede a data que os demais laboratórios apresentaram seus novos resultados. Lembrando que o programa Elipse de Confiança Aceitável não foi manipulado pela UFC (Laboratório coordenador do programa), mas pelo autor do programa (OLIVIERI, 2004). A partir da análise feita pelo Programa Elipse de Confiança Aceitável (Figura 4.32(a)), o Laboratório 2 foi o único que apresentou desempenho satisfatório; os Laboratórios 3 e 4 foram considerados com desempenhos insatisfatórios, com presença de erro aleatório e

os Laboratórios 1, 5, 6, 7, 8 e 9 apresentaram desempenhos insatisfatórios, com ocorrência de erro sistemático. Após a repetição do ensaio pelos Laboratórios 4 e 6 (Figura 4.32(b)), considera-se que os Laboratórios 2 e 4 apresentaram desempenhos satisfatórios; os Laboratórios 1, 5, 6, 7 e 9 apresentaram desempenhos insatisfatórios, com erro sistemático e os Laboratórios 3 e 8 apresentaram desempenhos insatisfatórios, com ocorrência de erros aleatórios e sistemáticos.

Acredita-se que a maior fonte de erros para o ensaio de índice de forma é relativa à interpretação da norma (NBR 7809/2006). Este foi o ensaio que os laboratórios tiveram maior dificuldade para interpretar a norma, sendo que muitos deles procuraram o laboratório coordenador para tirar suas dúvidas com relação aos cálculos para a determinação do número de amostras a ser ensaiado e/ou da determinação do valor do índice de forma.

4.1.4. Determinação da Densidade Real – Agregado Miúdo: DNER-ME 084/95

A Tabela 4.17 mostra os resultados obtidos para a determinação da densidade real do pó-de-pedra por nove laboratórios. A partir do teste estatístico de *Dixon*, verificou-se que os pares de amostras dos Laboratórios 7 e 8 são considerados dispersos com relação aos dados do conjunto. O teste estatístico de *Cochran* foi efetuado, com um grau de confiança de 95%, e mostrou que não há evidência de valores dispersos.

Os valores de $Md(S)$ e de IQN obtidos foram de 3,72 e 0,046, respectivamente. A Tabela 4.17 e a Figura 4.33 mostram que os Laboratórios 7 e 8 obtiveram desempenhos insatisfatórios ($|z| > 3$) e que os demais laboratórios obtiveram resultados satisfatórios e semelhantes entre si ($|z| < 1$).

Tabela 4.17. Densidade real do pó-de-pedra

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,61	2,60	3,68	-0,7	Satisfatório
2	2,61	2,64	3,72	0,0	Satisfatório
3	2,64	2,65	3,74	0,6	Satisfatório
4	2,66	2,65	3,75	0,8	Satisfatório
5	2,62	2,62	3,70	-0,2	Satisfatório
6	2,60	2,60	3,68	-0,7	Satisfatório
7	2,44	2,43	3,44	-6,0	Insatisfatório
8	2,79	2,77	3,93	4,6	Insatisfatório
9	2,65	2,65	3,75	0,7	Satisfatório
Parâmetros Estatísticos	$Md(S)$	$Q1(S)$	$Q3(S)$	$IQ=(Q3-Q1)$	$IQN=(IQ \times 0,7413)$
	3,72	3,68	3,75	0,062	0,046

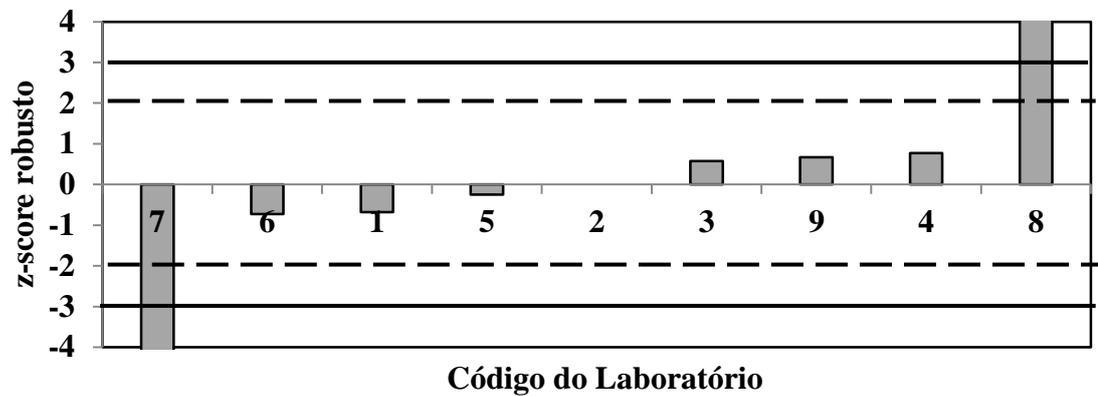


Figura 4.33. Gráfico do z-score para o ensaio de densidade real do pó-de-pedra

A Tabela 4.18 e a Figura 4.34, apresentam os resultados obtidos quando os Laboratórios 7 e 8 realizaram novos ensaios de densidade real para o pó-de-pedra. Observa-se que todos os laboratórios passaram a apresentar desempenhos satisfatórios, quando se considera apenas a análise do z-score robusto. O teste estatístico de *Dixon* utilizando os novos resultados mostrou que não há resultados considerados *outliers*, mas o teste estatístico de *Cochran* considerou o par de amostras do Laboratório 2 como disperso.

Tabela 4.18. Densidade real do pó-de-pedra após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	2,61	2,60	3,68	-0,7	Satisfatório
2	2,61	2,64	3,72	0,0	Satisfatório
3	2,64	2,65	3,74	0,6	Satisfatório
4	2,66	2,65	3,75	0,8	Satisfatório
5	2,62	2,62	3,70	-0,2	Satisfatório
6	2,60	2,60	3,68	-0,7	Satisfatório
7	2,60	2,60	3,68	-0,8	Satisfatório
8	2,66	2,65	3,75	0,8	Satisfatório
9	2,65	2,65	3,75	0,7	Satisfatório
Parâmetros estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ (Q3-Q1)</i>	<i>IQN (IQ×0,7413)</i>
	3,72	3,68	3,75	0,062	0,046

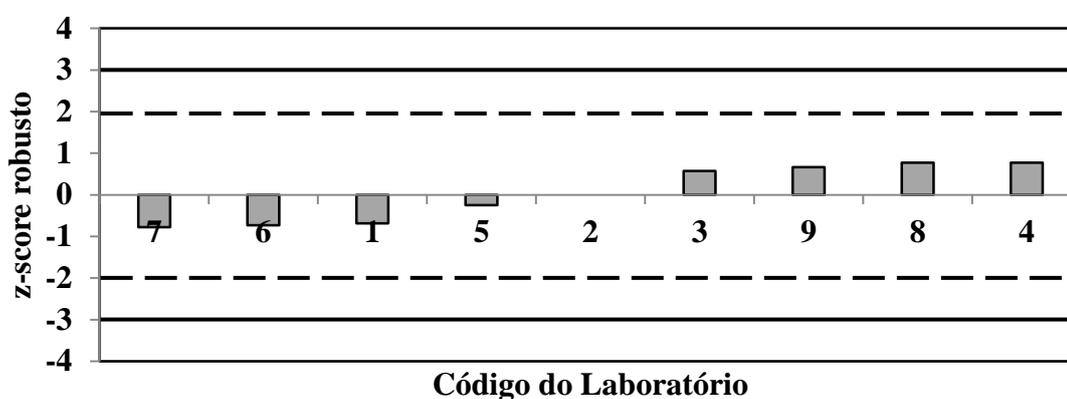


Figura 4.34. Gráfico do z-score robusto para o ensaio de densidade real do pó-de-pedra após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8

Os resultados antes da repetição dos ensaios pelos laboratórios com resultados considerados como dispersos também podem ser observados a partir da elipse da Figura 4.35(a). Observa-se que sete pontos encontram-se próximos ao ponto de encontro das retas que dividem os quatro quadrantes, enquanto dois pontos encontram-se isolados nos quadrantes superior direito e inferior esquerdo, representando a dispersão dos resultados dos Laboratórios 7 e 8. A Figura 4.35(b) apresenta a elipse após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8.

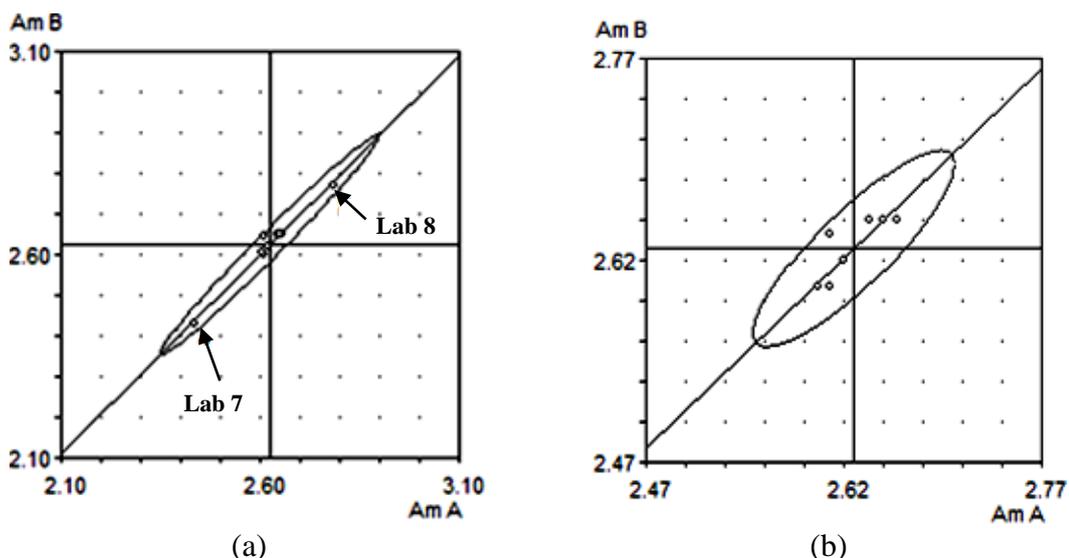


Figura 4.35. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8

As Figuras 4.36(a) e (b) apresentam as elipses traçadas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável, que considerou todos laboratórios com resultados satisfatórios.

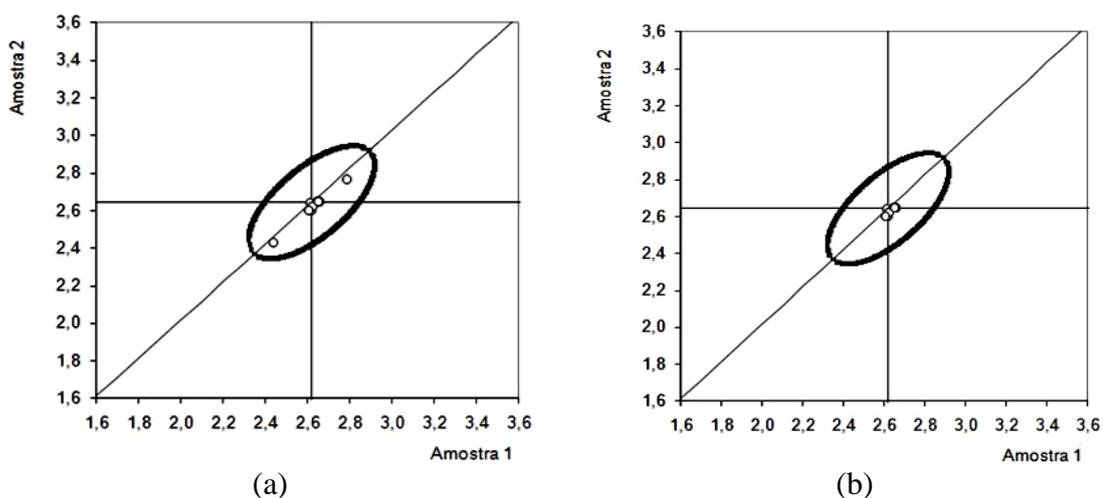


Figura 4.36. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 7 e 8

4.1.5. Equivalente de Areia (EA)

Para os ensaios de EA realizados neste programa interlaboratorial, foi orientado aos laboratórios que fossem ensaiadas amostras secas em estufa. Com isso, todas as amostras estariam com o teor de umidade semelhante, bem como com a mesma granulometria. Então, após obter as amostras para o ensaio, os laboratórios secaram as mesmas até constância de massa a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e esfriaram a temperatura ambiente antes de ensaiar, a fim de obter resultados mais consistentes para a realização das

comparações entre laboratórios. Essa decisão foi tomada com base na norma americana ASTM D2419-02, que indica que o ensaio de EA utilizando amostras úmidas conduz a valores menores de EA com relação ao obtido para amostras secas em estufa. A norma afirma ainda que, a não secagem da amostra em estufa é permitida, contudo, se os valores dos ensaios forem próximos ou abaixo do mínimo especificado, a amostra deve ser ensaiada novamente, porém seca em estufa.

O EA de areia foi efetuado por apenas oito laboratórios (Tabela 4.19), o Laboratório 9 não fez o ensaio por falta de equipamento. Os testes estatísticos de *Dixon* e de *Cochran* consideraram todos os resultados de EA como não dispersos. Os valores obtidos para *Md(S)* e para *IQN* foram, respectivamente, 119,9 e 6,66. De acordo com a técnica do z-score robusto, todos os laboratórios apresentaram desempenhos satisfatórios (Figura 4.37).

Tabela 4.19. Ensaio de equivalente de areia do pó-de-pedra

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	85	85	120	0,1	Satisfatório
2	78	78	110	-1,4	Satisfatório
3	77	76	108	-1,8	Satisfatório
4	87	89	124	0,7	Satisfatório
5	85	84	120	-0,1	Satisfatório
6	90	94	130	1,5	Satisfatório
7	88	89	125	0,8	Satisfatório
8	82	84	117	-0,4	Satisfatório
9	–	–	–	–	–
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	119,9	115,6	124,6	9,0	6,66

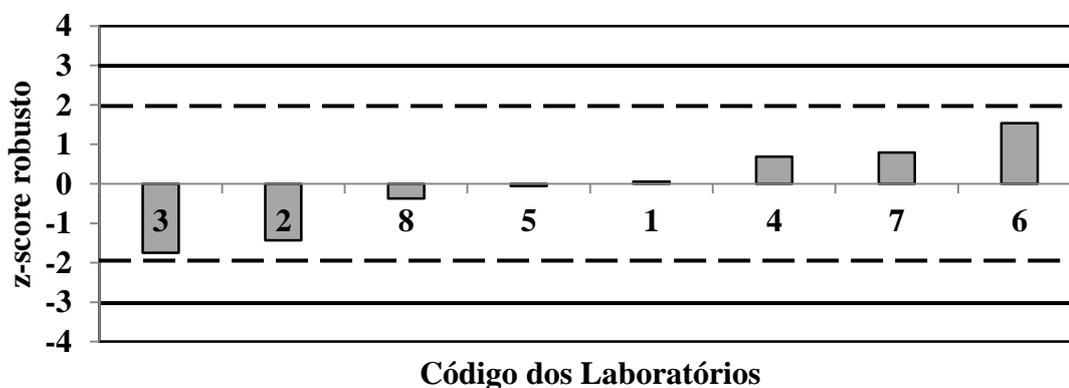


Figura 4.37. Gráfico do z-score para o ensaio de Equivalente de Areia do pó-de-pedra

A Tabela 4.20 e a Figura 4.38 apresentam os resultados obtidos após a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6. Ressalta-se que estes laboratórios repetiram os ensaios devido ao diagnóstico dado pelo programa Elipse de Confiança Aceitável. Este programa considerou os Laboratórios 2, 3 e 6 como tendo desempenhos insatisfatórios. Porém, o Laboratório 3 não apresentou os resultados da repetição dos ensaios. Observa-se, na Tabela 4.20, que todos os laboratórios permaneceram com desempenhos satisfatórios quando avaliados a partir da técnica do z-score robusto.

Tabela 4.20. Ensaio de Equivalente de Areia do pó-de-pedra após repetições dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6

Código do Laboratório	Amostra A	Amostra B	Soma Padronizada (S)	Z-score Robusto	Desempenho
1	85	85	120	0,3	Satisfatório
2	79	81	113	-0,8	Satisfatório
3	77	76	108	-1,5	Satisfatório
4	87	89	124	0,9	Satisfatório
5	85	84	120	0,2	Satisfatório
6	75	77	107	-1,6	Satisfatório
7	88	89	125	1,0	Satisfatório
8	82	84	117	-0,2	Satisfatório
9	–	–	–	–	–
Parâmetros Estatísticos	<i>Md(S)</i>	<i>Q1(S)</i>	<i>Q3(S)</i>	<i>IQ=(Q3-Q1)</i>	<i>IQN=(IQ×0,7413)</i>
	118,4	111,9	121,3	9,36	6,94

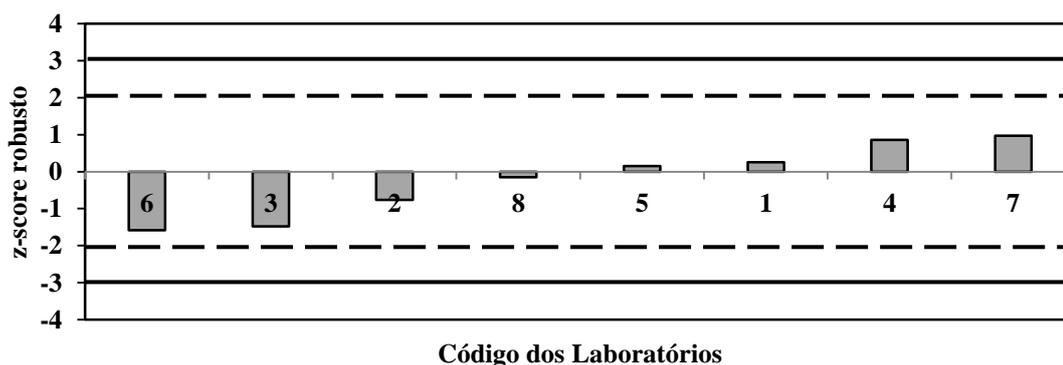


Figura 4.38. Gráfico do z-score para o ensaio de Equivalente de Areia do pó-de-pedra após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6

As elipses de confiança para o ensaio EA encontram-se nas Figuras 4.39(a) e (b), quando traçadas pelo programa INTERLAB2001, e nas Figuras 4.40(a) e (b), quando geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável.

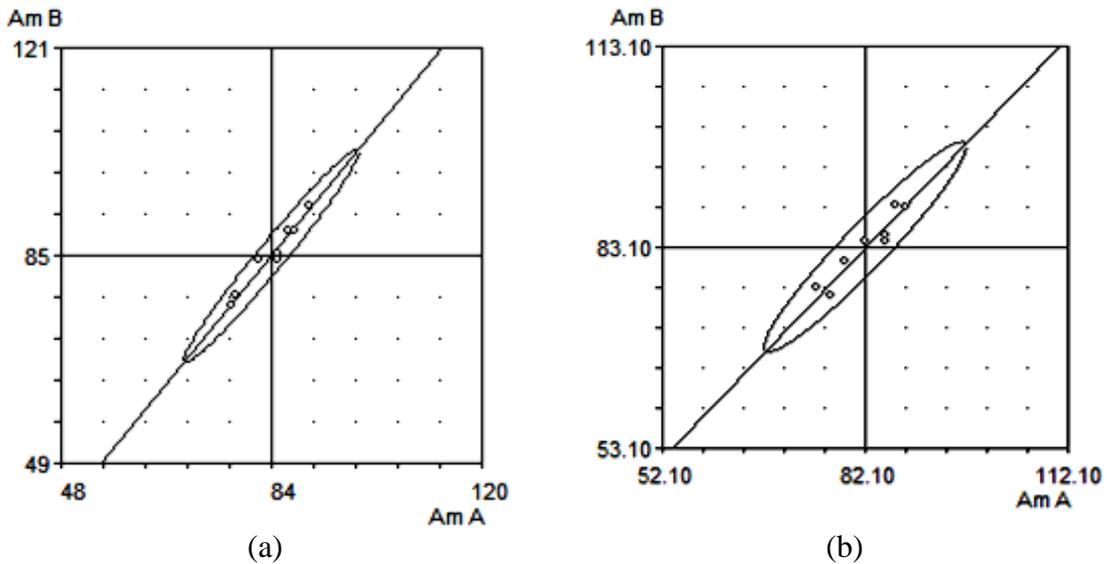


Figura 4.39. Elipses de confiança geradas pelo programa INTERLAB2001: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6

O programa Elipse de Confiança Aceitável considerou os Laboratórios 2, 3 e 6 como tendo desempenhos insatisfatórios, com presença de erro sistemático. Após repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6, o programa passou a considerar os desempenhos dos Laboratórios 3 e 6 insatisfatórios, com presença de erro sistemático. Ressalta-se que o Laboratório 3 não efetuou a repetição dos ensaios.

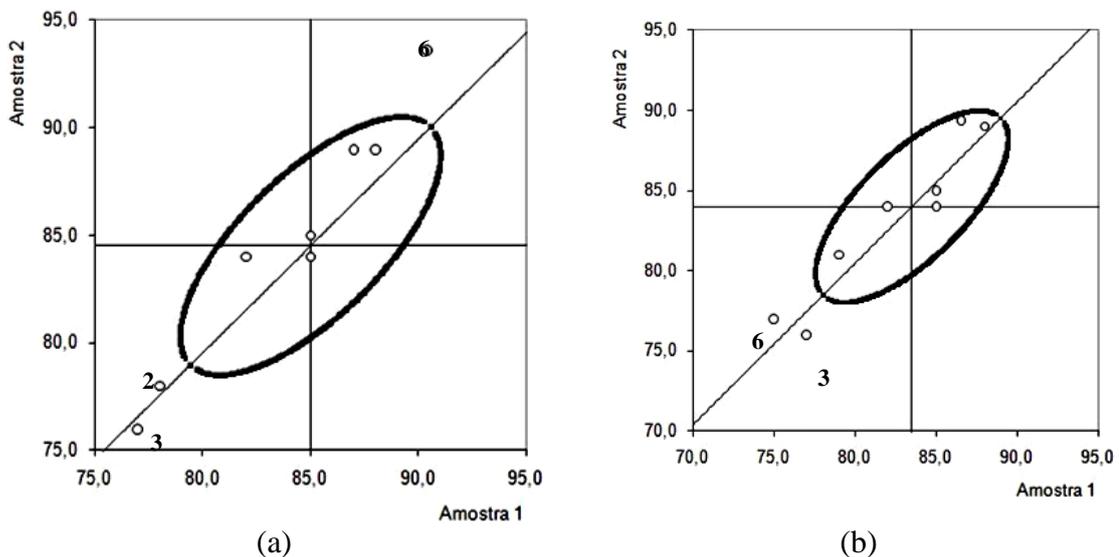


Figura 4.40. Elipses de confiança geradas pelo programa Elipse de Confiança Aceitável: (a) antes da repetição e (b) depois da repetição dos ensaios pelos Laboratórios 2 e 6

A dispersão nos resultados deste ensaio pode ter sido causada pela não observância das instruções especiais contidas no formulário, no que diz respeito à secagem da amostra a ser ensaiada em estufa antes de colocá-la dentro do cilindro do ensaio, a fim de obter resultados mais consistentes para comparações entre laboratórios.

O Laboratório 3, por exemplo, declarou não ter secado as amostras em estufa antes do ensaio, conforme recomendado nas instruções. Este laboratório obteve resultados menores quando comparado aos demais e apresentou desempenho insatisfatório com relação à Elipse de Confiança confiável.

Ao contrário do que foi solicitado no formulário, o procedimento adotado (DNER-ME 054/97) recomenda que a amostra a ser ensaiada seja umedecida antes do experimento, porém não consta neste procedimento uma especificação sobre este processo de umedecimento. Isso pode ter levado os laboratórios a umedecerem as amostras da maneira que lhes é conveniente, levando à dispersão de resultados. Então, decidiu-se iniciar o ensaio com todas as amostras com umidade nula, recomendando o processo de secagem das amostras em estufa.

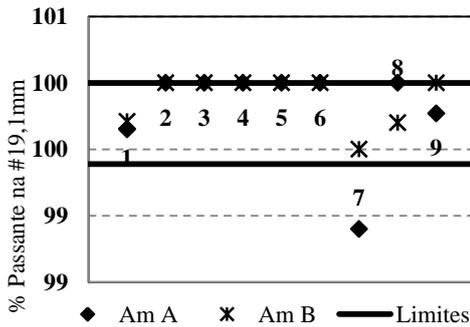
4.1.6. Análise Granulométrica

Para a avaliação dos resultados dos ensaios de granulometria não foram calculados valores de z-score robusto. Utilizaram-se limites inferiores e superiores que foram determinados para cada tamanho de peneira, por meio da multiplicação do *IQN* normalizado por 3. Então, todos os resultados reportados fora desses limites são considerados *outliers*. As Figuras 4.41 a 4.44 e as Tabelas 4.21 e 4.22 são referentes aos resultados dos ensaios de granulometria da brita ¾”. As Figuras 4.45 a 4.47 e as Tabelas 4.23 e 4.24 apresentam os resultados de análise granulométrica da brita 3/8”. As Figuras 4.48 a 4.50 e as Tabelas 4.25 e 4.26 apresentam a análise granulométrica do pó-de-pedra.

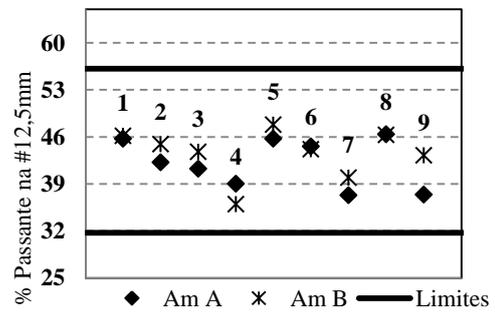
Granulometria da Brita ¾’’

Tabela 4.21. Primeira parte da granulometria da brita ¾’’ (peneiras de 19,1mm a 4,76mm)

Código Laboratório	Peneiras (mm)							
	19,1		12,5		9,5		4,76	
	Porcentagem Passante (%)							
	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B
1	99,7	99,7	45,7	46,1	14,5	14,5	1,7	1,5
2	100,0	100,0	42,2	44,9	13,2	15,3	2,0	4,3
3	100,0	100,0	41,2	43,8	11,7	13,1	2,4	2,2
4	100,0	100,0	39,0	36,0	10,7	8,6	3,4	1,7
5	100,0	100,0	45,7	47,8	20,0	22,0	3,4	4,9
6	100,0	100,0	44,6	44,1	12,5	11,8	1,7	1,5
7	98,9	99,5	37,3	39,9	9,5	10,4	0,1	0,2
8	100,0	99,7	46,4	46,3	16,4	13,9	1,6	1,6
9	99,8	100,0	37,4	43,3	6,5	9,9	0,2	0,3
N° de resultados	18		18		18		18	
Mediana	100,0		43,9		12,8		1,7	
IQN	0,2		4,1		3,0		0,7	
IQN×3	0,61		12,21		8,95		1,96	
Limite Superior	100,0		56,2		21,8		3,6	
Limite Inferior	99,4		31,7		3,9		0,0	

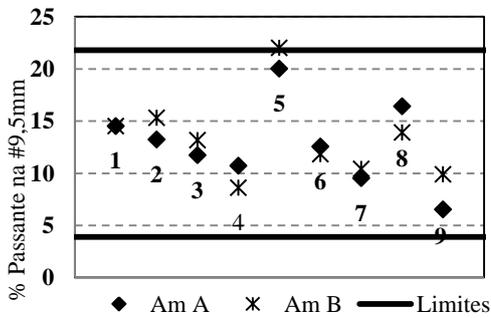


(a)

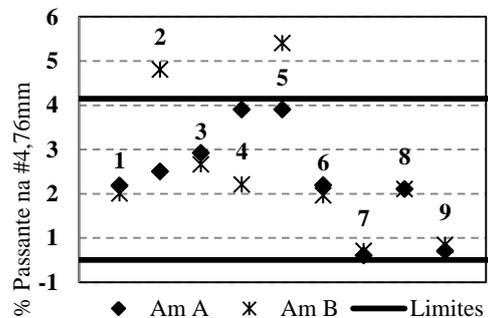


(b)

Figura 4.41. Granulometria brita ¾’’: (a) peneira 19,1mm e (b) peneira 12,5mm



(a)

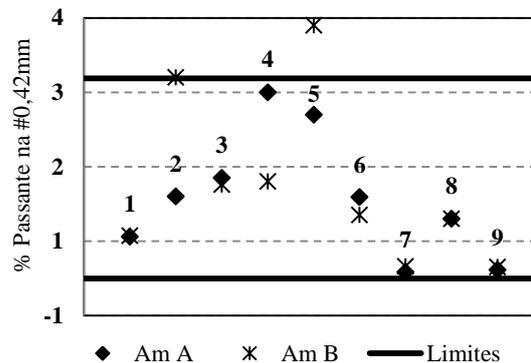
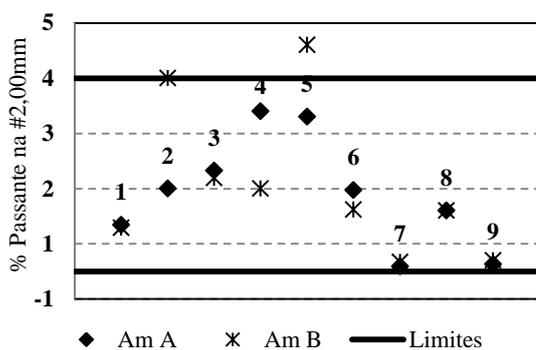


(b)

Figura 4.42. Granulometria brita ¾’’: (a) peneira 9,5mm e (b) peneira 4,76mm

Tabela 4.22. Segunda parte da granulometria da brita $\frac{3}{4}''$ (peneiras de 2,00mm a 0,075mm)

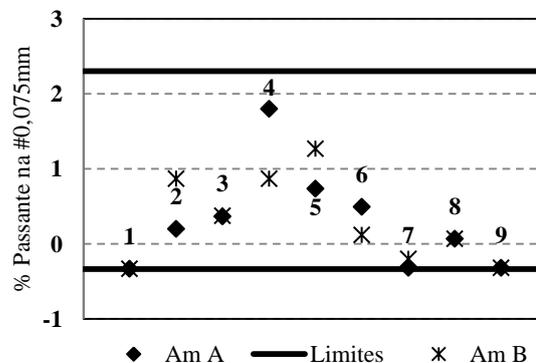
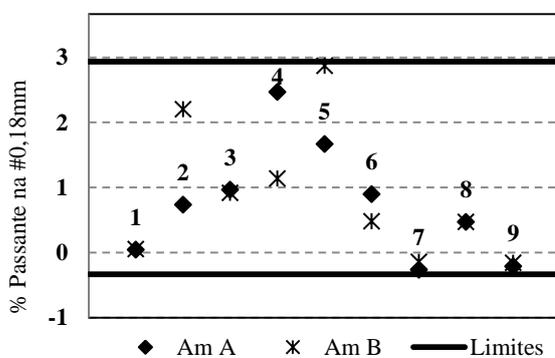
Código Laboratório	Peneiras (mm)							
	2,00		0,42		0,18		0,075	
	Porcentagem Passante (%)							
	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B
1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,3	0,3	0,0	0,0
2	1,5	3,5	1,1	2,7	0,8	1,9	0,4	0,9
3	1,8	1,7	1,3	1,3	1,0	0,9	0,5	0,5
4	2,9	1,5	2,5	1,3	2,1	1,1	1,6	0,9
5	2,8	4,1	2,2	3,4	1,5	2,4	0,8	1,2
6	1,5	1,1	1,1	0,9	0,9	0,6	0,6	0,3
7	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1
8	1,1	1,1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,3	0,3
9	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Nº de resultados	18		18		18		18	
Mediana	1,3		1,0		0,7		0,4	
<i>IQN</i>	0,7		0,6		0,6		0,5	
<i>IQN</i>×3	2,20		1,72		1,75		1,61	
Limite Superior	3,5		2,7		2,5		2,0	
Limite Inferior	0,0		0,0		0,0		0,0	



(a)

(b)

Figura 4.43. Granulometria brita $\frac{3}{4}''$: (a) peneira 2,00mm e (b) peneira 0,42mm



(a)

(b)

Figura 4.44. Granulometria brita $\frac{3}{4}''$: (a) peneira 0,18mm e (b) peneira 0,075mm

Granulometria da Brita 3/8''

Tabela 4.23. Primeira parte da granulometria da brita 3/8'' (peneiras de 9,5mm a 0,42mm)

Código Laboratório	Peneiras (mm)							
	9,5		4,76		2,00		0,42	
	Porcentagem Passante (%)							
	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B
1	99,6	99,7	24,1	24,7	5,7	6,4	2,4	2,7
2	99,6	99,8	37,6	35,9	11,0	10,9	5,2	5,3
3	100,0	100,0	37,1	37,4	10,7	10,5	4,9	4,7
4	100,0	100,0	27,9	28,8	5,8	7,6	3,3	4,7
5	99,9	100,0	34,8	34,9	11,3	9,7	5,8	4,7
6	99,6	99,5	39,0	40,4	11,1	11,0	5,4	5,2
7	100,0	100,0	61,7	39,3	9,1	8,2	5,0	3,7
8	99,9	99,8	36,6	37,5	6,9	8,0	3,2	3,8
9	99,5	99,8	32,2	29,7	5,2	3,1	1,9	1,3
N° de resultados	18		18		18		18	
Mediana	99,9		36,3		8,7		4,7	
IQN	0,3		5,4		3,2		1,4	
IQN×3	0,80		16,15		9,64		4,24	
Limite Superior	100,7		52,4		18,3		8,9	
Limite Inferior	99,0		20,1		0,0		0,0	

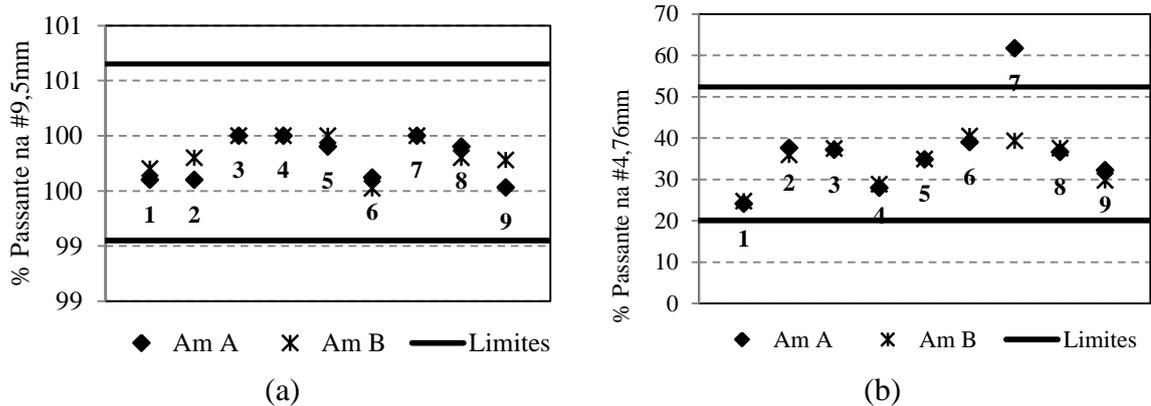


Figura 4.45. Granulometria brita 3/8'': (a) peneira 9,5mm e (b) peneira 4,76mm

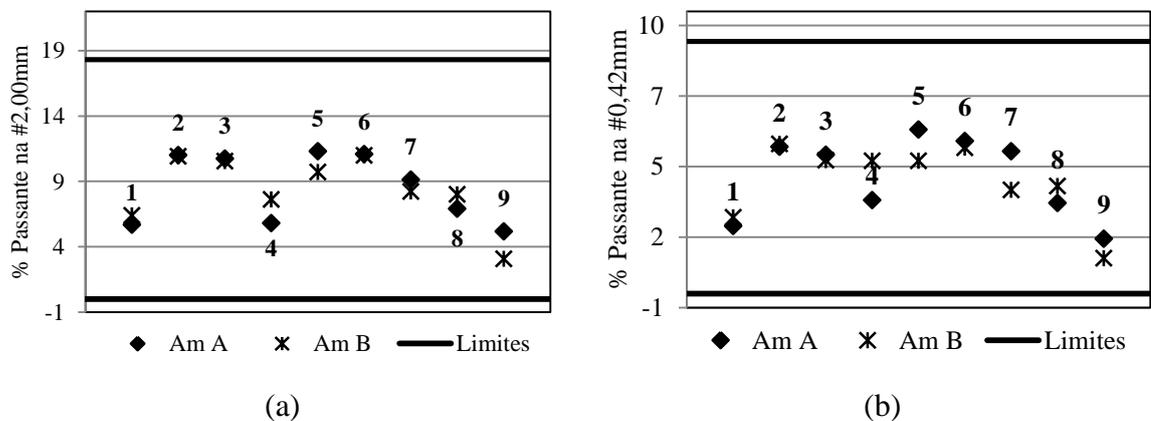
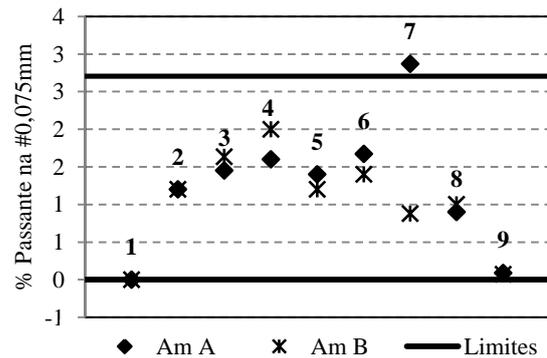
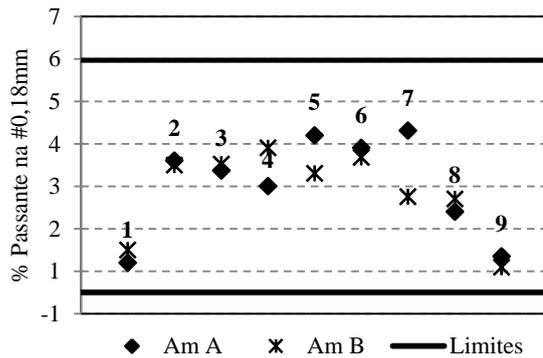


Figura 4.46. Granulometria brita 3/8'': (a) peneira 2,0mm e (b) peneira 0,042mm

Tabela 4.24. Segunda parte da granulometria da brita 3/8'' (peneiras de 0,18 e 0,75mm)

Código Laboratório	Peneiras (mm)			
	0,18		0,075	
	Porcentagem Passante (%)			
	Am A	Am B	Am A	Am B
1	0,7	1,0	0,0	0,0
2	3,1	3,0	1,2	1,2
3	2,9	3,0	1,5	1,6
4	2,5	3,4	1,6	2,0
5	3,7	2,8	1,4	1,2
6	3,4	3,2	1,7	1,4
7	3,8	2,3	2,9	0,9
8	1,9	2,2	0,9	1,0
9	0,9	0,6	0,1	0,1
N° de resultados	18		18	
Mediana	2,8		1,2	
<i>IQN</i>	0,9		0,5	
<i>IQN</i>×3	2,64		1,51	
Limite Superior	5,5		2,7	
Limite Inferior	0,0		0,0	



(a)

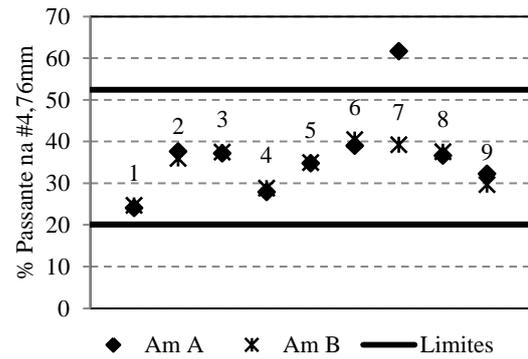
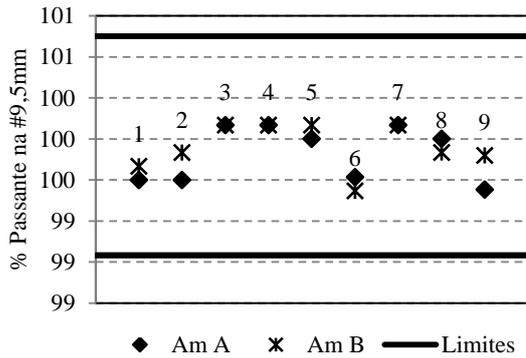
(b)

Figura 4.47. Granulometria brita 3/8'': (a) peneira 0,18mm e (b) peneira 0,075mm

Granulometria do Pó-de-Pedra

Tabela 4.25. Primeira parte da granulometria do Pó-de-Pedra (peneiras de 9,5mm a 0,42mm)

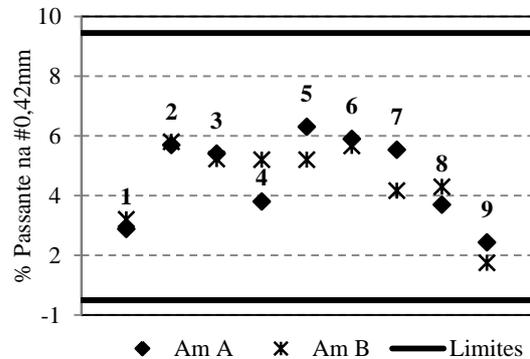
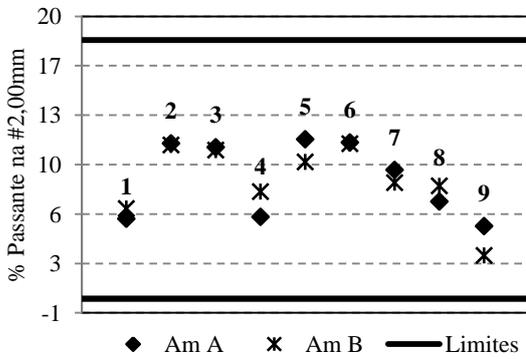
Código Laboratório	Peneiras (mm)							
	9,5		4,76		2,00		0,42	
	Porcentagem Passante (%)							
	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B	Am A	Am B
1	99,6	99,7	24,1	24,7	5,7	6,4	2,4	2,7
2	99,6	99,8	37,6	35,9	11,0	10,9	5,2	5,3
3	100,0	100,0	37,1	37,4	10,7	10,5	4,9	4,7
4	100,0	100,0	27,9	28,8	5,8	7,6	3,3	4,7
5	99,9	100,0	34,8	34,9	11,3	9,7	5,8	4,7
6	99,6	99,5	39,0	40,4	11,1	11,0	5,4	5,2
7	100,0	100,0	61,7	39,3	9,1	8,2	5,0	3,7
8	99,9	99,8	36,6	37,5	6,9	8,0	3,2	3,8
9	99,5	99,8	32,2	29,7	5,2	3,1	1,9	1,3
N° de resultados	18		18		18		18	
Mediana	99,9		36,3		8,7		4,7	
<i>IQN</i>	0,3		5,4		3,2		1,4	
<i>IQN</i>×3	0,80		16,15		9,64		4,24	
Limite Superior	100,7		52,4		18,3		8,9	
Limite Inferior	99,0		20,1		0,0		0,0	



(a)

(b)

Figura 4.48. Granulometria Pó-de-Pedra: (a) peneira 9,5mm e (b) peneira 4,76mm



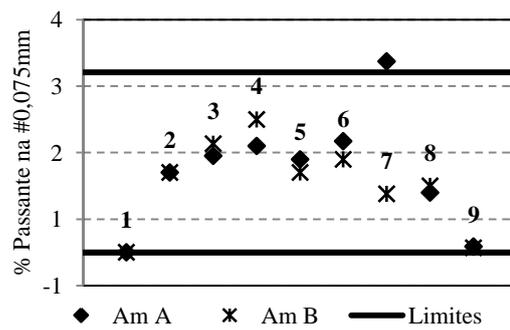
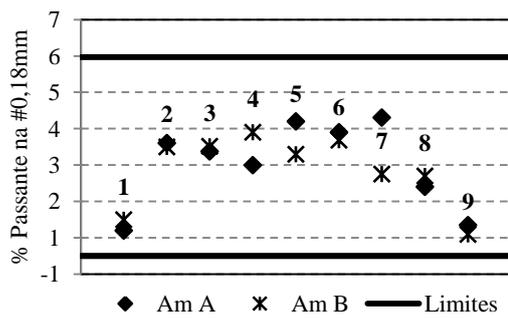
(a)

(b)

Figura 4.49. Granulometria Pó-de-Pedra: (a) peneira 2,00m e (b) peneira 0,42mm

Tabela 4.26. Segunda parte da granulometria do Pó-de-Pedra (peneiras de 0,18mm a 0,075mm)

Código Laboratório	Peneiras (mm)			
	0,18		0,075	
	Porcentagem Passante (%)			
	Am A	Am B	Am A	Am B
1	0,7	1,0	0,0	0,0
2	3,1	3,0	1,2	1,2
3	2,9	3,0	1,5	1,6
4	2,5	3,4	1,6	2,0
5	3,7	2,8	1,4	1,2
6	3,4	3,2	1,7	1,4
7	3,8	2,3	2,9	0,9
8	1,9	2,2	0,9	1,0
9	0,9	0,6	0,1	0,1
N° de resultados	18		18	
Mediana	2,8		1,2	
<i>IQN</i>	0,9		0,5	
<i>IQN</i>×3	2,64		1,51	
Limite Superior	5,5		2,7	
Limite Inferior	0,0		0,0	



(a)

(b)

Figura 4.50. Granulometria do Pó-de-Pedra: (a) peneira 0,18mm e (b) peneira 0,075mm

4.2. VERIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Esta seção pretende realizar uma análise descritiva de alguns dados, que nesse trabalho foram considerados como população, de caracterização de agregados e misturas asfálticas. Dessa forma, é apresentada uma verificação da distribuição Normal para os ensaios de: densidade aparente, densidade real e absorção do agregado graúdo, densidade real do agregado miúdo, densidade aparente e Vv de CPs. Cada ensaio a ser analisado foi realizado pelo menos 30 vezes por um mesmo operador, utilizando os mesmos equipamentos.

Utilizando o pacote estatístico SPSS, foram efetuados os teste de normalidade de *Kolmogorov-Smirnov* e de *Shapiro-Wilk* e criado um histograma de barras, a fim de separar as classes e a frequência de cada uma delas, de modo a facilitar o entendimento do comportamento da população. Os testes de normalidade foram realizados com grau de confiança de 95% (nível de significância (α) de 5%).

Para a verificação da normalidade, os testes em questão fornecem o parâmetro *valor de prova* (ou *valor-p* ou *p-value*), que pode ser interpretado como a medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição normal. Então, quanto menor for o *valor-p*, menor é a consistência entre os dados e a H_0 . Então, a regra de decisão adotada para saber se a distribuição é normal ou não é rejeitar H_0 se $\text{valor-p} \leq \alpha$.

- Se $\text{valor-p} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , ou seja, não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição normal;
- Se $\text{valor-p} > \alpha$, não se rejeita H_0 , ou seja, a distribuição normal é uma distribuição possível para o conjunto de dados em questão.

4.2.1. Densidade Aparente (Brita ¾’')

Para o ensaio de densidade aparente da brita ¾’'' foram realizados 30 ensaios utilizando-se os mesmos equipamentos e o mesmo operador. Os valores obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela 4.27 e os valores obtidos para as medidas de tendência central e dispersão encontram-se na Tabela 4.28.

Tabela 4.27. Valores de densidade aparente da brita ¾''

Amostra	D. Aparente	Amostra	D. Aparente	Amostra	D. Aparente
1	2,585	11	2,600	21	2,606
2	2,593	12	2,602	22	2,607
3	2,594	13	2,602	23	2,608
4	2,595	14	2,602	24	2,608
5	2,595	15	2,603	25	2,609
6	2,597	16	2,603	26	2,609
7	2,597	17	2,604	27	2,613
8	2,598	18	2,605	28	2,614
9	2,599	19	2,605	29	2,626
10	2,600	20	2,606	30	2,630

Tabela 4.28. Medidas de tendência central e de dispersão para o ensaio de densidade aparente da brita ¾''

Tendência Central / Dispersão	Valor
Média	2,604
Mediana	2,603
Desvio padrão	0,009
Variância	0,000
Valor Mínimo	2,585
Valor Máximo	2,630

Ao lançar os dados do programa SPSS, foram obtidas a Tabela 4.29 e o histograma da Figura 4.51. Observa-se, na Tabela 4.29, que os resultados para o *valor-p* (ou *Sig.*) de *Kolmogorov-Smirnov* e de *Shapiro-Wilk* são iguais a 0,078 e 0,042, respectivamente. Conclui-se que para o primeiro método não se rejeita H_0 ($0,078 > 0,05$) e para o método de *Shapiro-Wilk* deve-se rejeitar a hipótese de normalidade, pois o *valor-p* obtido é menor do que 0,05.

Tabela 4.29. Teste de normalidade para o ensaio de densidade aparente da brita ¾'' gerado pelo programa SPSS

Densidade Aparente	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.*	Statistic	df	Sig.*
	0,151	30	0,078	0,928	30	0,042
Conclusão	Não se rejeita H_0			Rejeita-se H_0		

*Sig. = *Valor-p*

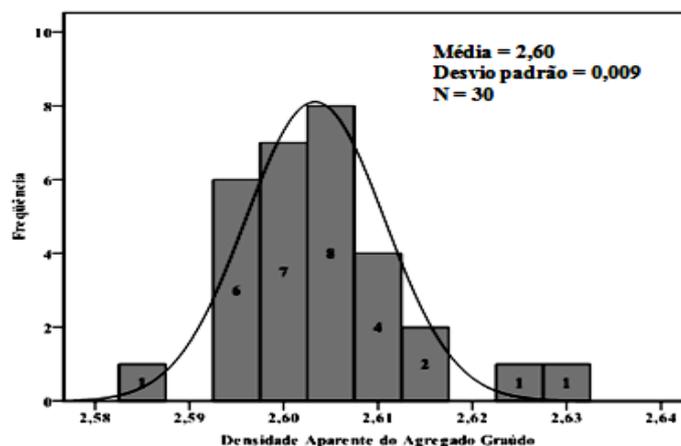


Figura 4.51. Histograma para o ensaio de densidade aparente do agregado graúdo gerado pelo SPSS

4.2.2. Densidade Real (Brita 3/4'')

O ensaio de densidade real da brita 3/4'' também foi realizado 30 vezes utilizando-se os mesmos equipamentos e o mesmo operador. A Tabela 4.30 apresenta os valores obtidos nos ensaios e a Tabela 4.31 apresenta os valores de algumas medidas de tendência central e de dispersão.

Tabela 4.30. Valores de densidade real da brita 3/4''

Amostra	D. Real	Amostra	D. Real	Amostra	D. Real
1	2,643	11	2,651	21	2,653
2	2,646	12	2,651	22	2,653
3	2,646	13	2,652	23	2,653
4	2,647	14	2,652	24	2,653
5	2,649	15	2,652	25	2,653
6	2,649	16	2,652	26	2,655
7	2,649	17	2,652	27	2,662
8	2,651	18	2,652	28	2,663
9	2,651	19	2,652	29	2,666
10	2,651	20	2,653	30	2,676

Tabela 4.31. Medidas de tendência central e de dispersão para o ensaio de densidade real da brita 3/4''

Tendência Central / Dispersão	Valor
Média	2,653
Mediana	2,652
Desvio padrão	0,006
Variância	0,000
Valor Mínimo	2,643
Valor Máximo	2,676

Ao lançar os dados do programa SPSS, foram obtidas a Tabela 4.32 e o histograma da Figura 4.52. Observa-se, na Tabela 4.32, que o *valor-p* (“Sig.”) tanto de *Kolmogorov-Smirnov* como de *Shapiro-Wilk* é 0,000. Conclui-se que para os dois métodos deve-se rejeitar a hipótese de normalidade (H_0) para o conjunto de dados em questão.

Tabela 4.32. Teste de normalidade para o ensaio de densidade real da brita ¾” gerado pelo programa SPSS

Densidade Real	<i>Kolmogorov-Smirnov</i>			<i>Shapiro-Wilk</i>		
	Statistic	df	Sig.*	Statistic	df	Sig.*
	0,329	30	0,000	0,778	30	0,000
Conclusão	Rejeita-se H_0			Rejeita-se H_0		

*Sig. = Valor-p

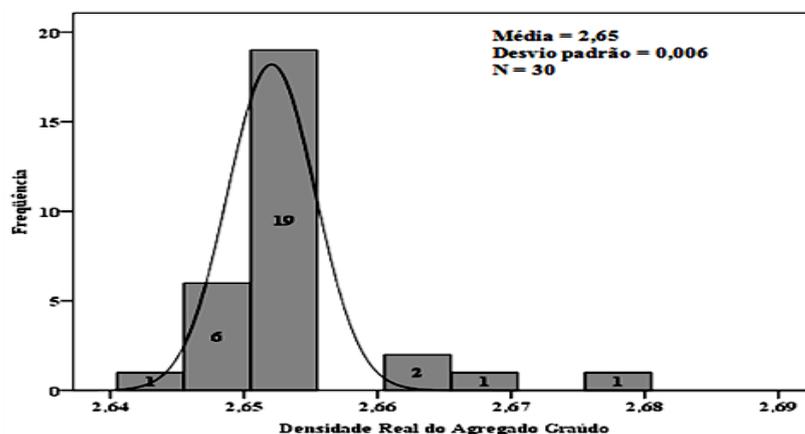


Figura 4.52. Histograma para o ensaio de densidade real da brita ¾” gerado pelo SPSS

4.2.3. Absorção (Brita ¾”)

Para o ensaio de absorção da brita ¾” também foram feitas 30 determinações utilizando-se os mesmos equipamentos e o mesmo operador. Ressalta-se que a obtenção do resultado de absorção é feita a partir do mesmo ensaio que origina os valores de densidades real e aparente (DNER-ME 081/1998: “Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo”). Os valores obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela 4.33 e os valores obtidos para as medidas de tendência central e dispersão encontram-se na Tabela 4.34.

Tabela 4.33. Valores obtidos no ensaio de absorção da brita $\frac{3}{4}$ ''

Amostra	Absorção (%)	Amostra	Absorção (%)	Amostra	Absorção (%)
1	0,50	11	0,66	21	0,75
2	0,52	12	0,68	22	0,76
3	0,55	13	0,68	23	0,77
4	0,60	14	0,69	24	0,77
5	0,62	15	0,69	25	0,84
6	0,63	16	0,69	26	0,84
7	0,63	17	0,71	27	0,85
8	0,65	18	0,72	28	0,86
9	0,65	19	0,72	29	0,95
10	0,65	20	0,75	30	0,99

Tabela 4.34. Medidas de tendência central e de dispersão para a absorção da brita $\frac{3}{4}$ ''

Tendência Central / Dispersão	Valor
Média	0,712
Mediana	0,690
Desvio padrão	0,114
Variância	0,013
Valor Mínimo	0,500
Valor Máximo	0,990

Ao lançar os dados do programa SPSS, foram obtidas a Tabela 4.35 e o histograma da Figura 4.53. Observa-se, na Tabela 4.35, que o *valor-p* (“Sig.”) de *Kolmogorov-Smirnov* e de *Shapiro-Wilk* é 0,200 e 0,495, respectivamente. Conclui-se que para os dois métodos pode-se admitir que o conjunto de dados em questão tem distribuição normal, pois o *valor-p* obtido é maior do que 0,05.

Tabela 4.35. Teste de normalidade para o ensaio de absorção da brita $\frac{3}{4}$ '' gerado pelo programa SPSS

Absorção	<i>Kolmogorov-Smirnov</i>			<i>Shapiro-Wilk</i>		
	Statistic	Df	Sig.*	Statistic	Df	Sig.*
	0,111	30	0,200	0,968	30	0,495
Conclusão	Não se rejeita H_0			Não se rejeita H_0		

*Sig. = *Valor-p*

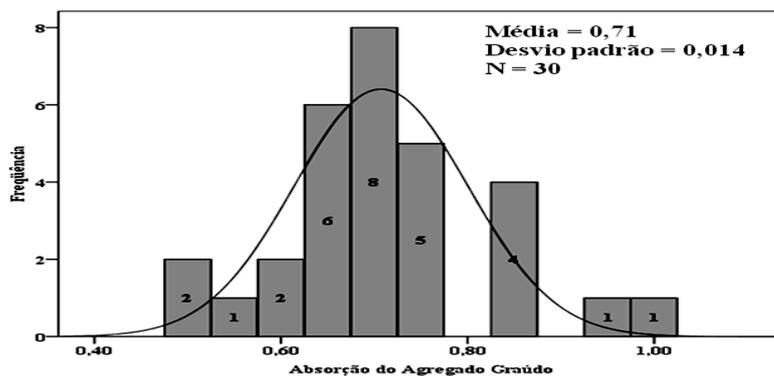


Figura 4.53. Histograma para o ensaio de absorção da brita $\frac{3}{4}$ '' gerado pelo SPSS

4.2.4. Densidade Real (pó-de-pedra)

Para o ensaio de densidade real do pó-de-pedra foram realizados 34 ensaios utilizando-se os mesmos equipamentos e o mesmo operador. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 4.36 e os valores das medidas de tendência central e de dispersão encontram-se na Tabela 4.37.

Tabela 4.36. Valores de densidade real do pó-de-pedra

Amostra	D. Real	Amostra	D. Real	Amostra	D. Real
1	2,598	13	2,642	25	2,651
2	2,599	14	2,643	26	2,652
3	2,610	15	2,643	27	2,653
4	2,618	16	2,645	28	2,653
5	2,618	17	2,646	29	2,656
6	2,620	18	2,647	30	2,658
7	2,632	19	2,647	31	2,661
8	2,633	20	2,649	32	2,665
9	2,635	21	2,650	33	2,672
10	2,635	22	2,650	34	2,651
11	2,636	23	2,650		
12	2,638	24	2,650		

Tabela 4.37. Medidas de tendência central e de dispersão para a densidade real do pó-de-pedra

Tendência Central / Dispersão	Valor
Média	2,641
Mediana	2,647
Desvio Padrão	0,017
Variância	0,000
Valor Mínimo	2,598
Valor Máximo	2,672

Ao lançar os dados do programa SPSS, foram obtidos a Tabela 4.38 e o histograma da Figura 4.54. Observa-se, na Tabela 4.38, que o *valor-p* ("Sig.") de

Kolmogorov-Smirnov e de Shapiro-Wilk é 0,024 e 0,011, respectivamente. Conclui-se que para os dois métodos deve-se rejeitar a hipótese de normalidade (H_0), pois o valor-p obtido é menor do que 0,05.

Tabela 4.38. Valores de densidade real do pó-de-pedra gerado pelo programa SPSS

D. Real do pó-de-pedra	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.*	Statistic	df	Sig.*
	0,162	34	0,024	0,914	34	0,011
Conclusão	Rejeita-se H_0			Rejeita-se H_0		

*Sig. = Valor-p

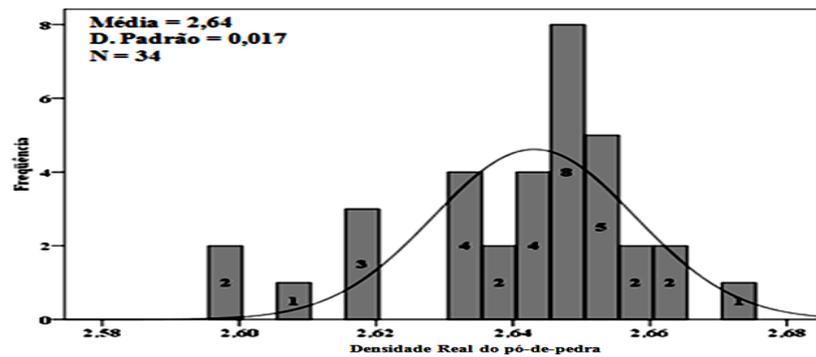


Figura 4.54. Histograma para o ensaio de densidade real do pó-de-pedra gerado pelo SPSS

4.2.5. Volume de vazios (V_v) de Corpos de Prova (CP)

Para a determinação do Volume de vazios (V_v) de Corpos de Prova (CP) foram feitas 34 determinações utilizando-se os mesmos equipamentos e o mesmo operador. Os valores obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela 4.39 e os valores obtidos para as medidas de tendência central e dispersão encontram-se na Tabela 4.40.

Tabela 4.39. Valores de V_v (%)

Amostra	V_v (%)	Amostra	V_v (%)	Amostra	V_v (%)
1	3,03	13	3,77	25	4,14
2	3,10	14	3,78	26	4,17
3	3,12	15	3,79	27	4,18
4	3,21	16	3,84	28	4,21
5	3,35	17	3,86	29	4,23
6	3,37	18	3,87	30	4,26
7	3,44	19	3,87	31	4,27
8	3,52	20	3,90	32	4,31
9	3,55	21	3,90	33	4,46
10	3,56	22	3,96	34	4,82
11	3,63	23	4,06		
12	3,63	24	4,13		

Tabela 4.40. Medidas de tendência central e de dispersão para a determinação do Vv

Tendência Central / Dispersão	Valor
Média	3,832
Mediana	3,865
Desvio padrão	0,419
Variância	0,175
Valor Mínimo	3,030
Valor Máximo	4,820

Ao lançar os dados do programa SPSS, foram obtidas a Tabela 4.41 e o Histograma da Figura 4.55. Observa-se, na Tabela 4.41, que o *valor-p* (“Sig.”) de *Kolmogorov-Smirnov* e de *Shapiro-Wilk* é 0,200 e 0,735, respectivamente. Estes dois valores são maiores do que 0,05. Então, para os dois métodos, não se rejeita H_0 , sendo a distribuição normal uma distribuição possível para o conjunto de dados em questão.

Tabela 4.41. Teste de normalidade para a determinação do Vv dos CPs gerado pelo programa SPSS

Vv dos CPs	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.*	Statistic	df	Sig.*
	0,088	34	0,200	0,979	34	0,735
Conclusão	Não se rejeita H_0			Não se rejeita H_0		

*Sig. = *Valor-p*

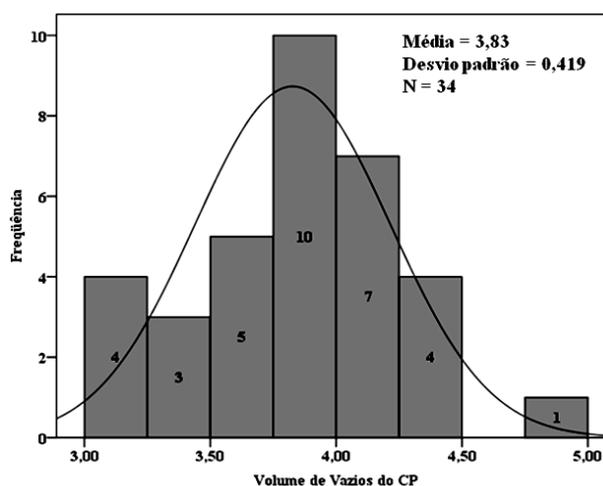


Figura 4.55. Histograma para a determinação do Vv do CP gerado pelo SPSS

4.2.6. Densidade Aparente de Corpos de Prova (G_{mb})

O ensaio de densidade aparente dos CPs foi efetuado em 34 CPs semelhantes, que foram preparados pelo mesmo operador e utilizando os mesmos equipamentos. Os

valores obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela 4.42 e os valores obtidos para as medidas de tendência central e dispersão encontram-se na Tabela 4.43.

Tabela 4.42. Valores de G_{mb} dos CPs

Amostra	G_{mb}	Amostra	G_{mb}	Amostra	G_{mb}
1	2,292	13	2,312	25	2,322
2	2,301	14	2,314	26	2,322
3	2,304	15	2,314	27	2,323
4	2,305	16	2,315	28	2,325
5	2,306	17	2,315	29	2,327
6	2,306	18	2,315	30	2,327
7	2,307	19	2,315	31	2,330
8	2,307	20	2,317	32	2,333
9	2,308	21	2,317	33	2,333
10	2,308	22	2,317	34	2,335
11	2,309	23	2,320		
12	2,311	24	2,322		

Tabela 4.43. Medidas de tendência central e de dispersão para os valores de G_{mb}

Tendência Central / Dispersão	Valor
Média	2,316
Mediana	2,315
Desvio padrão	0,010
Variância	0,000
Valor Mínimo	2,290
Valor Máximo	2,340

Ao lançar os dados do programa SPSS, foram obtidas a Tabela 4.44 e o histograma da Figura 4.56. Observa-se, na Tabela 4.44, que o *valor-p* (“Sig.”) de *Kolmogorov-Smirnov* e de *Shapiro-Wilk* é 0,200 e 0,742, respectivamente. Conclui-se que para os dois métodos pode-se admitir que o conjunto de dados em questão possui distribuição normal, pois o *valor-p* obtido é maior do que 0,05.

Tabela 4.44. Teste de normalidade para os valores de G_{mb} gerado pelo programa SPSS

G_{mb}	<i>Kolmogorov-Smirnov</i>			<i>Shapiro-Wilk</i>		
	Statistic	DF	Sig.*	Statistic	df	Sig.*
	0,095	34	0,200	0,979	34	0,742
Conclusão	Não se rejeita H_0			Não se rejeita H_0		

*Sig. = *Valor-p*

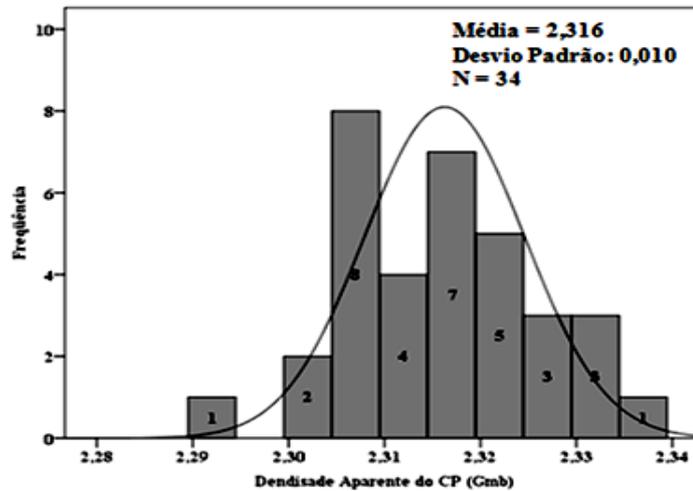


Figura 4.56. Histograma para os valores de G_{mb} gerado pelo SPSS

4.3. MISTURA ASFÁLTICA SOLTA

Conforme detalhado no item 3.1.3, cada laboratório compactou cinco amostras semelhantes de mistura asfáltica solta, que foram preparadas na UFC. Em seguida, determinaram a densidade aparente (G_{mb}) dos CPs que foram, então, enviados à UFC juntamente com os formulários preenchidos com os dados de pesagem, G_{mb} e dimensões dos cinco CPs. Na UFC, estas amostras foram pesadas novamente e novas G_{mb} foram obtidas para fins de comparação com aquelas determinadas pelos laboratórios. De posse dos resultados das G_{mb} , a UFC calculou todos os valores de V_v por meio da expressão $V_v = (DMT - G_{mb})/DMT$, onde foi utilizado o mesmo valor de DMT (2,409) para todos os CPs. Uma vez que este valor foi determinado quando da produção da mistura solta ainda na UFC.

A Figura 4.57 apresenta as medianas dos resultados de G_{mb} : (i) calculados pelos laboratórios; (ii) calculados pela UFC, usando os dados de pesagem dos laboratórios, a fim de verificar a ocorrência de erros de cálculo; e (iii) calculados pela UFC, usando a nova pesagem feita na UFC, a fim de verificar a ocorrência de erros de compactação ou de pesagem.

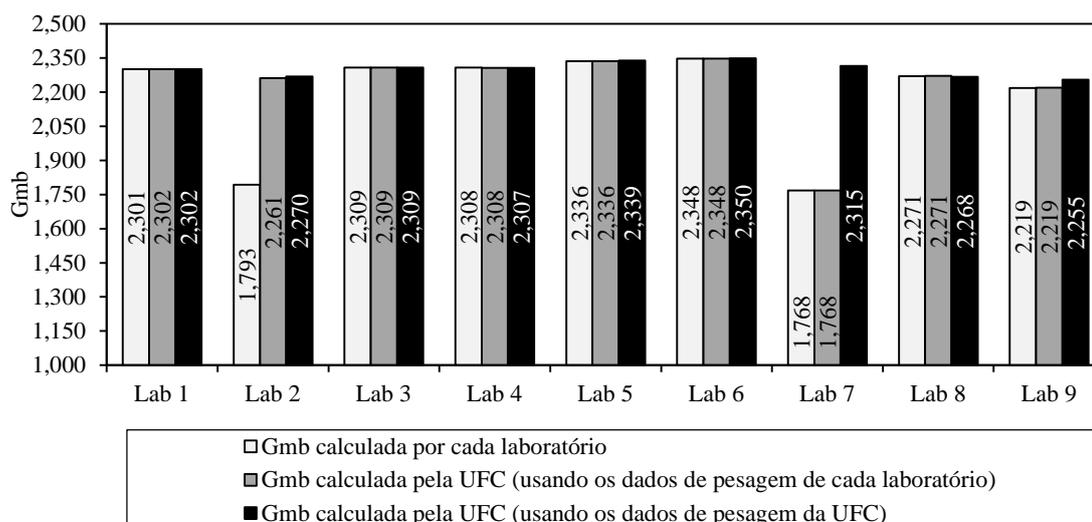


Figura 4.57. Mediana das G_{mb} obtidas pelos oito laboratórios e pela UFC

A Figura 4.58 apresenta as medianas dos resultados dos Vv calculados na UFC: (i) utilizando as G_{mb} calculadas pelos laboratórios; (ii) utilizando as G_{mb} calculadas pela UFC, com os dados de pesagem dos laboratórios e (iii) utilizando as G_{mb} calculadas pela UFC, obtidas a partir das pesagens na UFC.

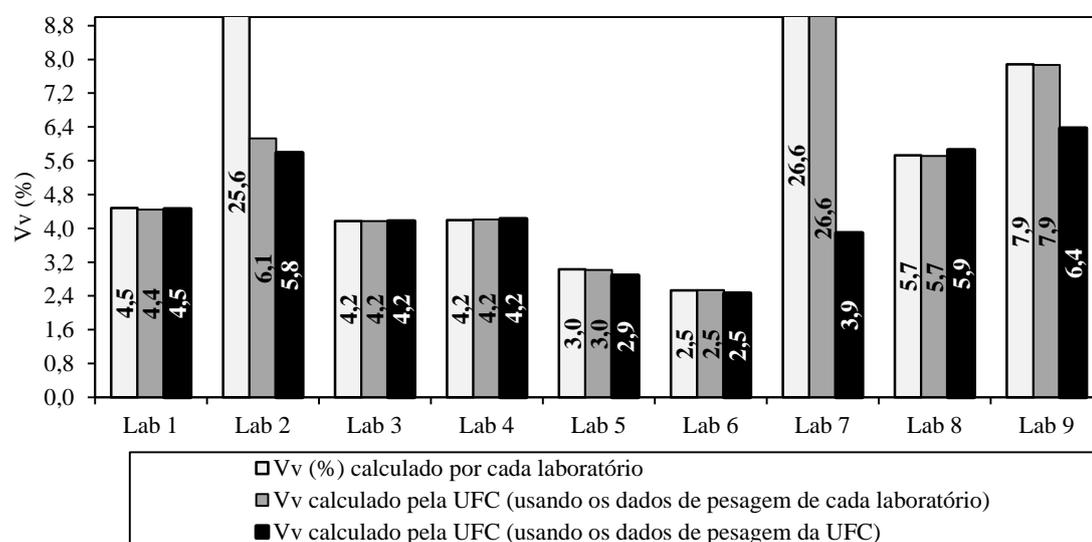


Figura 4.58. Mediana dos Vv (%) obtidos pelos oito laboratórios e pela UFC

O valor esperado para a G_{mb} é de 2,310, com tolerância de $\pm 0,02$ e para o Vv é de $4,0 \pm 0,4\%$. Então, foram considerados os seguintes critérios para análise dos resultados:

- i) Se a G_{mb} obtida por um determinado laboratório diferir da G_{mb} calculada pela UFC utilizando a pesagem deste laboratório, então, pode-se dizer que houve erro de cálculo. Por exemplo: Laboratório 2 (Figura 4.57);

- ii) Se a G_{mb} obtida por um determinado laboratório não diferir de $\pm 0,02$ da G_{mb} obtida pela UFC, então, pode-se dizer que o laboratório realizou uma pesagem satisfatória e não cometeu erros de cálculo. Por exemplo: Laboratórios 1, 3, 4, 5, 6 e 8 (Figura 4.57);
- iii) Se a G_{mb} calculada pela UFC (utilizando os dados de pesagem obtidos por um determinado laboratório) diferir de $\pm 0,02$ da G_{mb} calculada pela UFC (utilizando os dados de pesagem obtidos pela UFC), então, pode-se afirmar que o laboratório cometeu erros na pesagem. Por exemplo: Laboratórios 7 e 9 (Figura 4.57);
- iv) Se a G_{mb} obtida pela UFC (utilizando os dados de pesagem obtidos pela UFC), estiver dentro da faixa $2,310 \pm 0,02$ significa dizer que o laboratório não cometeu erros no procedimento de compactação. Por exemplo: Laboratórios 1, 3, 4 e 7 (Figura 4.57);
- v) Se a G_{mb} obtida pela UFC (utilizando os dados de pesagem obtidos por ela), estiver fora da faixa $2,310 \pm 0,02$, pode-se dizer que o laboratório cometeu erros em alguma(s) etapa(s) da compactação. Por exemplo: Laboratórios 2, 5, 6, 8 e 9 (Figura 4.57).

LABORATÓRIO 1

A G_{mb} obtida pelo Laboratório 1 não diferiu de $\pm 0,02$ da G_{mb} obtida pela UFC, quando esta usou os dados de pesagem do Laboratório 1, a fim de verificar a ocorrência de erros de cálculo. Então, considera-se que o Laboratório 1 realizou uma pesagem satisfatória e não cometeu erros de cálculo. A G_{mb} obtida pela UFC (utilizando os dados de pesagem obtidos na UFC) está dentro da faixa esperada de $2,310 \pm 0,02$. Dessa forma, considera-se que o Laboratório 1 não cometeu erros no procedimento de compactação e a pesagem de CP Marshall foi realizada de maneira satisfatória. Então, não há interferência para ser recomendada com relação a estes quesitos.

LABORATÓRIO 2

A G_{mb} calculada pelo Laboratório 2 (1,793) difere da G_{mb} calculada pela UFC (2,261) (sendo estes dois cálculos utilizando os dados de pesagem obtidos pelo

Laboratório 2). Então, pode-se dizer que houve erros de cálculos cometidos pelo Laboratório 2 para a determinação da G_{mb} . Este erro pode ser observado nos resultados contidos no Formulário Compactação Marshall preenchido por este laboratório. Além disso, a G_{mb} calculada pela UFC (2,270) (utilizando os dados de pesagem obtidos pela própria UFC) está fora da faixa $2,310 \pm 0,02$. Então, acredita-se que o Laboratório 2 tenha cometido erros na compactação. Este erro pode ser confirmado ao analisar a observação deixada por este laboratório no Formulário Compactação Marshall: “*O tempo de 30 minutos foi insuficiente para as misturas atingirem a temperatura de compactação (150°C). Dessa maneira, os CPs 1 e 2 foram compactados a 120°C, os CPs 3 e 4 a 130°C e o CP5 a 140°C*”. O efeito da temperatura, certamente, contribuiu para a produção de misturas com Vv de 5,8% (pesagem na UFC), que está acima do esperado ($4,0 \pm 0,4\%$), como pode ser observado na Figura 4.58. Para que a mistura atinja a temperatura de compactação desejada (150°C), deve-se deixar a estufa estabilizar à esta temperatura. Em seguida, deve-se inserir a mistura asfáltica dentro da estufa com temperatura estabilizada a 150°C e deixar aquecer durante 30 minutos. Retirar a mistura da estufa e, com o uso de um termômetro, conferir se a temperatura da mesma é de 150°C. Este procedimento foi testado diversas vezes no laboratório coordenador e todas as misturas atingiram a temperatura desejada no tempo pré-determinado. O Laboratório 2 deve: (i) verificar os cálculos para determinação da G_{mb} ; (ii) ser mais cuidadoso no controle de temperatura de compactação (150°C) e (iii) verificar a calibração da estufa.

LABORATÓRIO 3

Os valores de G_{mb} (2,309) e de Vv (4,2) obtidos pelo Laboratório 3 enquadram-se nos limites desejados ($2,310 \pm 0,02$ e $4,0 \pm 0,4\%$, respectivamente). Dessa maneira, este laboratório obteve desempenho satisfatório com relação à pesagem, à compactação das amostras de mistura asfáltica solta e aos cálculos. O Laboratório 3 não precisou fazer correções com relação ao aspecto compactação e pesagem de CPs.

LABORATÓRIO 4

O Laboratório 4 obteve desempenho satisfatório com relação à pesagem, à compactação das amostras de mistura asfáltica solta e aos cálculos. O Laboratório 4 não precisou fazer correções com relação ao aspecto compactação e pesagem de CPs. Com

relação à obtenção do V_v , este laboratório também obteve desempenho satisfatório, pois seus resultados estão dentro do limite requerido ($4,0 \pm 0,4\%$).

LABORATÓRIO 5

A G_{mb} calculada pelo Laboratório 5 não diferiu de $\pm 0,02$ da G_{mb} calculada pela UFC (sendo ambas G_{mb} calculadas utilizando os dados de pesagem obtidos pelo Laboratório 5). Então, pode-se dizer que o laboratório realizou uma pesagem satisfatória e não cometeu erros de cálculo. Por outro lado, a G_{mb} calculada pela UFC (utilizando os dados de pesagem obtidos pela UFC) está fora da faixa $2,310 \pm 0,02$. Então, possivelmente, houve erro em alguma(s) etapa(s) da compactação. Acredita-se que pode ter havido falhas no controle de temperatura de compactação ou que a frequência e/ou o peso do soquete Marshall possam estar descalibrados, pois os valores de V_v (em torno de 3,0%) estão fora da faixa de $4,0 \pm 0,4\%$ esperada. O Laboratório 5 precisou verificar se houve falhas no controle de temperatura e se houve problemas com o soquete Marshall, de maneira a descobrir o motivo do erro cometido.

LABORATÓRIO 6

A G_{mb} calculada pelo Laboratório 6 (2,348) não diferiu de $\pm 0,02$ da G_{mb} calculada pela UFC (2,348) (sendo as duas G_{mb} calculadas com os resultados de pesagem obtidos pelo Laboratório 6). Constata-se que o Laboratório 6 não cometeu erros de cálculo. A G_{mb} obtida pela UFC (usando os dados de pesagem obtidos pela UFC) está fora da faixa de $2,310 \pm 0,02$. Logo, acredita-se que este laboratório tenha cometido erro em alguma(s) etapa(s) da compactação. Pode ter havido falhas no controle da temperatura de compactação ou a frequência e/ou o peso do soquete Marshall podem estar descalibrados, pois os valores de V_v (2,5%) estão fora da faixa de $4,0 \pm 0,4\%$. O Laboratório 6 precisou verificar se houve falhas no controle de temperatura e se houve problemas com o soquete Marshall, de maneira a descobrir o motivo do erro cometido.

LABORATÓRIO 7

A G_{mb} calculada pela UFC (1,768) (utilizando os dados de pesagem obtidos pelo Laboratório 7) diferiu em mais de $\pm 0,02$ da G_{mb} calculada pela UFC (usando os dados de pesagem obtidos pela UFC). Então, pode-se afirmar que este laboratório cometeu

erros na pesagem. A G_{mb} obtida pela UFC (utilizando os dados de pesagem obtidos pela UFC) está dentro da faixa de $2,310 \pm 0,02$. Então, significa dizer que o Laboratório 7 não cometeu erros no procedimento de compactação. Este último caso também pode ser observado na Figura 4.58, onde o V_v calculado pela UFC utilizando a pesagem da UFC é satisfatório (3,9%), estando próximo dos 4,0% de vazios desejado. Contudo, este pode não ser o real V_v dos CPs, pois observou-se que este laboratório utilizou papel convencional para a confecção dos CPs (Figura 4.59(a)) e não efetuou a retirada deste após a compactação, conforme realizado pelos demais laboratórios (Figura 4.59(b)). Esta ação pode ter influenciado a determinação do V_v , pois o papel colado na superfície do CP ocasiona maior absorção de água durante a pesagem hidrostática. Então, a água é absorvida pelo CP e pelo papel, originando um peso submerso mais baixo e um V_v mais alto. Dessa maneira, o Laboratório 7 precisou (i) verificar o sistema de pesagem hidrostática para descobrir a fonte do erro e (ii) passar a retirar o papel do CP imediatamente após a compactação.



(a)



(b)

Figura 4.59. CPs compactados: (a) pelo Laboratório 7 e (b) pelos demais laboratórios

A partir de investigações, o Laboratório 7 conseguiu descobrir que a fonte causadora dos erros era o sistema de pesagem hidrostática utilizado. Para solucionar o problema, houve substituição da balança deste laboratório. A maneira encontrada para verificar se o novo sistema funciona corretamente, foi enviar de volta ao Laboratório 7 aqueles cinco CPs compactados por ele e que foram re-enviados à UFC, de modo a ser efetuado uma nova pesagem. Feito isso, observou-se que a nova pesagem está de acordo com a pesagem de referência, conforme apresentado nas Figuras 4.60 e 4.61.

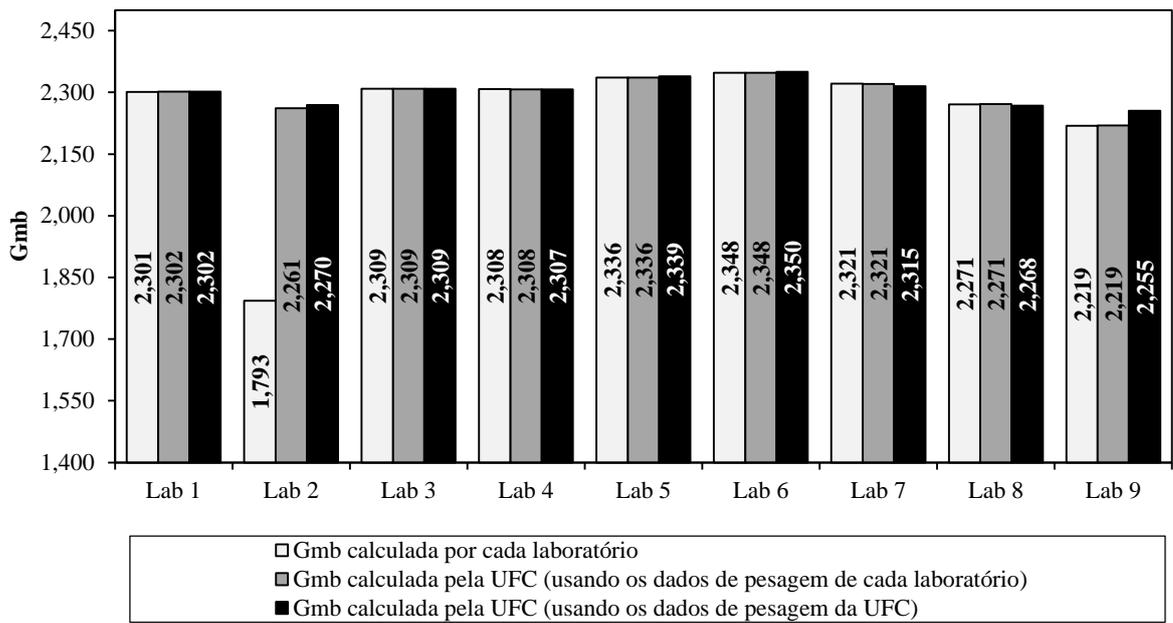


Figura 4.60. Mediana das G_{mb} 's obtidas pelos oito laboratórios e pela UFC, após repetição da pesagem pelo Laboratório 7

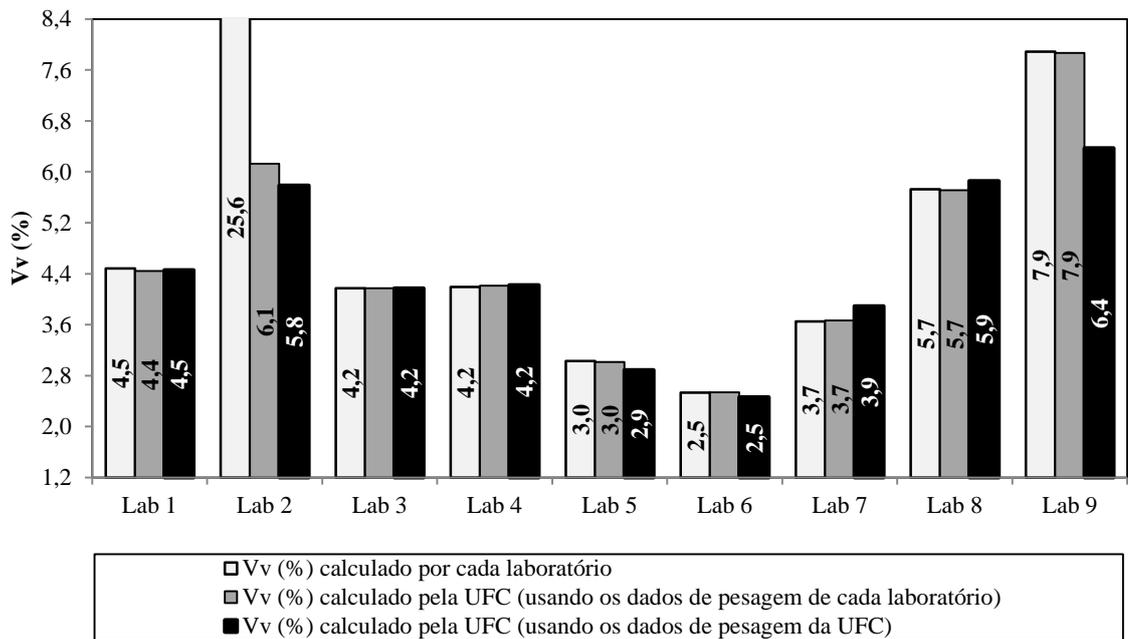


Figura 4.61. Mediana dos V_v 's obtidos pelos oito laboratórios e pela UFC, após repetição da pesagem pelo Laboratório 7

LABORATÓRIO 8

A G_{mb} obtida pelo Laboratório 8 não difere de $\pm 0,02$ da G_{mb} obtida pela UFC, quando ambas utilizam os dados de pesagem fornecidos pelo Laboratório 8. Então, pode-se dizer que o Laboratório 8 não cometeu erros de cálculo. A G_{mb} calculada pela UFC (quando utiliza os dados de pesagem obtidos pela UFC) difere apenas 0,003 da G_{mb} obtida pelo Laboratório 8, porém, está fora da faixa de $2,310 \pm 0,02$. Então, pode-se dizer que o Laboratório 8 efetuou uma pesagem satisfatória, porém cometeu erro em alguma(s) etapa(s) da compactação. O V_v obtido para este laboratório (Figura 4.58) está acima do valor desejado (4,0%), fato que costuma ocorrer quando a compactação é efetuada abaixo da temperatura especificada ou quando o esforço de compactação está inferior ao que deveria estar. O Laboratório 8 deve verificar: (i) se houve controle de temperatura durante a compactação e (ii) a frequência dos golpes e o peso do soquete do compactador Marshall, a fim de descobrir porque os CPs estão com o V_v acima do especificado.

LABORATÓRIO 9

A G_{mb} obtida pelo Laboratório 9 não difere da G_{mb} obtida pela UFC, quando ambas utilizam os dados de pesagem fornecidos pelo Laboratório 9 para efetuar os cálculos. Então, pode-se dizer que este laboratório não cometeu erros de cálculo. Porém, a G_{mb} obtida pela UFC (quando esta utilizou os dados de pesagem obtidos pela UFC) está diferente da G_{mb} obtida pelo Laboratório 9 e acima da faixa esperada de $2,310 \pm 0,02$. Então, acredita-se que o Laboratório 9 tenha cometido falhas na pesagem e em alguma(s) etapa(s) da compactação. O V_v obtido para este laboratório, mostrado no gráfico da Figura 4.58, está acima do valor desejado (4,0%), fato que costuma ocorrer quando a compactação é efetuada abaixo da temperatura especificada. O Laboratório 9 precisa verificar: (i) como foi efetuado o controle da temperatura de compactação, a fim de descobrir porque os CPs estão com o V_v elevado e (ii) se a pesagem está sendo efetuada de maneira adequada.

4.4. DOSAGEM MARSHALL

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelos nove laboratórios nas etapas do procedimento de dosagem Marshall. Inicialmente, é apresentado o resultado final das nove dosagens. Em seguida, é mostrado o desempenho dos laboratórios na caracterização dos agregados, na compactação de cinco amostras de mistura solta enviadas pela UFC, na determinação da curva de projeto e nos cálculos dos parâmetros volumétricos. A Figura 4.62 apresenta os cinco teores de ligante testados pelos nove laboratórios, bem como o teor ótimo selecionado ao final do procedimento de dosagem Marshall. O Laboratório 2 não determinou o teor ótimo de ligante. A Figura 4.63 indica os valores de Vv para os teores de ligante testados por cada laboratório, incluindo o Vv para o teor ótimo.

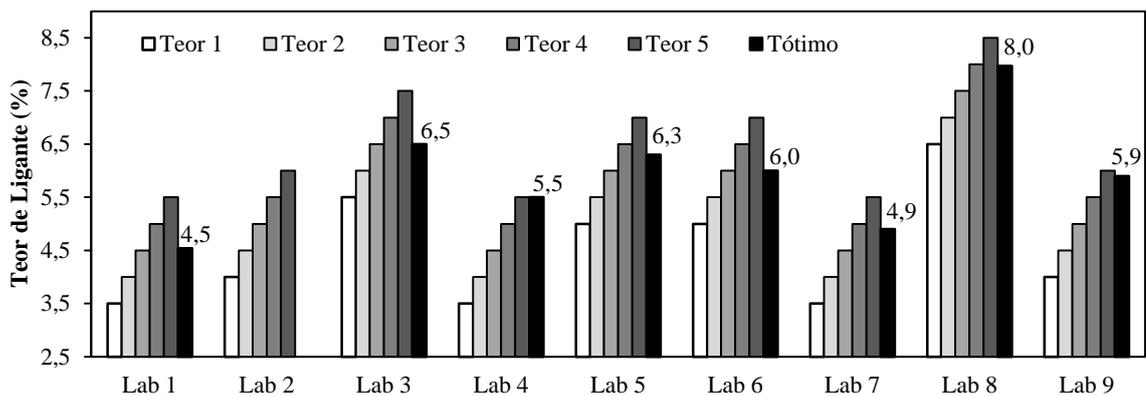


Figura 4.62. Teores de ligante testados pelos nove laboratórios

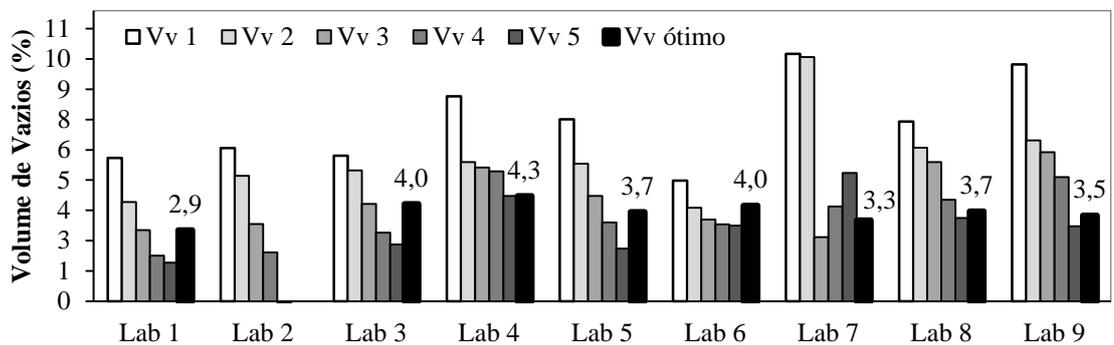


Figura 4.63. Volume de vazios (Vv's) obtidos para os diversos teores testados pelos nove laboratórios

LABORATÓRIO 1

O Laboratório 1 determinou como teor ótimo de ligante o valor de 4,5%. Mas, devido à obtenção de baixos valores de densidade real dos agregados graúdos (2,53 e 2,54 para a brita 3/4"; 2,39 e 2,40 para a brita 3/8"), considera-se que os valores de DMT e de Vv também estejam baixos e, por conseguinte, o teor ótimo de ligante especificado está menor do que deveria ser. O Laboratório 1 deve: (i) calcular novamente os valores de DMT para os diversos teores testados, a partir da repetição dos ensaios de densidade real dos agregados; (ii) testar mais dois teores de ligante acima de 5,5% (sugere-se 6,0% e 6,5%); (iii) calcular novamente os parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para os diversos teores e (iv) determinar o novo teor ótimo de ligante.

LABORATÓRIO 2

O Laboratório 2 não informou o teor ótimo de ligante considerado, nem os valores de DMT utilizados. Porém, pegaram-se os valores de pesagem fornecidos no formulário deste laboratório e determinaram-se os parâmetros volumétricos para os diversos teores testados, a fim de verificar a ocorrência de erros de cálculos. Para tanto, também foram calculados valores de DMT, utilizando os resultados de densidade real dos agregados obtidos pelo Laboratório 2. Constatou-se que não houve erros de cálculos na determinação da G_{mb} , mas que pode ter havido erros de cálculos na determinação da DMT, porque os valores de Vv que antes variavam de 6,3% a 0,7% (valores fornecidos pelo Laboratório 2) passaram a variar de 9,4% a 4,8% (valores calculados pela UFC utilizando os dados do Laboratório 2).

Também foram efetuados cálculos da DMT de uma segunda maneira: substituindo-se o valor insatisfatório de densidade real da brita 3/8" pelo valor de referência para este ensaio (mediana dos valores obtidos pelos nove laboratórios). Percebe-se que os valores de Vv variaram de 10,6 a 6,0%, não chegando ao intervalo de Vv preconizado pelo DNIT (3,0 a 5,0%).

Constata-se que o Laboratório 2 deve: (i) calcular os valores de DMT para os diversos teores testados, a partir da correção dos ensaios de densidade real dos agregados, tomando cuidado para não cometer erros de cálculos; (ii) testar mais um teor de ligante acima de 6,0% (sugere-se 6,5%), (iii) calcular os novos parâmetros

volumétricos para os diversos teores testados e (iv) determinar o novo teor ótimo de ligante.

Este laboratório efetuou uma nova dosagem corrigindo os valores de DMT com os novos resultados de densidade real dos agregados graúdos, agora tidos como satisfatórios. Os cálculos para determinação dos parâmetros volumétricos foram conferidos e verificou-se que não houve erros. O laboratório testou mais um teor de ligante (6,5%), conforme sugerido pelo laboratório coordenador. O teor ótimo de ligante selecionado foi de 6,5%, estando o Vv (3,8%) e o RBV (79,3%) dentro da faixa preconizada pelo DNIT para misturas do tipo CA.

LABORATÓRIO 3

O formulário de dosagem Marshall entregue pelo Laboratório 3 foi avaliado e observou-se que não houve erros de cálculo para a determinação dos parâmetros volumétricos (DMT, G_{mb} , Vv, RBV, etc). O teor ótimo de ligante selecionado foi de 6,5%, estando os parâmetros Vv (4,0%) e RBV (78,5%) dentro da faixa recomendada pelo DNIT para CA. Este laboratório não cometeu erros quando compactou as cinco amostras de misturas asfáltica solta enviadas pela UFC. Dessa forma, acredita-se que o teor ótimo selecionado esteja coerente.

LABORATÓRIO 4

A partir de análises feitas no formulário de dosagem Marshall entregue pelo Laboratório 4, observou-se que houve erros de cálculo na determinação dos valores de DMT para todos os teores testados. Dessa maneira, realizaram-se novos cálculos para corrigir estes valores de DMT, utilizando os resultados de densidade real obtidos pelo próprio Laboratório 4, que são considerados satisfatórios (Tabela 4.44). Então, para o teor de 5,5%, tido como ótimo pelo Laboratório 4, o valor do Vv passou de 4,3% para 4,8% e o valor de RBV passou de 69,2% para 72,0% (que estão fora da faixa de RBV do DNIT para CA que é de 75 a 82%).

Tabela 4.44. Comparação dos cálculos de DMT, Vv e RBV entre o Laboratório 4 e a UFC

Teor de Ligante (%)	Laboratório 4			UFC*		
	DMT	Vv (%)	RBV (%)	DMT	Vv (%)	RBV (%)
3,5	2,488	8,5	47,9	2,501	9,0	46,5
4,0	2,470	5,8	61,2	2,483	6,2	59,3
4,5	2,449	5,5	64,7	2,465	6,1	62,3
5,0	2,434	5,4	69,2	2,447	5,8	65,8
5,5 (ótimo)	2,417	4,3	69,2	2,429	4,8	72,0

* Os cálculos da DMT foram feitos com base nos resultados de densidade real dos agregados fornecidos pelo Laboratório 4. Os outros cálculos (Vv e RBV) foram feitos com base nos pesos dos CPs fornecidos pelo Laboratório 4.

O Laboratório 4 deve: (i) calcular novamente o valor de DMT para cada teor de ligante testado e (ii) testar mais dois teores de ligante que sejam maiores do que 5,5% (sugerem-se 6,0% e 6,5%), até encontrar valores de Vv e de RBV que se enquadrem nos limites do DNIT para CA.

LABORATÓRIO 5

A partir de análises feitas no formulário do Laboratório 5, constatou-se que não houve erros de cálculo na determinação dos parâmetros (DMT, G_{mb} , Vv, RBV, etc). O teor ótimo de ligante escolhido (6,3%) possui valores de Vv (3,7%) e de RBV (79,3%) que se enquadram nos limites estabelecidos pelo DNIT para CA. Porém, sugere-se que sejam verificados o compactador Marshall e as estufas, pois o erro cometido na compactação das cinco amostras de mistura solta enviadas pela UFC (Figuras 4.57 e 4.58) pode ter persistido na dosagem. E, se o erro persistiu na dosagem significa dizer que os Vv's dos CPs da dosagem Marshall estão abaixo do que deveriam ser caso não houvesse o erro. O Laboratório 5 deve verificar: (i) a frequência dos golpes e o peso do soquete do compactador Marshall e (ii) o sistema de controle de temperatura do laboratório (estufas e termômetros).

LABORATÓRIO 6

A partir da análise do formulário de dosagem Marshall do Laboratório 6, observou-se que não houve erros de cálculo na determinação da G_{mb} dos diversos CPs moldados. Observou-se, porém, que houve erros na determinação dos valores de DMT para todos os teores testados. A fim de corrigir estas DMTs, realizaram-se novos cálculos de DMT e de Vv, utilizando os resultados de densidade real dos agregados

obtidos pelo próprio Laboratório 6 e os resultados de G_{mb} , também obtidos pelo Laboratório 6. A nova faixa de variação de Vv obtida a partir dos cálculos na UFC foi de 3,5% a 0,9%, para teores de ligante testados de 5,0 a 7,0%, respectivamente. Enquanto que a faixa de variação de Vv a partir dos cálculos realizados pelo Laboratório 6 foi menor (de 5,0 a 3,1%), para os mesmos teores de ligante (Tabela 4.45).

Tabela 4.45. Comparação dos cálculos de DMT, Vv e RBV entre o Laboratório 6 e a UFC

Teor de Ligante (%)	Laboratório 6			UFC*		
	DMT	Vv(%)	RBV(%)	DMT	Vv(%)	RBV(%)
5,0	2,472	5,0	69,6	2,434	3,5	76,6
5,5	2,454	3,9	76,6	2,416	2,4	84,3
6,0 (dosagem)	2,436	3,4	80,3	2,399	1,9	88,0
6,5	2,419	3,2	82,3	2,382	1,7	89,7
7,0	2,403	3,1	83,1	2,366	0,9	94,9
6,0 (ótimo)	2,436	4,0	77,5	2,399	3,0	81,9

*Na UFC, os cálculos das DMTs foram feitos com base nos resultados de densidade real dos agregados obtidos pelo Laboratório 6. Os demais cálculos (Vv e RBV) foram feitos com base nos pesos dos CPs e nas G_{mb} fornecidos pelo Laboratório 6.

Observa-se na Tabela 4.45 que a média dos Vv's dos 3 CPs contendo 6,0% de ligante (3,4%), obtida durante a dosagem, é diferente da média dos 3 CPs obtida ao final da dosagem (4,0%), quando houve a seleção do teor ótimo. Observa-se, ainda, que esta diferença é maior quando os cálculos dos Vv's são feitos com base na DMT calculada pela UFC. Dessa maneira, foi feita uma verificação dos cálculos realizados pelo Laboratório 6 para os dois grupos de CPs com 6,0% de ligante (Tabela 4.46) e detectou-se que houve erros de cálculos para o grupo de CPs do teor ótimo.

Tabela 4.46. Verificação dos cálculos para o teor de 6,0% e DMT igual a 2,436

	Média dos 3 CPs com 6,0% para a dosagem		Média dos 3 CPs com 6,0% no teor ótimo	
	Laboratório 6	UFC	Laboratório 6	UFC
Ms (g)	1.174,8		1.178,7	
Ms _{sub} (g)	675,7		672,1	
Volume (cm³)	499	499	506,5	506,5
G_{mb}	2,35	2,35	2,33	2,33
Vv (%)	3,4	3,4	4,0	4,5
RBV (%)	80,3	80,3	77,5	75,2

Acredita-se na persistência dos mesmos erros de compactação cometidos pelo Laboratório 6, quando lá se compactaram as cinco amostras de mistura asfáltica solta

enviadas pela UFC e se obtiveram baixos valores de V_v (Figura 4.58). Então, se o erro persistiu na dosagem, significa dizer que os V_v dos CPs da dosagem Marshall do Laboratório 6 estão abaixo do que deveriam ser caso não houvesse o erro. O Laboratório 6 deve: (i) verificar a frequência dos golpes e o peso do soquete do compactador Marshall, (ii) verificar o sistema de controle de temperatura do laboratório (estufas e termômetros) e (iii) verificar os cálculos para a determinação da DMT.

LABORATÓRIO 7

A partir do formulário de dosagem Marshall do Laboratório 7, observou-se que não houve erros de cálculo na determinação dos diversos parâmetros (G_{mb} , DMT, V_v , RBV, etc) dos CPs moldados. Contudo, sabendo-se que o Laboratório 7 cometeu erros na determinação da densidade real do pó-de-pedra (Tabela 4.17), sabe-se que os parâmetros volumétricos são influenciados por este erro. Dessa maneira, novos valores de DMT foram calculados pela UFC utilizando os novos resultados de densidade real do pó-de-pedra fornecidos pelo próprio Laboratório 7 (agora, tidos como satisfatórios – Tabela 4.18). Com os novos resultados de DMT e com os resultados de G_{mb} informados no formulário de dosagem deste laboratório, calcularam-se novos valores de V_v para os CPs, que passaram a assumir maiores valores quando comparados aos V_v 's contidos no formulário (Tabela 4.47). Observa-se, na Tabela 4.47, que o Laboratório 7 cometeu erros na compactação ou na pesagem dos CPs, pois a relação entre os V_v 's e os teores de ligante não está coerente. O esperado seria ocorrer a diminuição do V_v com o aumento do teor de ligante, mas isso não ocorreu com os teores de 4,5; 5,0 e 5,5%. Com isso, acredita-se que os erros cometidos na compactação daquelas cinco amostras enviadas pela UFC tenham persistido no procedimento de dosagem Marshall deste laboratório.

Tabela 4.47. Volume de vazios (V_v) antes e depois da correção da DMT

Teor de Ligante (%)	V_v (informados no formulário) (%)	V_v (calculados com os novos valores de DMT) (%)
3,5	10,2	12,2
4,0	10,1	12,1
4,5	2,6	4,8
5,0	3,9	6,0
5,5	5,3	7,3
4,9	3,3	5,6

O Laboratório 7 deve: (i) corrigir os valores de DMT, utilizando os novos valores de densidade real do pó-de-pedra já obtidos; (ii) adotar o hábito de retirar o papel da superfície do CP após a compactação; (iii) verificar a frequência dos golpes e o peso do soquete do compactador Marshall; e (ii) verificar o sistema de pesagem hidrostática do laboratório.

LABORATÓRIO 8

A partir da análise do formulário de dosagem Marshall do Laboratório 8, observou-se que houve erros de cálculo na determinação da DMT para todos os teores testados. Dessa maneira, o Laboratório 8 encontrou valores de Vv mais baixos do que aqueles que seriam encontrados caso as DMTs tivessem sido calculadas corretamente. Isso foi constatado a partir de novos cálculos de DMT que foram efetuados pela UFC utilizando os resultados de densidade real dos agregados fornecidos pelo próprio Laboratório 8 (Tabela 4.48).

Tabela 4.48. Comparação dos cálculos dos parâmetros (DMT, Vv e RBV) entre o Laboratório 8 e a UFC

Teor de Ligante (%)	Laboratório 8			UFC*		
	DMT	Vv(%)	RBV(%)	DMT	Vv(%)	RBV(%)
6,5	2,405	7,4	65,5	2,438	8,7	62,0
7,0	2,388	6,3	70,7	2,420	7,6	66,8
7,5	2,371	5,8	73,9	2,402	7,0	70,0
8,0	2,354	4,2	80,8	2,385	5,4	76,4
8,5	2,338	3,4	84,5	2,368	4,7	80,1
8,0 (ótimo)	2,360	3,7	82,8	2,386	4,8	78,9

* Os cálculos das DMTs foram efetuados com base nos resultados de densidade real dos agregados fornecidos pelo Laboratório 8. Os outros cálculos (Vv e RBV) foram feitos com base nas massas dos CPs fornecidos pelo Laboratório 8.

Além disso, foram feitos novos cálculos de DMT, mas dessa vez, utilizando os novos resultados de densidade real do pó-de-pedra (agora, tidos como satisfatórios – Tabela 4.18) fornecidos pelo Laboratório 8. Com isso, observou-se uma diminuição dos valores de Vv's dos CPs nos diversos teores testados (Tabela 4.49). Observa-se que, para o teor ótimo selecionado, o Vv está dentro da faixa do DNIT, porém o RBV não se enquadrou. Além disso, acredita-se que os teores testados estão elevados, indicando a presença de falhas no procedimento de compactação neste laboratório.

Tabela 4.49. Comparação dos cálculos dos parâmetros (DMT, Vv e RBV) entre o Laboratório 8 e a UFC, usando os novos valores de densidade real do Laboratório 8

Cálculos	Laboratório 8			UFC* (usando o novo valor densidade real do pó-de-pedra)		
	DMT	Vv(%)	RBV(%)	DMT	Vv(%)	RBV(%)
Teor de Ligante (%)						
6,5	2,405	7,4	65,5	2,404	7,4	65,6
7,0	2,388	6,3	70,7	2,387	6,3	70,8
7,5	2,371	5,8	73,9	2,370	5,7	74,0
8,0	2,354	4,2	80,8	2,354	4,2	80,9
8,5	2,338	3,4	84,5	2,337	3,4	84,6
8,0 (ótimo)	2,360	3,7	82,8	2,355	3,5	83,6

*Os cálculos das DMTs foram efetuados com base nos resultados de densidade real dos agregados fornecidos pelo Laboratório 8. Os outros cálculos (Vv e RBV) foram feitos com base nos pesos dos CPs fornecidos pelo Laboratório 8.

O Laboratório 8 deve: (i) corrigir os valores de DMT, utilizando os novos valores de densidade real do pó-de-pedra; (ii) verificar a ocorrência de falhas no procedimento de compactação que podem causar a produção de CPs com elevados Vv's, sobretudo no controle de temperatura; (iii) verificar a frequência dos golpes e o peso do soquete do compactador Marshall; e (ii) verificar o sistema de pesagem hidrostática do laboratório.

LABORATÓRIO 9

A partir do formulário do Laboratório 9, constatou-se que não houve erros de cálculos na determinação dos parâmetros (DMT, G_{mb} , Vv, RBV). O teor ótimo de ligante escolhido (5,9%) possui valores de Vv (3,5%) e de RBV (79,2%) que se enquadram nos limites estabelecidos pelo DNIT para CA. Porém, sugere-se que sejam verificados o compactador Marshall e as estufas, devido aos erros cometidos na pesagem e em alguma(s) etapa(s) da compactação daquelas cinco amostras de mistura solta enviadas pela UFC (Figuras 4.57 e 4.58). Se os referidos erros persistiram na dosagem Marshall, acredita-se que os Vv's dos CPs da dosagem estejam abaixo do que deveriam ser caso não houvesse o erro. O Laboratório 9 deve verificar: (i) a frequência dos golpes e o peso do soquete do compactador Marshall; (ii) o sistema de controle de temperatura do laboratório (estufas e termômetros) e de pesagem hidrostática.

4.4.1. Determinação da Curva Granulométrica de Projeto

Para a construção das curvas granulométricas, foi recomendada a utilização de 20% de brita 3/4", 44% de brita 3/8" e 36% de pó-de-pedra, combinados aos resultados de granulometria obtidos na etapa de caracterização de agregados. A Figura 4.64 apresenta a curva granulométrica de projeto obtida por cada laboratório.

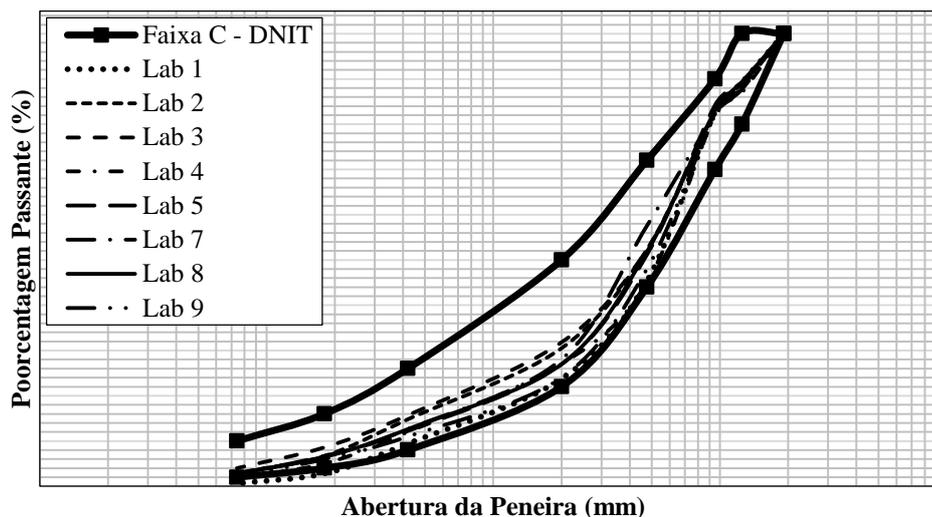


Figura 4.64. Faixa C do DNIT para Concreto Asfáltico (CA) e curvas granulométricas de projeto obtidas pelos nove laboratórios participantes

Para a análise das curvas granulométricas não foi efetuado o cálculo do z-score robusto, porém limites superiores e inferiores foram estabelecidos para cada peneira, a partir da multiplicação do *IQN* por 3, que é o equivalente a multiplicar por 3 desvios padrão na estatística clássica (PTA, 2006; 2008). Qualquer resultado reportado fora desses limites é classificado como um *outlier*. A Tabela 4.50 e os gráficos apresentados nas Figuras 4.65 e 4.66 apresentam a distribuição dos resultados reportados pelos nove laboratórios. A Figura 4.65 apresenta os resultados obtidos para as peneiras de maior abertura (12,5mm; 9,5mm; 4,76mm e 2,0mm), pois nestas passam os maiores percentuais de agregados. A Figura 4.66 apresenta os resultados obtidos para as peneiras de menor abertura (0,042mm; 0,18mm e 0,075mm), pois nestas passam percentuais de agregados menores. Para o tamanho de peneira de 19,1mm todos os laboratórios reportaram 100% passante, então nenhum limite foi estabelecido. Essa avaliação foi feita com base naquela efetuada para o programa interlaboratorial de agregados organizado pelo *Proficiency Testing Australia* (2006). Observa-se que apenas o Laboratório 1 obteve resultado insatisfatório com relação às peneiras de 0,18mm e de

0,075mm. Os demais se enquadraram nos limites estabelecidos na análise estatística e nos limites da Faixa C do DNIT para CA.

Tabela 4.50. Análise das curvas granulométricas de projeto dos nove laboratórios

Código Laboratório	Peneiras (mm)							
	19,1	12,5	9,5	4,76	2	0,42	0,18	0,075
	Porcentagem Passante (%)							
1	99,9	89,2	82,7	45,3	23,7	9,4	2,8	0,6
2	100,0	88,7	82,7	52,3	30,5	14,8	6,7	2,9
3	100,0	88,2	82,3	52,3	31,8	15,7	8,6	4,0
4	100,0	87,0	82,0	45,0	27,0	12,0	5,0	2,0
5	100,0	89,4	84,2	51,2	27,0	12,2	6,7	2,7
6	100,0	89,0	82,4	53,4	23,5	13,0	7,4	3,9
7	99,8	87,7	82,0	57,5	28,0	12,7	6,6	2,8
8	100,0	89,3	83,0	51,8	27,0	12,6	6,5	2,8
9	100,0	88,0	82,0	48,0	24,0	11,0	6,0	2,0
Nº de resultados	9	9	9	9	9	9	9	9
Mediana	100,0	88,7	82,4	51,8	27,0	12,6	6,6	2,8
<i>IQN</i>	0,0	0,9	0,5	3,2	3,0	0,7	0,5	0,7
<i>IQN</i>×3	0,07	2,65	1,60	9,56	8,98	2,20	1,56	2,00
Limite Superior	100,0	91,3	84,0	61,4	36,0	14,8	8,1	4,8
Limite Inferior	99,9	86,1	80,8	42,3	18,0	10,4	5,0	0,8

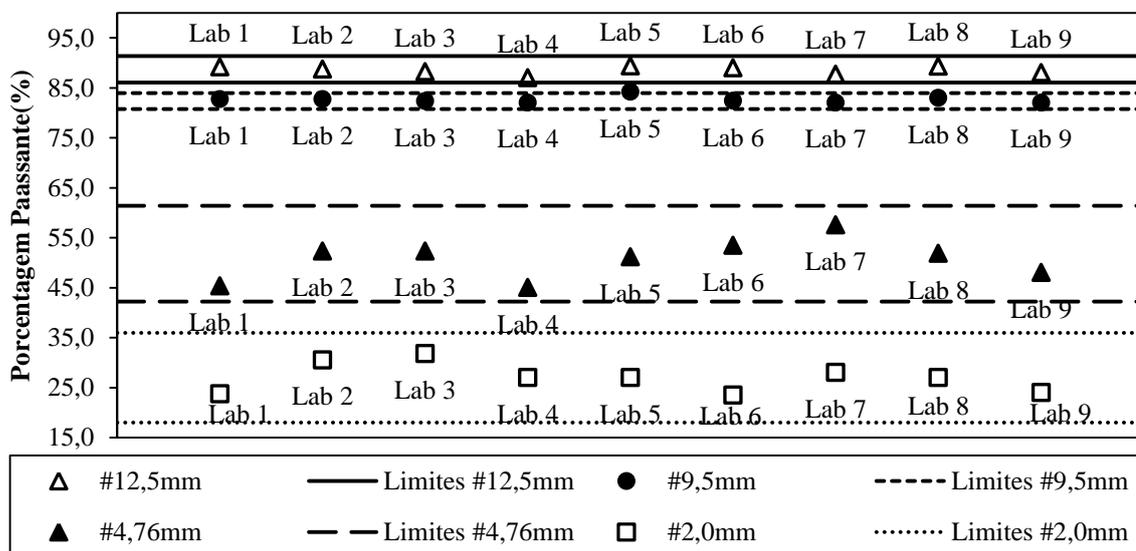


Figura 4.65. Análise granulométrica peneiras: 12,5mm; 9,5mm; 4,76mm e 2,0mm

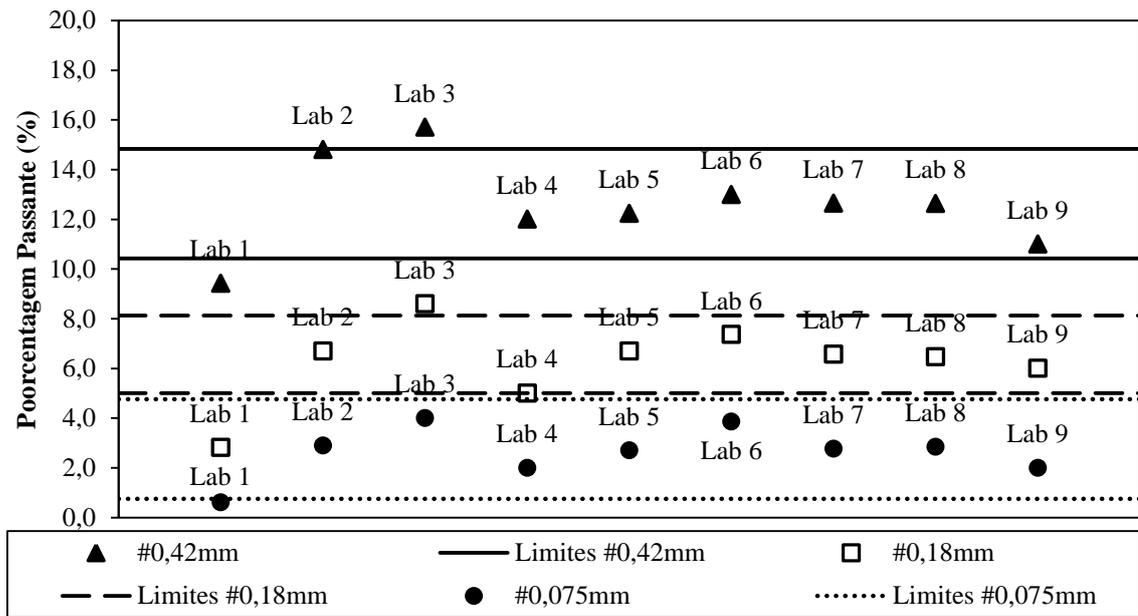


Figura 4.66. Análise granulométrica peneiras: 0,42mm; 0,18mm; e 0,075mm

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A partir do programa interlaboratorial executado foi possível avaliar o desempenho dos nove laboratórios que integram a REDE ASFALTO N/NE. Foram ensaiadas amostras de agregados graníticos e realizadas dosagens de misturas asfálticas utilizando a metodologia Marshall. Os resultados foram avaliados por meio das ferramentas estatísticas elipse de confiança (utilizando conceitos de estatística clássica e robusta), z-score, testes de *Dixon* e de *Cochran*.

As conclusões do trabalho são apresentadas a seguir, tendo sido divididas em conclusões principais e secundárias, de modo a se buscar pontuar aquilo que se acredita ser as maiores contribuições da presente dissertação. Ao final do capítulo, apresenta-se ainda uma seção de Sugestões para Futuras Pesquisas, que traz as ações que por razões diversas não foram executadas neste momento do trabalho. Espera-se que estas sugestões possam ser úteis aos futuros trabalhos da própria REDE ASFALTO N/NE e particularmente à REDE TEMÁTICA DE ASFALTO da Petrobras em curso, que também deverá conduzir um programa interlaboratorial, de âmbito nacional.

5.1. Conclusões Principais

De um modo geral, observou-se a predominância de erros sistemáticos nos resultados dos ensaios investigados, que podem ter sido originados a partir de diferentes maneiras de interpretação das normas técnicas ou, ainda, de equipamentos não calibrados. Verificou-se, dessa maneira, a necessidade de calibração de alguns equipamentos bem como do treinamento de alguns dos operadores dos ensaios. Com relação à interpretação das normas, constatou-se que houve falha no entendimento de algumas delas, levando o laboratório a não realizar os ensaios de maneira adequada. Acredita-se que as normas que mais levaram a erros são as seguintes: absorção do agregado graúdo, índice de forma e compactação de misturas asfálticas.

O desempenho dos laboratórios com relação aos resultados dos ensaios dentro das categorias “questionável” e “insatisfatório” foi efetuado por meio do z-score robusto. Este parâmetro corresponde a quantos *IQNs* (valor equivalente ao desvio

padrão) existem entre os resultados obtidos pelos laboratórios e o correspondente valor de referência (neste caso, obtido a partir da mediana do conjunto de dados).

A ferramenta estatística denominada Elipse de Confiança Aceitável, que tem como base conceitos de estatística robusta, detectou mais valores dispersos quando comparada ao método do z-score robusto. Este método da elipse especifica os laboratórios considerados dispersos e fornece comentários quanto ao tipo de erro eventualmente cometido (caráter sistemático e/ou aleatório).

Foram observadas divergências entre as análises da elipse e o método do z-score, principalmente quando o grupo de resultados tem Coeficiente de Variação (CV) elevado. Os ensaios de absorção das britas 3/4'' e 3/8'' e de índice de forma foram os que apresentaram maior variação (CV igual a 72 e 66%, respectivamente). A técnica do z-score não detectou valores dispersos para os dois primeiros ensaios, enquanto que a da elipse considerou nove e oito laboratórios com desempenhos insatisfatórios, respectivamente para os dois primeiros ensaios. No ensaio de índice de forma, a elipse considerou oito laboratórios com desempenhos insatisfatórios e o z-score considerou apenas três, sendo dois questionáveis e um insatisfatório. Para casos onde a variação entre os resultados é mais baixa ($CV < 13\%$), observou-se maior convergência entre as análises z-score e Elipse de Confiança Aceitável, sendo aquele ainda mais sensível do que esta.

Neste trabalho, foram efetuados os testes de normalidade de *Kolmogorov-Smirnov* e de *Shapiro-Wilk* em cinco conjunto de dados, referentes aos ensaios de densidade real dos agregados graúdo e miúdo, densidade aparente do agregado graúdo, absorção do agregado graúdo, densidade aparente e Volume de vazios (Vv) de CPs. Foi considerado um grau de confiança de 95%. Observou-se divergência entre os dois testes de normalidade para cinco dos seis ensaios avaliados. Concluiu-se que, para os dois métodos, deve-se rejeitar a hipótese de normalidade para o conjunto de dados dos ensaios de: (i) densidade real do agregado graúdo e (i) densidade real do agregado miúdo. Constata-se ainda que, para os dois métodos, não se deve rejeitar a hipótese de normalidade para o conjunto de dados dos ensaios de: (i) absorção do agregado graúdo; (ii) densidade aparente dos CPs e (iii) Vv dos CPs. A distribuição dos dados do ensaio

de densidade aparente do agregado graúdo foi considerada não normal pelo método de *Shapiro-Wilk* e normal pelo método de *Kolmogoroc-Smirnov*.

5.2. Conclusões Secundárias

Nesta seção são apresentadas as conclusões referentes a cada parâmetro investigado, indicando o desempenho dos laboratórios integrantes da REDE ASFALTO N/NE em cada caso.

Densidade aparente da brita 3/4”: os Laboratórios 1, 2 e 6 apresentaram desempenhos insatisfatórios. O Laboratório 1 repetiu o procedimento e permaneceu com desempenho insatisfatório. O Laboratório 2 também repetiu, e passou a ter desempenho satisfatório. O Laboratório 6 não enviou os novos resultados, permanecendo com desempenho insatisfatório ($CV_{ANTES} = 13\%$ e $CV_{DEPOIS} = 1\%$).

Densidade aparente da brita 3/8”: os Laboratórios 1 e 2 apresentaram desempenhos insatisfatórios. Os dois laboratórios repetiram os procedimentos e passaram a ter desempenhos satisfatórios. O Laboratório 6 passou a ficar com desempenho questionável após a repetição dos ensaios pelos Laboratorios 1 e 2 ($CV_{ANTES} = 12\%$ e $CV_{DEPOIS} = 1\%$).

Densidade real da brita 3/4”: os Laboratórios 1 e 2 apresentaram desempenhos insatisfatório e questionável, respectivamente. Ambos repetiram os procedimentos e passaram a ter desempenhos satisfatórios. Porém, os Laboratórios 5 e 7 passaram a assumir desempenhos questionáveis ($CV_{ANTES} = 2\%$ e $CV_{DEPOIS} = 0\%$).

Densidade real da brita 3/8”: os Laboratórios 1 e 2 apresentaram desempenhos insatisfatórios. Ambos repetiram os resultados e todos os laboratórios se comportaram satisfatoriamente ($CV_{ANTES} = 3\%$ e $CV_{DEPOIS} = 1\%$).

Absorção da brita 3/4”: nenhum laboratório foi considerado com desempenho insatisfatório pela técnica do z-score. Porém os Laboratórios 1, 2 e 6 fizeram novos ensaios e os Laboratórios 1, 5 e 7 passaram a assumir desempenhos insatisfatórios ($CV_{ANTES} = 71\%$ e $CV_{DEPOIS} = 50\%$).

Absorção da brita 3/8'': nenhum laboratório foi considerado com desempenho insatisfatório pela técnica do z-score. Mesmo com a repetição dos ensaios pelos Laboratórios 1 e 2, todos os laboratórios continuaram com desempenhos satisfatórios ($CV_{ANTES} = 41\%$ e $CV_{DEPOIS} = 37\%$).

Abrasão Los Angeles: os Laboratórios 2, 5 e 7 obtiveram desempenhos insatisfatórios. O Laboratório 2 não repetiu o ensaio devido ao desgaste excessivo das esferas para o ensaio, permanecendo com desempenho insatisfatório. O Laboratório 5 repetiu o ensaio, mas continuou com desempenho insatisfatório e o Laboratório 7 repetiu e passou a ter desempenho satisfatório. Este ensaio não foi efetuado no Laboratório 9 por falta de equipamentos ($CV_{ANTES} = 8\%$ e $CV_{DEPOIS} = 8\%$).

Índice de forma: os Laboratórios 1, 6 e 8 foram considerados com desempenhos insatisfatórios ou questionáveis pelo z-score. A elipse de confiança considerou somente o Laboratório 2 com desempenho satisfatório. Dessa maneira, os Laboratórios 1, 3, 4 e 6 realizaram novos ensaios e os Laboratórios 6, 7 e 8 passaram a ter desempenhos insatisfatórios ou questionáveis pelo método do z-score. Não foi possível incluir todos os novos resultados no traçado da elipse de confiança aceitável, somente na elipse tradicional ($CV_{ANTES} = 66\%$ e $CV_{DEPOIS} = 48\%$).

Densidade real do agregado miúdo: os Laboratórios 7 e 8 apresentaram desempenhos insatisfatórios. Em seguida, repetiram seus ensaios e passaram a assumir desempenhos satisfatórios. Por conta deste erro, estes laboratórios tiveram que corrigir os resultados de dosagem Marshall, pois os erros de densidade real influenciaram a determinação das DMT's dos diversos teores testados e, por conseguinte, os demais parâmetros volumétricos e o teor ótimo de ligante selecionado ($CV_{ANTES} = 3\%$ e $CV_{DEPOIS} = 1\%$).

Equivalente de areia: os Laboratórios 2, 3 e 6 apresentaram desempenhos insatisfatórios pelo método da Elipse de Confiança Aceitável. Somente os Laboratórios 2 e 6 enviaram novos resultados. Finalmente, os Laboratórios 3 e 6 permaneceram com desempenhos insatisfatórios. O Laboratório 9 não efetuou este ensaio por falta de equipamentos ($CV_{ANTES} = 6\%$ e $CV_{DEPOIS} = 6\%$).

Observou-se que o teor ótimo de ligante determinado a partir da metodologia Marshall variou entre 4,5% e 8,0% para uma mesma mistura testada em diferentes laboratórios. A partir de investigações junto a cada instituição, verificou-se que os erros cometidos são devidos, principalmente, a: (i) erros na determinação da densidade real dos agregados, (ii) falhas no controle de temperatura, (iii) problemas no sistema de pesagem hidrostática das amostras, (iv) erros de cálculo na determinação dos parâmetros volumétricos (DMT, V_v e RBV), dentre outros. O programa interlaboratorial de dosagem Marshall de misturas asfálticas realizado pelo *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux* (RILEM) verificou uma variação entre 5,4% e 6,8% na determinação do teor ótimo (Bernucci *et al.*, 2007).

Os Laboratórios 2 e 7 realizaram novas dosagens e obtiveram novos teores de ligante (6,5 e 6,9%, respectivamente). O primeiro corrigiu erros de cálculo e de pesagem, enquanto o segundo substituiu o sistema de pesagem hidrostática. O Laboratório 8 corrigiu seus cálculos para a determinação da DMT e obteve um novo teor ótimo de ligante (5,7%). A média e o CV do teor ótimo de ligante passaram de 6,0% e 18% para 6,0% e 11%, respectivamente, após a correção dos resultados de três laboratórios, ficando pendente a correção dos resultados do Laboratório 2 que não foi efetuada por falta de pessoal.

Os laboratórios que obtiveram $z < -3$ na caracterização de pelo menos um dos agregados (brita ¾", brita 3/8" ou pó-de-pedra), com relação à densidade real, apresentaram os menores teores de ligante (Laboratório 1 com 4,5% e Laboratório 7 com 4,9%). Enquanto que o laboratório que obteve $z > 3$ obteve também o maior teor ótimo de ligante (Laboratório 8 com 8,0%).

Suspeita-se que os laboratórios que cometeram erros de compactação persistiram no erro na dosagem e que o V_v dos CPs da dosagem Marshall esteja abaixo do que deveria ser (Laboratórios 5, 6 e 9). Os laboratórios que compactaram as amostras de mistura asfáltica solta abaixo da temperatura especificada produziram CPs com V_v 's mais elevados.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam a situação dos laboratórios com relação à caracterização dos agregados antes e após o programa interlaboratorial. Para alguns ensaios, a quantidade de laboratórios com desempenho satisfatório aumentou e, para

outros ensaios, esta quantidade foi reduzida ou permaneceu inalterada. Neste programa, não existe um valor fixo de referência tido como verdadeiro para a análise dos resultados dos ensaios. Aqui, o valor de referência é calculado a partir da mediana dos valores obtidos pelos laboratórios participantes. Dessa maneira, a cada vez que um laboratório corrige seus resultados, um novo cálculo é efetuado e uma nova classificação é dada a todos os laboratórios participantes (satisfatória ou insatisfatória).

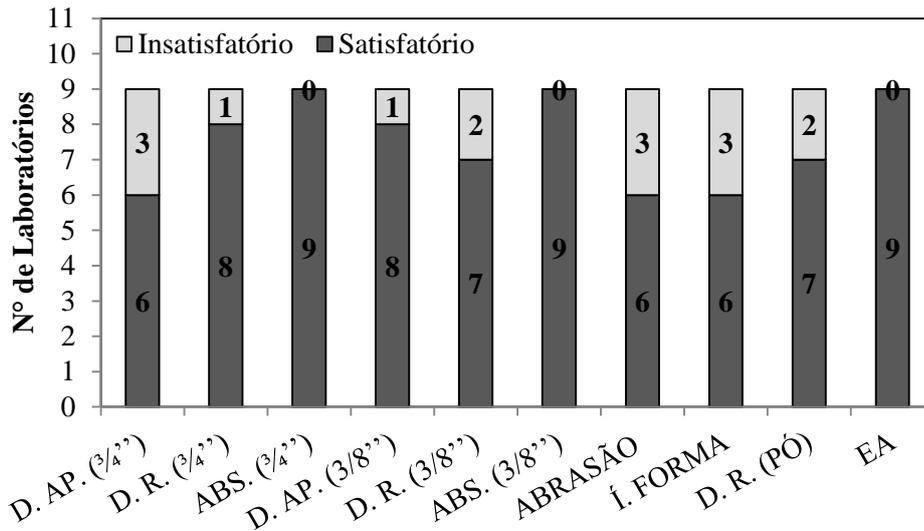


Figura 5.1. Situação do grupo de laboratórios antes do programa interlaboratorial

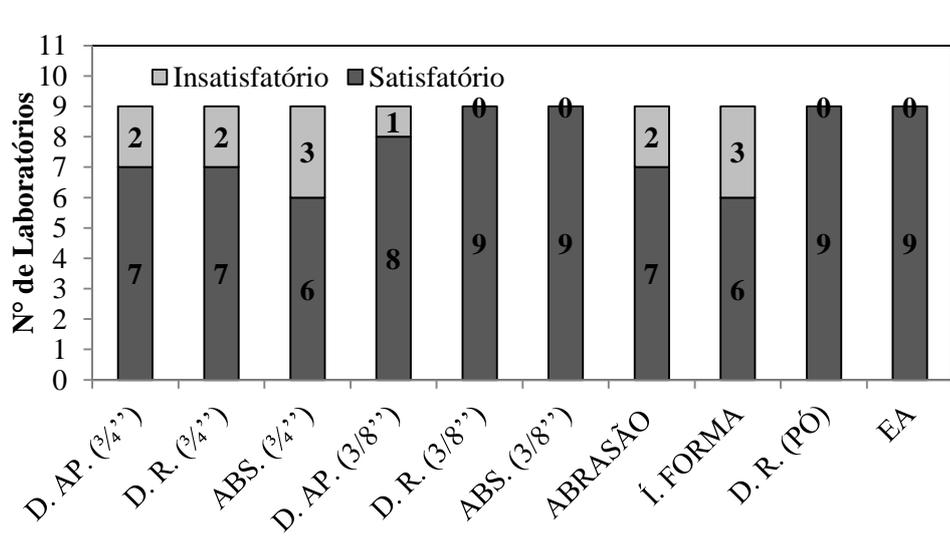


Figura 5.2. Situação do grupo de laboratórios depois do programa interlaboratorial

O programa interlaboratorial possibilitou o diagnóstico da situação dos laboratórios com relação à caracterização de agregados e dosagem de misturas asfálticas. Além disso, promoveu a capacitação dos laboratórios e dos seus técnicos para a realização de ensaios com confiabilidade e credibilidade, além da promoção de uma

maior integração entre os grupos envolvidos contribuindo para a consolidação da REDE ASFALTO N/NE.

5.3. Sugestões para Futuras Pesquisas

No futuro, considerando que os procedimentos foram uniformizados, sugere-se uma terceira etapa do programa interlaboratorial da REDE ASFALTO N/NE. Cada universidade deve efetuar duas dosagens Marshall utilizando dois tipos de agregados locais (natural e rejeito). Em seguida, os resultados destes procedimentos, juntamente com amostras de tais agregados, devem ser enviados ao laboratório coordenador (no caso, LMP/UFC) para que sejam moldados CPs com teor de ótimo de ligante para análise do comportamento mecânico das misturas asfálticas. Os ensaios mecânicos selecionados seriam os de módulo de resiliência, resistência à tração estática, vida de fadiga e *creep* dinâmico. Finalmente, seria construído um banco de dados contendo o mapeamento dos principais agregados e características das misturas asfálticas das regiões N/NE do Brasil.

Para um novo programa interlaboratorial da REDE ASFALTO N/NE, com o objetivo de verificar a compatibilidade entre os resultados, recomenda-se que a preparação das amostras de agregado seja efetuada de maneira diferente, a fim de diminuir as possibilidades de erro. O laboratório coordenador deve preparar as amostras, de modo que os agregados estejam prontos para serem ensaiados dentro de sacos plásticos. Além disso, deve-se enviar, no mínimo, seis amostras para cada ensaio, de modo a facilitar a repetição de ensaios com resultados dispersos e também para facilitar as análises estatísticas utilizando-se outros métodos que exigem quantidades maiores de amostras.

Deve-se proceder a avaliação dos resultados após uma análise descritiva dos mesmos, de modo a verificar a dispersão dos valores. Não se deve escolher o método do z-score em detrimento da elipse de confiança e vice-versa. Os métodos devem ser utilizados em conjunto, para evitar a aprovação de resultados que sejam insatisfatórios. É fundamental que seja utilizado o método da Elipse de Confiança Aceitável, com as ferramentas de estatística robusta, em detrimento do método tradicional, pois aquela é mais precisa, principalmente quando a dispersão dos resultados é elevada.

Deve-se estabelecer prazos rigorosos para a entrega dos resultados pelos laboratórios e, antes do início do programa, ter domínio de todas as ferramentas estatísticas que serão utilizadas na análise. Isso pode facilitar a avaliação dos resultados e acelerar a cobrança de repetição dos resultados. Além disso, acredita-se que pode haver variação de resultados se os ensaios forem efetuados com intervalos de tempo muito grande. Deve-se sugerir que os laboratórios relatem as fontes dos seus erros quando houver avaliação da primeira rodada de ensaios.

Outras Sugestões:

- Caracterização mecânica dos CPs que foram enviados pelas universidades ao LMP/UFC;
- Repetir as análises eliminando os valores considerados dispersos nos testes estatísticos e verificar os valores dispersos após a repetição dos ensaios;
- Analisar valores dispersos para o ensaio de granulometria;
- Analisar a normalidade da distribuição para todos os resultados, incluindo os resultados dos outros laboratórios;
- Repetir as análises estatísticas, considerando a distribuição normal ou não;
- Realizar análise de sensibilidade para a determinação de critérios;
- Analisar previamente a normalidade da distribuição dos resultados dos diversos ensaios;
- Credenciar o laboratório coordenador em um Programa Interlaboratorial internacional, de forma a ser possível utilizar a média (estatística clássica) como valor de referência;
- Dosar as misturas asfálticas utilizando a metodologia Superpave.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A2LA, (2009) The American Association for Laboratory Accreditation. Disponível em: <www.a2la.org>
Acessado em: 28/09/2009.
- AATCC (2010) A Summary of ASTM Methods for Interlaboratory Testing. AATCC Technical Manual/2010. Developed in 1992 by AATCC Committee RA102.
- AASHTO T 84 (1991) – Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.
- AASHTO T 85 (1991) Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO.
- ABNT ISO/IEC GUIA 43-1 (1999) – Ensaios de Proficiência por Comparações Interlaboratoriais – Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Brasil.
- ABNT NBR 12891 (1993) Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR ME 7809 (2006) Agregados graúdos – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Norma Brasileira – Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 51 (2001) Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 52 (2003) Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 53 (2009) Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT.
- ANP (2005) Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. Regulamento técnico Nº 3/2005. Agência Nacional do Petróleo.
- ASTM C 127 (2007) Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. American Society for Testing and Material.
- ASTM C 128 (2004) Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates. American Society for Testing and Material.
- ASTM C 131 (1996) Standard Test Methods for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. American Society for Testing and Material.
- ASTM C 136 (2006) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- ASTM C 535 (2009) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- ASTM C 702 - 98(2003) Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. American Society for Testing and Materials, ASTM.

- ASTM D 1754 (1997) Standard Test Method for Effect for Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 2419 (2002) Standard Test Methods for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. American Society for Testing and Material.
- ASTM D 2872 (2004) Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test),
- ASTM D 4402 (2006) Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- ASTM D 4791 (1999) Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 5821 (1995) Standard Test Methods for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. American Society for Testing and Material.
- ASTM E 691(2009) Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method. American Society for Testing and Material.
- AZEVEDO, R. A.; CARREIRA, W., PEREIRA, G. H. A.; IMBROISI, C. P. (2004) Programa Interlaboratorial de Lubrificantes (PIL) do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). Bol. téc. Petrobras, Rio de Janeiro, 47 (2/4): 266 – 274.
- BARTHEN, R. e BERTULANI, C. (2009) Vocabulário de Metrologia Legal. Projeto Ensino de Física a Distância. Instituto de Física – Universidade Federal do Rio de Janeiro (IF/UFRJ). Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/metro/metro.html>>. Acessado em 21/07/2009.
- BERNUCCI, L. L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. (2007) – Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro.
- CHUI, Q. S. H.; BISPO, J. M. A. e IAMASHITA, C. O. (2004) O Papel dos Programas Interlaboratoriais para a Qualidade dos Resultados Analíticos. Química Nova, v. 27, n. 6, p. 993-1003.
- CIRILLO, M. A.; FERREIRA, D. F. (2003) Extensão do Teste para Normalidade Univariado Baseado no Coeficiente de Correlação Quantil-Quantil para o Caso Multivariado. Rev. Mat. Estat., São Paulo, v. 21, n.3, p.67-84.
- CNT (2009) Pesquisa Rodoviária CNT 2009. Relatório Gerencial, Confederação Nacional do Transporte, Pesquisa Internet. Site: <http://www.cnt.org.br>. Acessado em 23/07/2010.
- CUNHA, M. B. (2004). Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- CURTIS, C. W. (1990) A Literature Review of Liquid Antistripping and Test for Measuring Stripping. Stripping – Relatório Técnico UIR-90-016, Strategic Highway Research Program (SHRP).
- DNER ES 313 (1997) Pavimentação – Concreto Betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER ME 053 (1994) Misturas Betuminosas – Percentagem de Betume. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER ME 079 (1994) Agregado – Adesividade a Ligante Betuminoso. Departamento Nacional de

- Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER ME 138 (1994) Misturas Betuminosas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER ME 194 (1998) Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 035 (1998) Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 043 (1995) Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 054 (1997) – Equivalente de Areia, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 078 (1994) – Adesividade a Ligante Betuminoso. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 081 (1998) Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 083 (1998) Agregados – Análise Granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 084 (1995) Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 086 (1994) – Agregado – Determinação do Índice de Forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 117 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação da Densidade Aparente. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 138. Misturas betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 194 (1998) Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregado Miúdos por meio do Frasco de Chapman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 195 (1997) Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-PRO 120 (1997) Coleta de Amostras de Agregados, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Procedimento, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-PRO 199 (1996) Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Procedimento, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNIT-ES 031 (2006) Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- EA (2009) European co-operation for Accreditation. Disponível em: <www.european-accreditation.org>. Acessado em: 28/07/09.
- FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V.; ZUPPOLINI NETO, A.; RIBEIRO, L. E. S.; MARQUES, J. C. E

- LIMA, D. C. (2001) Avaliação de 2 Anos de Programa Interlaboratorial de Asfalto. 33ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis, SC, Brasil.
- FORTES, R. M.; ZUPPOLINI NETO, A.; ASSALI, M. P.; BARBOSA JÚNIOR, A. S. (2004) Avaliação de Cinco Anos de Programa Interlaboratorial de Misturas Asfálticas Desenvolvido no Brasil. 35ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FREIRE, A. C.; ANTUNES, M. L.; REIS, S. (2009) Influência do Teor de Água na Determinação do Valor do Equivalente de Areia. XV Congresso Ibero Latino Americano de Asfalto – CILA. Lisboa Portugal.
- FRITZEN, M. A., MOTTA, L. M. G., FARIA, V., ALBA, V. (2008) Comparação de Resultados de Ensaio Mecânicos Obtidos em Corpos-de-Prova de Laboratório e Extraídos em Campo. 19º Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GOUVEIA, L. T. (2006) Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas. Tese de M.Sc., USP.
- GOUVEIA, L. T.; FURLAN, A. P.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES Jr., J. L.; FABBRI, G. T. P. (2004) Considerações Acerca da Absorção de Asfalto pelos Agregados e sua Influência na Suscetibilidade à Umidade. XVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, SC, Brasil.
- HUANG, S.C.; ROBERTSON, R.E.; BRANTHAVER, J.F. (2003) Physico-Chemical Characterization of Asphalt-Aggregate Interactions under the Influence of Freeze-Thaw Cycles, TRB Annual Meeting.
- INACIO, J. J.; ANDRADE, M. A. S.; GUERRA, E. A; CASTRO, C. H.; GUEDES, Q. M.; BITTENCOURT, R. M.; MARQUES, J. C.; RIBEIROS, L. E. S.; SALOMÉ, M. L.; OLIVIERI, J. C. (2003) Ensaio Interlaboratoriais com o Concreto. METROLOGIA-2003 – Metrologia para a Vida. Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM). Recife, PE, Brasil.
- INMETRO (2007) Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Ensaio de Proficiência para Análise de Composição de Mistura de Gases 4ª rodada – Gás Natural. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/pdf/ensaioProficiencia_Gases3.pdf>. Acessado em 01/08/2010.
- INMETRO (2009) Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Conheça o Inmetro. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/inmetro/oque.asp>>. Acessado em agosto de 01/08/2010.
- IPEA (2010) Rodovias Brasileiras: Gargalos, Investimentos, Concessões e Preocupações com o Futuro. Série – Eixo do Desenvolvimento Brasileiro. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Comunicados do IPEA – Nº 52. Disponível em: www.ipea.gov.br. Acessado em 01/08/2010.
- ISO 5725 (1986) Precision of test methods -- Determination of Repeatability and Reproducibility for a Standard Test Method by Inter-Laboratory Tests. International Organization for Standardization.
- ISO DIS 13528 (2002) Statistical Methods for Use in Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons. International Organization for Standardization.
- LENC (2010). Laboratório de Engenharia e Consultoria. Disponível no site: <<http://www.lenc.com.br>>. Acessado em 07/03/2010.

- LEOTTI, V. B., BIRCK A. R., RIBOLDI J. (2005) Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorovsmirnov, Anderson-Darling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). julho de 2005. Londrina, PR, Brasil.
- NATA (2009) National Association of Testing Authorities. Disponível em:<<http://www.nata.asn.au>>. Acessado em: 28/07/2009.
- NP EN 933-8 (2002) Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados. Parte 8: Determinação do Teor em Finos. Ensaio de Equivalente de Areia.
- OLIVIERI (2009) Consultoria em Qualidade e Confiabilidade Metrológica para Laboratórios. Programa Interlaboratorial Específico para Compatibilização de Resultados. Disponível em: <<http://jcOLIVIERI.sites.uol.com.br/>>. Acessado em: 02/08/2009.
- OLIVIERI, J. C. (2004) Programa Interlaboratorial: Proposta de Modelo para Interpretação de Resultados de Análises Químicas. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Comissão de Pós-Graduação em Qualidade.
- PARTL, M. N. e PIBER, H. (2002) RILEM - Interlaboratory Tests on Performance Prediction of Pavements. Proceedings of 9th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, 17-22. Copenhagen, Denmark.
- PTA (2006) Aggregates Round 4 WA, SA & NT - Proficiency Testing Program - Proficiency Testing Austrália. REPORT N°. 528
- PTA (2008) Guide to Proficiency Testing Australia. Proficiency Testing Australia. PO Box 7507 Silverwater NSW 2128 Austrália.
- SANAS (2009) The South African National Accreditation System. Disponível em: <<http://www.sanas.co.za>>. Acessado em: 28/07/09.
- SPSS (2008) SPSS Statistics 17.0 Command Syntax Reference. Chicago, IL: SPSS Inc.
- TRIOLA, M. F. Introdução à Estatística. 10ª Ed, Rio de Janeiro: Editora LTC.
- YOÜDEN W. J. (1959) Grafical Diagnosis of Interlaboratory Tests: Industrial Quality Control, p.24-28.

ANEXO

CARTAS E FORMULÁRIOS

CARTA DE ENVIO DOS MATERIAIS

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
Departamento de Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici, s/nº Bloco 703
CEP: 60455-760
Fortaleza, Ceará, Brasil

Professor _____
Universidade _____

Fortaleza, ____ de _____ de _____

Prezado Professor,

No âmbito da REDE ASFALTO N/NE, venho comunicar o envio do material destinado aos ensaios referentes ao Programa Interlaboratorial para caracterização de materiais aplicados a misturas asfálticas, previstos para serem realizados pela Universidade _____. Abaixo, segue uma descrição do material com as respectivas quantidades enviadas.

Descrição do material:

- 1) Pó-de-Pedra: 2 recipientes de plástico, somando 68kg de material;
- 2) Brita 3/8": 2 recipientes de plástico, somando 55kg de material;
- 3) Brita 3/4": 3 recipientes de plástico, somando 90kg de material;
- 4) Ligante - CAP 50/70: 1 recipiente de latão, contendo 19kg de material;
- 5) Planilhas para preenchimento com resultados dos ensaios e possíveis observações;
- 5) Normas Técnicas:
 - Análise Granulométrica (DNER-ME 083/98);
 - Densidade do Agregado Graúdo (DNER-ME 081/98);
 - Densidade do Agregado Miúdo (DNER-ME 084/95);
 - Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98);
 - Equivalente de Areia (DNER-ME 054/97);
 - Índice de Forma (ABNT NBR 7809/06);
 - Angularidade (ASTM C 1252/03);
 - Adesividade a Ligante Betuminoso (DNER-ME 078/94).

Queira, por favor, confirmar o recebimento destes materiais através do endereço citado acima, pelo telefone: (85) 3366.9488 Ramal: 243, pelo fax: (85) 33669488 Ramal: 240 ou ainda através do e-mail: mmlengenharia@gmail.com. Sem mais para o momento, me coloco a sua inteira disposição para quaisquer esclarecimentos.

Atenciosamente,

Manuela de Mesquita Lopes
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
Departamento de Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará
(85) 33669488

PROGRAMA INTERLABORATORIAL REDE ASFALTO NORTE NORDESTE (PC-02)

Formulário Agregado Graúdo

Prazo Final para Entrega desses Resultados: 13 de Março, 2008

Siga as instruções para ensaios que se encontram na página 3 deste formulário. Em caso de dúvidas, favor ligar para os números (85) 33669488 Ramal-249 ou (85) 88428217, ou enviar e-mail para mmlengenharia@gmail.com. Os resultados devem ser enviados para o e-mail citado anteriormente. O formulário abaixo deve ser preenchido com os resultados dos ensaios realizados.

BRITA ¾”:

Análise granulométrica: DNER-ME 083/98 – Usar massa mínima de 7kg de brita ¾”.	Amostra 1	Amostra 2
Total de material passante na peneira de 19,0mm (3/4”) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 12,5mm (1/2”) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 9,5mm (3/8”) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 4,75mm (n° 4) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 2,0mm (n° 10) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,42mm (n° 40) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,18mm (n° 80) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,075mm (n° 200) (com aproximação de 0,1%)		
Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo: DNER-ME 081/98		
Densidade Aparente (com aproximação de 0,001)		
Densidade Real (com aproximação de 0,001)		
Absorção (com aproximação de 0,01%)		
Determinação da Abrasão Los Angeles: DNER-ME 035/98		
Porcentagem perdida por abrasão e impacto, graduação B (com aproximação de 0,01%)		
Índice de Forma: ABNT NBR 7809: 2006		
Índice de Forma do Agregado		
Adesividade a Ligante Betuminoso: DNER-ME 078/94		
Satisfatório ou não satisfatório (anexar fotos do resultado)		

Brita 3/8”:

Análise granulométrica: DNER-ME 083/98 – Usar massa mínima de 5kg de brita ¾”.	Amostra 1	Amostra 2
Total de material passante na peneira de 19,0mm (3/4”) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 12,5mm (1/2”) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 9,5mm (3/8”) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 4,75mm (n° 4) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 2,0mm (n° 10) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,42mm (n° 40) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,18mm (n° 80) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,075mm (n° 200) (com aproximação de 0,1%)		
Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo: DNER-ME 081/98		
Densidade Aparente (com aproximação de 0,001)		
Densidade Real (com aproximação de 0,001)		
Absorção (com aproximação de 0,01%)		

Por favor, completar as informações abaixo com a identificação do seu laboratório.

Nome do Laboratório:		Código do Laboratório:	
Cidade, Estado:			
Ensaiado por:			
Telefone do Laboratório:			
Comentários:			

Instruções para Ensaios e Relatórios
Ensaios nas Amostras de Agregados Graúdos

Todos os ensaios devem ser feitos com 2 amostras semelhantes de acordo com a respectiva norma. Para garantir a precisão do operador, o mesmo operador deverá conduzir o teste nas 2 amostras. Não há necessidade de todos os ensaios serem desenvolvidos pela mesma pessoa. Por favor, usar a mesma série de peneiras para as 2 amostras. Reportar os resultados somente com determinação de cada ensaio, não usar a média de 2 ou mais resultados. Para cada ensaio não realizado, deixar o respectivo espaço em branco no formulário. Por favor, fotografar todos os passos dos ensaios.

Direcionamentos para os ensaios individuais. Realizar sempre em 2 amostras seguindo os passos descritos adiante:

Análise Granulométrica, DNER-ME 083/98: Homogeneizar as amostras e dividi-las em 2 porções iguais. Homogeneizar e reduzir as amostras de acordo com a norma DNER-PRO 120/97. Realizar o ensaio de granulometria em 2 amostras. Escrever os resultados (o total do material passante nas seguintes peneiras: 19,0mm; 12,5mm; 9,5mm; 4,75mm; 2,0mm; 0,42mm; 0,18mm e 0,075mm) com aproximação de 0,1%. Calcular as percentagens passantes com base na massa total da amostra seca inicial. Ao concluir o ensaio de granulometria, o material não deve ser descartado. Este deve ser reservado para posterior confecção dos corposdeprova.

Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo, DNER-ME 081/98: Secar as amostras a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e determinar a absorção e a densidade. Reportar esses resultados com aproximação de 0,001 unidades. Determinar a absorção e reportar os resultados com aproximação de 0,01%. Ao terminar o ensaio, reservar o material para confecção de Corpos de Prova.

Determinação da Abrasão Los Angeles, DNER-ME 035/98: Escolher a graduação B, utilizando 11 esferas de aço. Na determinação da massa perdida, lavar o material retido na peneira de 1,70mm (n°12) e secar a temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ até constância de massa. Reportar a porcentagem perdida pela abrasão e impacto com aproximação de 0,01%.

PROGRAMA INTERLABORATORIAL REDE ASFALTO NORTE NORDESTE (PC-02)

Formulários Agregado Miúdo

Prazo Final para Entrega desses Resultados: 08 de Maio, 2009

Siga as instruções para realização dos ensaios que se encontram na página 2 deste formulário. Em caso de dúvidas, favor ligar para os números (85) 33669488 Ramal-249 ou (85) 88428217, ou enviar e-mail para mmlengenharia@gmail.com. Este formulário preenchido com os resultados dos ensaios deve ser enviado para o e-mail citado anteriormente.

Pó-de-Pedra:

Análise granulométrica: DNER-ME 083/98 – Usar massa mínima de 1kg de Pó-de-Pedra.	Amostra 1	Amostra 2
Total de material passante na peneira de 4,75mm (n° 4) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 2,0mm (n° 10) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,42mm (n° 40) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,18mm (n° 80) (com aproximação de 0,1%)		
Total de material passante na peneira de 0,075mm (n° 200) (com aproximação de 0,1%)		
Determinação da Densidade Real – Agregado Miúdo: DNER-ME 084/95		
Densidade real (com aproximação de 0,001)		
Determinação da Densidade Real do filer: DNER-ME 085/94		
Densidade real (μ) (com aproximação de 0,001)		
Equivalente de Areia: DNER-ME 054/97		
<i>(Veja as instruções especiais para este ensaio)</i>		
Valor do Equivalente de areia – EA (número inteiro)		
Angularidade (Uncompacted Void Content of Fine Aggregatede): ASTM C1252		
Angularidade, ensaio #1 (com aproximação de 0,01%)		
Angularidade, ensaio #2 (com aproximação de 0,01%)		
Angularidade, média dos 2 ensaios (com aproximação de 0,01%)		

Por favor, completar as informações abaixo com a identificação do seu laboratório.

Nome do Laboratório:		Código do Laboratório:	
Cidade, Estado:			
Ensaio por:			
Telefone do Laboratório:			
Comentários			

Instruções para Ensaios e Relatórios

Ensaios nas Amostras de Agregados Miúdos

Todos os ensaios devem ser feitos com 2 amostras semelhantes de acordo com a respectiva norma. Para garantir a precisão do operador, o mesmo operador deverá conduzir o teste nas 2 amostras. Não há necessidade de todos os ensaios serem desenvolvidos pela mesma pessoa. Por favor, usar a mesma série de peneiras para as 2 amostras. Reportar os resultados somente com determinação de cada ensaio, não usar a média de 2 ou mais resultados. Para cada ensaio não realizado, deixar o respectivo espaço em branco no formulário. Por favor, fotografar todos os passos dos ensaios.

Direcionamentos para os ensaios individuais. Realizar sempre em 2 amostras seguindo as normas e os passos descritos adiante:

Análise Granulométrica, DNER-ME 083/98:

Homogeneizar as amostras e dividi-las em 2 porções iguais. Homogeneizar e reduzir as amostras de acordo com a norma DNER-PRO 120/97. Realizar o ensaio de granulometria em 2 amostras. Escrever os resultados (o total do material passante nas seguintes peneiras: 4,75mm, 2,0mm, 0,42mm, 0,18mm e 0,075mm) com aproximação de 0,1%. Calcular as percentagens passantes com base na massa total da amostra seca inicial. Ao concluir o ensaio de granulometria, o material não deve ser descartado. Este deve ser reservado para posterior confecção dos Corpos de Prova. **Usar a mesma série de peneiras para as 2 amostras.**

Determinação da Densidade Real – Agregado Miúdo: DNER-ME 084/95

Secar as amostras a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e determinar a densidade real. Reportar esses resultados com aproximação de 0,001. Ao terminar o ensaio, reservar o material para confecção de Corpos de Prova.

Determinação da Densidade Real do filer: DNER-ME 085/94

Utilizar o filer natural – material passante na peneira de 0,075mm (n° 200).

Determinação do Equivalente de Areia, DNER-ME 054/97:

Reportar a média de 3 leituras do equivalente de areia. **Instruções especiais: Após obter as amostras para o ensaio, secar cada amostra até constância de massa a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e esfriar a temperatura ambiente antes de ensaiar.** (O procedimento utilizando para amostras úmidas diminui os valores de equivalente de areia com relação ao obtido com amostras secas. Nós solicitamos aos laboratórios que sequem a amostra a ser ensaiada em estufa antes de colocá-la dentro do cilindro a fim de obter resultados mais consistentes para comparações entre laboratórios).

Angularidade - Uncompacted Void Content of Fine Aggregatede, ASTM C1252 - Method A

Utilizar o método A e realizar 2 ensaios em cada amostra. Calcular a angularidade para cada ensaio e reportar os resultados com aproximação de 0,01%. Calcular a média dos 2 ensaios de angularidade e reportar os resultados com aproximação de 0,01%.

PROGRAMA INTERLABORATORIAL REDE ASFALTO N/NE (PC-02)

Formulário Dosagem Marshall

Prazo Final para Entrega desses Resultados: 30 de Julho, 2009

Por favor, leia atentamente as instruções para realização dos ensaios que se encontram na página 2 deste formulário. Em caso de dúvidas, favor ligar para os números (85) 33669488 Ramal-249 ou (85) 88428217, ou enviar e-mail para Este formulário preenchido com os resultados dos ensaios deve ser enviado para o e-mail citado anteriormente.

Planilha de Resultados:

Teor de Ligante do Grupo 1 de CPs (%)				
Densidade Máxima Teórica – DMT (aproximação de 0,001)				
	CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIAS
Massa Seca – Ms (g)				
Massa Submersa – Ms _{sub} (g)				
Volume – V				
Densidade Aparente – G _{mb} (aproximação de 0,001)				
Volume de Vazios – V _v (aproximação de 0,01%)				
Vazios com Betume – VCB				
Vazios do Agregado Mineral – VAM				
Relação Betume / Vazios – RBV				
Média das Alturas (aproximação de 0,01)				
Média dos Diâmetros (aproximação de 0,01)				
Estabilidade (N)				
Fluência (mm)				
Teor de Ligante do Grupo 2 de CPs (%)				
Densidade Máxima Teórica – DMT (aproximação de 0,001)				
	CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIAS
Massa Seca – Ms (g)				
Massa Submersa – Ms _{sub} (g)				
Volume – V				
Densidade Aparente – G _{mb} (aproximação de 0,001)				
Volume de Vazios – V _v (aproximação de 0,01%)				
Vazios com Betume – VCB				
Vazios do Agregado Mineral – VAM				
Relação Betume / Vazios – RBV				
Média das Alturas (aproximação de 0,01)				
Média dos Diâmetros (aproximação de 0,01)				
Estabilidade (N)				
Fluência (mm)				
Teor de Ligante do Grupo 3 de CPs (%)				
Densidade Máxima Teórica – DMT (aproximação de 0,001)				
	CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIAS
Massa Seca – Ms (g)				
Massa Submersa – Ms _{sub} (g)				
Volume – V				
Densidade Aparente – G _{mb} (aproximação de 0,001)				
Volume de Vazios – V _v (aproximação de 0,01%)				
Vazios com Betume – VCB				

Vazios do Agregado Mineral – VAM				
Relação Betume / Vazios – RBV				
Média das Alturas (aproximação de 0,01)				
Média dos Diâmetros (aproximação de 0,01)				
Estabilidade (N)				
Fluência (mm)				
Teor de Ligante do Grupo 4 de CPs (%)				
Densidade Máxima Teórica – DMT (aproximação de 0,001)				
	CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIAS
Massa Seca – Ms (g)				
Massa Submersa – Ms _{sub} (g)				
Volume – V				
Densidade Aparente – G_{mb} (aproximação de 0,001)				
Volume de Vazios – Vv (aproximação de 0,01%)				
Vazios com Betume – VCB				
Vazios do Agregado Mineral – VAM				
Relação Betume / Vazios – RBV				
Média das Alturas (aproximação de 0,01)				
Média dos Diâmetros (aproximação de 0,01)				
Estabilidade (N)				
Fluência (mm)				
Teor de Ligante do Grupo 5 de CPs (%)				
Densidade Máxima Teórica – DMT (aproximação de 0,001)				
	CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIAS
Massa Seca – Ms (g)				
Massa Submersa – Ms _{sub} (g)				
Volume – V				
Densidade Aparente – G_{mb} (aproximação de 0,001)				
Volume de Vazios – Vv (aproximação de 0,01%)				
Vazios com Betume – VCB				
Vazios do Agregado Mineral – VAM				
Relação Betume / Vazios – RBV				
Média das Alturas (aproximação de 0,01)				
Média dos Diâmetros (aproximação de 0,01)				
Estabilidade (N)				
Fluência (mm)				
Teor de Projeto de Ligante (TEOR ÓTIMO) (%)				
Densidade Máxima Teórica – DMT (aproximação de 0,001)				
	CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIAS
Massa Seca – Ms (g)				
Massa Submersa – Ms _{sub} (g)				
Volume – V				
Densidade Aparente – G_{mb} (aproximação de 0,001)				
Volume de Vazios – Vv (aproximação de 0,01%)				
Vazios com Betume – VCB				
Vazios do Agregado Mineral – VAM				
Relação Betume / Vazios – RBV				
Média das Alturas (aproximação de 0,01)				

Média dos Diâmetros (aproximação de 0,01)				
Estabilidade (N)				
Fluência (mm)				

Por favor, completar as informações abaixo com a identificação do seu laboratório.

Nome do Laboratório:		Código do Laboratório:	
Cidade, Estado:			
Ensaiado por:			
Telefone do Laboratório:			
Comentários:			

Instruções para Ensaios e Relatórios

Dosagem pela metodologia Marshall – 75 golpes por face:

A faixa granulométrica a ser utilizada é a faixa C do DNIT para Concreto Asfáltico. Para a construção da curva de projeto, por favor, utilizar a média dos resultados dos ensaios de granulometria obtidos pelo seu laboratório e as proporções de agregados constantes na Tabela 1 (**20% de brita ¾”, 44% de brita 3/8” e 36% de Pó-de-Pedra**). Por favor, preencher a tabela abaixo com os resultados dos ensaios de granulometria dos agregados e com a curva de projeto encontrada.

Tabela 1: Faixa granulométrica e curva de projeto da mistura

Peneira de malha quadrada		Porcentagem, em massa, passando				
Série ASTM	Abertura (mm)	Brita ¾”	Brita 3/8”	Pó-de-Pedra	Curva de Projeto	Faixa C – DNIT
		20%	44%	36%		
¾”	19,1					100
1/2”	12,7					80-100
3/8”	9,5					70-90
Nº 4	4,8					44-72
Nº 10	2					22-50
Nº 40	0,42					8-26
Nº 80	0,18					4-16
Nº 200	0,075					2-10

Secar todos os agregados antes da pesagem a uma temperatura de 110°C. A pesagem dos agregados deve ser feita com aproximação de 0,1.

Por favor, aplicar 75 golpes por face e seguir os métodos de mistura e compactação estabelecidos na norma **DNER-ME 043/95**. Usar as temperaturas de mistura e de compactação constantes na Tabela 2:

Tabela 2: Temperaturas de trabalho

Temperatura de Mistura do CAP 50/70	160°C
Temperatura de Mistura dos agregados	175°C
Temperatura de Compactação	150°C

Adotar teores de asfalto para os diferentes grupos de Corpos de Prova (CPs) a serem moldados. Cada grupo deve ter, no mínimo, **3 CPs**. Estimar um teor de asfalto (T, em %) para o primeiro grupo de CPs. Os outros 4 grupos deverão ter teores de asfalto cima (T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (T-0,5% e T-1,0%). **Os CPs serão preparados conforme indica a Norma DNER-ME 043/95**. Após o resfriamento e a desmoldagem dos CPs, medir a altura e o diâmetro com o paquímetro em 4 posições opostas.

Densidade Máxima Teórica (DMT):

Determinar a DMT a partir da ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica. Usar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização de agregados do Interlaboratorial. Usar **G_a = 1,027** como densidade real do CAP 50/70.

Densidade Aparente (G_{mb}) – DNER-ME 117/94:

Deixar o CP esfriar à temperatura ambiente (25±5°C) e registrar sua massa seca, **P_{ar}**. Mergulhar o CP em água a 25±5°C durante 4±1 minuto e registrar a massa imersa, **P_i**.

Calcular o volume do CP por meio da expressão **V = P_{ar} / P_i**. Calcular a densidade aparente pela fórmula: **G_{mb} = P_{ar} / V**. Reportar a densidade aparente com aproximação de 0,001.

Volume de Vazios (V_v) – ABNT NBR 12891-93:

Calcular o volume de vazios de cada CP, de acordo com a seguinte fórmula:

V_v = (1 - (G_{mb}/DMT)) * 100, que pode ser encontrada no item 5.5.3 da norma ABNT NBR 12891-93.

Reportar a porcentagem de volume de vazios com aproximação de 0,01.

Vazios com Betume (VCB):

Calcular os vazios com betume por meio da expressão: $VCB = (G_{mb} * \%a) / G_a$. Onde (%a) é o teor de asfalto considerado e G_a é a densidade real do ligante (1,027).

Vazios do Agregado Mineral (VAM):

Calcular os vazios do agregado mineral de acordo com a fórmula: $VAM = Vv + VCB$.

Relação Betume/Vazios (RBV):

$$RBV = VCB / VAM$$

Estabilidade e Fluência Marshall (DNER-ME 043/95):

Determinar a Estabilidade e a Fluência Marshall dos CPs a partir das diretrizes da norma DNER-ME 043/95: “Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall”.

Gráfico Teor de Asfalto versus Vv e RBV:

Determinar o Vv e o RBV dos CPs de forma a traçar um gráfico onde a abscissa é dada pelo percentual de CAP, a ordenada y1 pelo Vv e a ordenada y2 pelo RBV, conforme ilustrado na Figura 1. O teor de projeto de ligante (TP) é dado pela média dos 2 valores centrais de CAP $(X2 + X3)/2$, obtidos pelas retas verticais provenientes das especificações de Vv e RBV. Os limites mínimos e máximos para a faixa C do DNIT são **3 e 5 para Vv e 75 e 82 para RBV**.

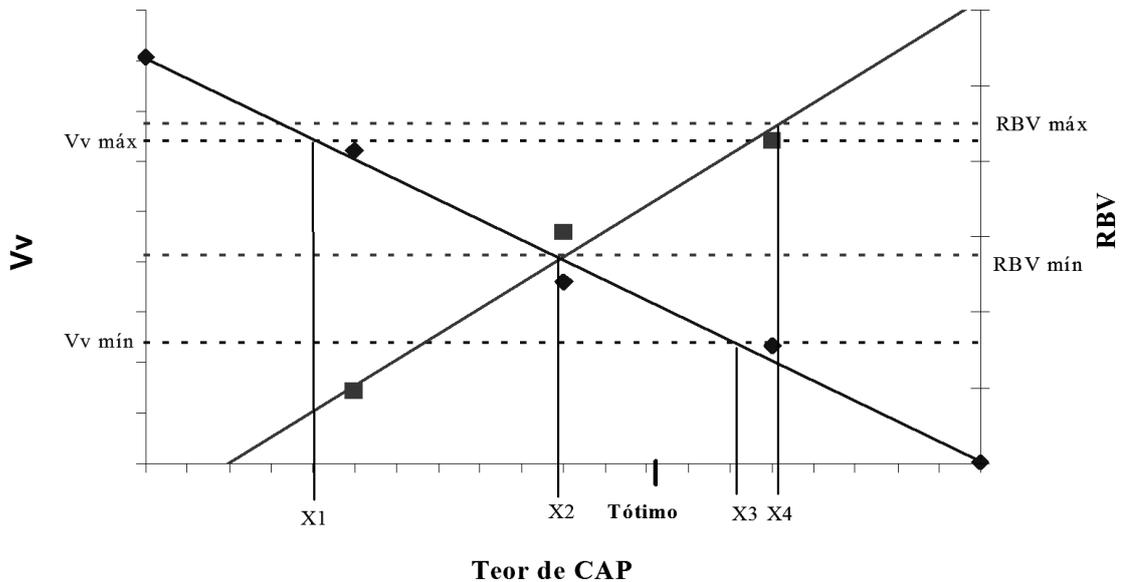


Figura 1. Teor de asfalto versus Vv e RBV

PROGRAMA INTERLABORATORIAL REDE ASFALTO N/NE (PC-02)

Formulário Compactação Marshall

Prazo Final para Entrega desses Resultados: 8 de Março, 2010

Por favor, leia atentamente as instruções para realização dos ensaios que se encontram na página 2 deste formulário. Em caso de dúvidas, favor ligar para os números (85) 33669488 Ramal-248 ou (85) 88428217, ou enviar e-mail para mmlengenharia@gmail.com. Este formulário preenchido com os resultados dos ensaios deve ser enviado para o e-mail citado anteriormente.

Planilha de Resultados:

Parâmetros	Corpos de Prova					
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	MÉDIA
Massa Seca – Ms (g)						
Massa Submersa – Ms _{sub} (g)						
Volume – V (cm ³)						
Densidade Aparente – G _{mb} (aproximação de 0,001)						
Média das Alturas (aproximação de 0,01)						
Média dos Diâmetros (aproximação de 0,01)						

Por favor, completar as informações abaixo com a identificação do seu laboratório.

Nome do Laboratório:		Código do Laboratório:	
Cidade, Estado:			
Ensaio por:			
Telefone do Laboratório:			
Comentários:			

Instruções para Ensaios e Relatórios

Compactação dos Corpos de Prova pela metodologia Marshall – 75 golpes por face:

A mistura asfáltica contida em cada saco plástico (Figuras 1 (a) e (b)) corresponde à quantidade suficiente para a compactação de um Corpo de Prova. Os procedimentos de mistura e compactação de cada Corpo de Prova devem seguir os seguintes critérios:

1. Destorroar a mistura asfáltica contida na embalagem de plástico e transferi-la para uma bandeja metálica limpa.
2. Manter a temperatura da estufa estável a 150°C (temperatura de compactação) e deixar estabilizar.
3. Inserir a bandeja, contendo a mistura asfáltica, dentro da estufa com temperatura estabilizada a 150°C e deixar aquecer durante 30 minutos.
4. Retirar a mistura da estufa e, com o uso de um termômetro, conferir se a temperatura da mesma é de 150°C.
5. Prosseguir com o procedimento de compactação (**75 GOLPES POR FACE**), observando atentamente as recomendações constantes no item 5.3 da norma **DNER-ME 043/95**.
6. Após a retirada do Corpo de Prova do molde, efetuar a retirada das bordas com uma espátula, conforme ilustrado na Figura 1(c).

Densidade Aparente (G_{mb}) – DNER-ME 117/94:

Deixar o Corpo de Prova esfriar à temperatura ambiente ($25\pm 5^\circ\text{C}$) e registrar sua massa seca, M_s . Mergulhar o Corpo de Prova em água a $25\pm 5^\circ\text{C}$ durante 4 ± 1 minuto e registrar a massa imersa, $M_{s_{sub}}$. Calcular o volume do Corpo de Prova por meio da expressão $V = M_s - M_{s_{sub}}$. Calcular a densidade aparente pela fórmula: $G_{mb} = M_s/V$. Reportar a densidade aparente com aproximação de 0,001.

Envio das Amostras ao LMP/UFC:

Após a determinação das densidades, por favor, encaminhar os 5 Corpos de Prova ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará. Os Corpos de Prova serão pesados novamente no LMP/UFC, a fim de conferir a calibração das balanças de cada laboratório. Antes do envio, os Corpos de Prova devem estar protegidos contra impactos em embalagens de **plástico-bolha**, conforme Figura 1(d).

;

Endereço para envio dos CPs: Professor Jorge Barbosa Soares. Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia de Transportes – Centro de Tecnologia – Bloco 703 – Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. Bairro Amadeu Furtado. Fortaleza – Ceará. CEP: 60455760.



Figuras 1. (a) e (b) mistura solta nas embalagens; (c) retirada das bordas dos Corpos de Prova; (d) plástico-bolha para proteção dos Corpos de Prova.