

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE QUALIDADE DE MISTURAS
ASFÁLTICAS E ANÁLISE DO REFLEXO DO NÍVEL DE
QUALIDADE NO DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS
ASFÁLTICOS

Matheus Lemos Nogueira

Porto Alegre
2011

MATHEUS LEMOS NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE QUALIDADE DE MISTURAS
ASFÁLTICAS E ANÁLISE DO REFLEXO DO NÍVEL DE
QUALIDADE NO DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS
ASFÁLTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia. Orientação: Prof. D.Sc. Jorge Augusto Pereira Ceratti. Co-orientação: Prof. Dr. Washington Peres Núñez

Porto Alegre

2011

CIP - Catalogação na Publicação

Nogueira, Matheus Lemos

Avaliação do controle de qualidade de misturas
asfálticas e análise do reflexo do nível de qualidade
no desempenho dos revestimentos asfálticos / Matheus
Lemos Nogueira. -- 2011.

86 f.

Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti.

Coorientador: Washington Peres Núñez.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2011.

1. controle de qualidade. 2. nível de qualidade.
3. misturas asfálticas. 4. desempenho. I. Ceratti,
Jorge Augusto Pereira, orient. II. Núñez, Washington
Peres, coorient. III. Título.

MATHEUS LEMOS NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE QUALIDADE DE MISTURAS
ASFÁLTICAS E ANÁLISE DO REFLEXO DO NÍVEL DE
QUALIDADE NO DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS
ASFÁLTICOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na área de Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelos professores orientador e co-orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 08 de junho de 2011.

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela COPPE/UFRJ
Orientador

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. em Engenharia Civil pelo PPGEC/UFRGS
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Liedi Légi Bariani Bernucci (USP)
Dra. em Engenharia de Transportes pela EPUSP

Prof. Luciano Pivoto Specht (UFSM)
Dr. em Engenharia Civil pelo PPGEC/UFRGS

Profa. Luciana Rohde (UNISINOS)
Dra. em Engenharia Civil pelo PPGEC/UFRGS

Dedico este trabalho à minha mãe, Marta, à minha avó,
Eva, e ao meu irmão, Bruno.

AGRADECIMENTOS

Uma dissertação é fruto de um trabalho exaustivo, apesar de muito gratificante. A presença de várias pessoas é fundamental para que tudo ocorra “tranquilamente”. Agradeço a todos que de alguma forma estiveram comigo ao longo deste caminho. Agradeço:

Ao professor Washington Peres Núñez, orientador desta dissertação, por ter acreditado no meu trabalho desde o começo. Não conto apenas com a sua orientação, mas também com a sua amizade.

Ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti, também orientador desta dissertação, pela confiança depositada desde o começo do trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que me proporcionaram uma formação de qualidade.

Aos engenheiros Lélío Brito e Fábio Hirsch, pela colaboração ao longo desta pesquisa e pela experiência profissional que estão me proporcionando.

Aos examinadores desta dissertação, professora Liedi Bernucci, professor Luciano Specht e professora Luciana Rohde, que enriqueceram este trabalho através de suas observações.

Aos colegas Camilo Andrés Muñoz Rodríguez, Eduardo Suliman Bueno, João Augusto Fraga Bonzanini e Marcelo Heidemann pelo companheirismo e pelo conhecimento compartilhado desde o começo do mestrado. Agradecimento especial vai para Gracieli Dienstmann que também foi minha colega de Cidade Baixa!

Ao time da pavimentação do LAPAV. Em especial à Luciana Rohde, que me recebeu no laboratório de pavimentação e sempre ouviu minhas dúvidas com muita paciência e atenção e ao João Rodrigo Mattos pelo companheirismo dos últimos tempos.

À CAPES e ao PPGEC/UFRGS pela bolsa de estudos que permitiu a minha dedicação exclusiva à pesquisa.

A todos os meus amigos que sempre estiveram comigo, mesmo nos períodos em que fiquei recluso me dedicando a esta dissertação. Obrigado por tudo! A amizade de vocês é muito importante para mim!

Agradeço a todos os meus familiares pelo incentivo constante que me dão. Meus avós, tios, tias, primo, primas, todos vocês são especiais para mim!

Agradeço especialmente à minha avó, Eva Izabel Figueredo Lemos, ao meu irmão, Bruno Lemos Nogueira, e à minha mãe, Lídia Marta Figueredo Lemos, que sempre foi um exemplo de integridade para mim. Muito obrigado pela existência de vocês!

“Não adies o momento do combate, nem esperes que tuas armas se enferrujem e o fio de tuas espadas se embote.”

Sun Tzu

RESUMO

NOGUEIRA, M. L. Avaliação do Controle de Qualidade de Misturas Asfálticas e Análise do Reflexo do Nível de Qualidade no Desempenho dos Revestimentos Asfálticos. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Controle de qualidade é a maneira de garantir que qualidade seja incorporada a um produto ou serviço. A variabilidade do processo de produção deve ser controlada, de modo que problemas sejam rapidamente identificados e tenham suas causas investigadas para que possam ser eliminados do processo. Para misturas asfálticas, devem ser verificados se os parâmetros de projeto de dosagem estão sendo respeitados, dentro de certos limites de tolerância, a fim de que o desempenho em campo seja satisfatório. O objetivo geral desta pesquisa é a aferição do nível de qualidade das características das misturas empregadas no revestimento asfáltico de uma importante rodovia no Estado do Rio Grande do Sul e avaliar o reflexo desta variabilidade no desempenho dos revestimentos. Para alcançar este objetivo, foi formado um banco de dados contendo as características medidas pelos empreiteiros durante o processo de produção de 12 misturas asfálticas diferentes. Optou-se por analisar somente as medidas que possam ser representativas do processo de execução. Neste trabalho, as características analisadas foram: porcentagens passantes nas peneiras # 3/8", # n4 e # n200 e o teor de ligante. Na análise da variabilidade foram buscados parâmetros estatísticos que descrevam o nível de qualidade destas características. Considerou-se a variabilidade do processo de produção e a capacidade dos empreiteiros de centrarem suas produções nos parâmetros de projeto das misturas. Concluiu-se que todas estão com nível de qualidade inferior ao especificado como aceitável, com exceção apenas da porcentagem passante na peneira # 3/8". O passo seguinte foi a avaliação do reflexo deste nível de qualidade no desempenho dos revestimentos asfálticos. Os parâmetros de desempenho avaliados foram o afundamento em trilhas de rodas e a porcentagem de área trincada. Para isso, foram realizadas análises de sensibilidade utilizando o *software* M-E PDG e variando as características de qualidade; optou-se por incluir o volume de vazios nesta análise devido a sua grande importância para o desempenho dos revestimentos asfálticos. Nesta análise, foram considerados os limites de tolerância especificados pelo DNIT e os limites de tolerância determinados neste trabalho. O desempenho do revestimento asfáltico considerado nesta análise se mostrou sensível às variações de todas as características de qualidade avaliadas, principalmente ao teor de ligante e ao volume de vazios.

Palavras-chave: controle de qualidade; nível de qualidade; misturas asfálticas; desempenho

ABSTRACT

NOGUEIRA, M. L. Avaliação do Controle de Qualidade de Misturas Asfálticas e Análise do Reflexo do Nível de Qualidade no Desempenho dos Revestimentos Asfálticos. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Quality control is a manner to ensure that quality is incorporated to a product or service. The variability of the production process must be controlled, such that problems are quickly identified and causes investigated so that they can be removed from the process. For asphalt mixtures issues, a check should be made to ensure that the target measures are being complied with, within certain limits of tolerance, so that the field performance is satisfactory. The objective of this research is the quality level measure of the quality characteristics of the mixtures used in the asphalt coating of a major highway in the Brazilian state of Rio Grande do Sul and to evaluate the effect of this variability in asphaltic concrete overlays performance. To achieve this goal, it was created a database containing the measures by the contractors during the process of producing 12 different asphalt mixtures. Only those measures that may be representative of the implementation process was analyzed, so that the characteristics measured in specimens molded in the laboratory have not been evaluated. In this study, the characteristics analyzed were: percent passing through sieves # 3/8", # n4 and # n200 and asphalt content. For variability analysis, statistical parameters were sought in order to describe the quality level of those characteristics. The variability of the production process and the ability of contractors to focus their production on design parameters of the mixtures were taken into account. It was concluded that they are all a level of quality below that specified as acceptable, except only the percent passing through sieve # 3/8". The next step was to evaluate the influence of this quality level in the performance of asphalt pavement. The performance parameters evaluated were rutting and the percentage of cracked area. For this purpose, sensibility analysis, using the M-E PDG software and varying the quality characteristics, were performed. For that analysis, the volume of voids was included, since it has a great importance for the performance for asphalt pavement. The tolerance limits specified by DNIT and the tolerance limits established in this work were also considered. The performance of the asphaltic concrete overlay considered in this analysis was proved to be sensitive to variations of all quality characteristics evaluated, mainly the asphalt content and air voids.

Key-words: asphalt mixtures; quality control; quality level; performance

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	15
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 CONTROLE DE QUALIDADE	21
2.2 PLANO DE CONTROLE DE QUALIDADE.....	22
2.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE	24
2.4 CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE.....	24
2.4.1 Distribuição granulométrica	25
2.4.2 Teor de ligante.....	27
2.4.3 Volume de vazios	29
2.5 VARIABILIDADE DAS MEDIDAS DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE.....	30
3. METODOLOGIA	33
3.1 FORMAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS	34
3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	37
3.2.1 Determinação da variabilidade do processo	37
3.2.2 Determinação da variabilidade da precisão	40
3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO	42
3.3.1 M-E PDG: Uma breve descrição.....	42
3.3.1.1 Ajustes no M-E PDG.....	43
3.3.2 Estrutura do pavimento considerada na análise de sensibilidade	45
4. ANÁLISE DOS DADOS	47
4.1 ANÁLISE DA VARIABILIDADE.....	47
4.1.1 Variabilidade do processo.....	47
4.1.1.1 Porcentagem passante na peneira # 3/8”	47
4.1.1.2 Porcentagem passante na peneira # n4	48

4.1.1.3	Porcentagem passante na peneira # n200	49
4.1.1.4	Teor de ligante.....	50
4.1.2	Variabilidade da precisão.....	52
4.1.2.1	Porcentagem passante na peneira # 3/8"	52
4.1.2.2	Porcentagem passante na peneira # n4	53
4.1.2.3	Porcentagem passante na peneira # n200	54
4.1.2.4	Teor de ligante.....	55
4.1.3	Variabilidades das características de qualidade	56
4.1.4	Comentários gerais a respeito da análise da variabilidade	59
4.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	59
4.2.1	Porcentagem passante na peneira # 3/8"	60
4.2.2	Porcentagem passante na peneira # n4	62
4.2.3	Porcentagem passante na peneira # n200	64
4.2.4	Teor de ligante.....	67
4.2.5	Volume de vazios	69
4.2.6	Comentários gerais a respeito da análise de sensibilidade.....	72
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1	CONCLUSÕES	74
5.2	SUGESTÕES	75
	APÊNDICE A – BANCO DE DADOS	79
	ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRONIZADA	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do processo de usinagem (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989)	22
Figura 2: Efeito do teor de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga (HARVEY <i>et al.</i> , 1995)	28
Figura 3: Durabilidade do revestimento asfáltico versus volume de vazios (IA, 1989).....	29
Figura 4: Fluxograma das etapas desta pesquisa.....	33
Figura 5: Estrutura do pavimento considerada nesta pesquisa (VICTORINO, 2008)	45
Figura 6: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # 3/8"	48
Figura 7: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n4.....	49
Figura 8: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n200...	50
Figura 9: Desvios padrões das medidas dos teores de ligante TL	51
Figura 10: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # 3/8"	52
Figura 11: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n4	53
Figura 12: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n200	54
Figura 13: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto dos teores de ligante	55
Figura 14: Característica de qualidade com 90% da população entre os limites especificados (Adaptado de Burati <i>et al.</i> , 2003)	57
Figura 15: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"	60
Figura 16: Evolução da TR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"	60
Figura 17: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"	61
Figura 18: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"	62
Figura 19: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n4.....	62
Figura 20: Evolução da TR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n4.....	63
Figura 21: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n4.....	64

Figura 22: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n4	64
Figura 23: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n200.....	65
Figura 24: Evolução da TR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n200.....	65
Figura 25: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n200.....	66
Figura 26: Diferenças percentuais entre os TR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n200.....	66
Figura 27: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos no teor de ligante	67
Figura 28: Evolução da TR, para a mistura com incrementos no teor de ligante.....	68
Figura 29: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos no teor de ligante.....	69
Figura 30: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos no teor de ligante.....	69
Figura 31: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos no volume de vazios.....	70
Figura 32: Evolução da TR, para a mistura com incrementos no volume de vazios.....	70
Figura 33: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos no volume de vazios	71
Figura 34: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos no volume de vazios	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variabilidade de características de qualidade em projetos rodoviários americanos Fonte: (DEACON <i>et al.</i> , 2001)	31
Tabela 2: Variabilidades de construções americanas	32
Tabela 3: Características de qualidade medidas no controle de qualidade e seus respectivos métodos de ensaio, de acordo com as normas DNER-ES 385/99 e DNIT 031/2006 - ES ...	35
Tabela 4: Parâmetros de projeto das características de qualidade analisadas na pesquisa	36
Tabela 5: Tamanho e desvio padrão de cada lote do Projeto 4, considerando o teor de ligante.....	38
Tabela 6: Tamanho total dos lotes e variabilidade do processo de cada projeto, considerando o teor de ligante.....	39
Tabela 7: Tamanho e médias aritméticas das medidas de teor de ligante de cada lote do Projeto 4.....	41
Tabela 8: Diferenças entre os valores de teor de ligante medidos para controle de qualidade e os teores ótimos nos projetos analisados	42
Tabela 9: Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela concessionária e pelo M-EPDG	43
Tabela 10: Distribuição horária do tráfego comercial	44
Tabela 11: Fatores mensais de ajuste de tráfego	44
Tabela 12: Parâmetros de projeto da mistura asfáltica escolhida para a análise de sensibilidade.....	46
Tabela 13: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # 3/8”..	47
Tabela 14: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n4....	48
Tabela 15: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n200	49
Tabela 16: Desvios padrões das medidas dos teores de ligante TL.....	50
Tabela 17: Variabilidades do processo das características de qualidade.....	51
Tabela 18: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # 3/8”	52
Tabela 19: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n4	53
Tabela 20: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n200	54
Tabela 21: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto dos teores de ligante	55
Tabela 22: Variabilidades da precisão	56
Tabela 23: Variabilidades das características de qualidade.....	56

Tabela 24: Limites de controle para as características de qualidade	58
Tabela 25: Porcentagem dentro dos limites de cada característica de qualidade	58
Tabela 26: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando a porcentagem passante na peneira # 3/8"	61
Tabela 27: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando a porcentagem passante na peneira # n4	63
Tabela 28: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando a porcentagem passante na peneira # n200	66
Tabela 29: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando o TL	68
Tabela 30: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando o V_v	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

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

ARTESP: Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo

ATR: afundamento em trilhas de roda

CNT: Confederação Nacional do Transporte

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

FHWA: *Federal Highway Administration*

G_a : densidade real do ligante

GC: grau de compactação

G_{mb} : massa específica aparente da mistura asfáltica

IA: Instituto de Asfalto

LAPAV: Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

k: quantidade de lotes no projeto

M-E PDG: *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*

n_i : quantidade de medidas da característica de qualidade para cada lote i

NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*

RBV: relação betume/vazios

$S_{PRECISÃO}$: variabilidade da precisão

S_{CQ} : variabilidade da característica de qualidade

$S_{PROCESSO}$: variabilidade do processo

s_i^2 : variância de cada lote do projeto

SPC: *statistical process control*

TL: teor de ligante

TR: porcentagem de área trincada

TRB: *Transportation Research Board*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VAM: vazios nos agregados minerais

VCB: vazios cheios com betume

V_v : vazios de ar na mistura asfáltica compactada; volume de vazios

\bar{x}_i : valor médio das medidas de determinada característica em cada lote

\bar{X}_i : média ponderada dos valores médios das medidas da característica qualidade

z: variável normal padronizada

1. INTRODUÇÃO

As primeiras estradas brasileiras, do modo como se conhece hoje, surgiram somente no século XIX devido à necessidade de escoamento de produtos e o crescimento do intercâmbio comercial entre localidades e regiões. A implantação da indústria automobilística, em meados do século passado, também foi um fator determinante para a consolidação do transporte rodoviário como o mais utilizado no país. A matriz de transporte no Brasil é predominantemente rodoviária, correspondendo a cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,8% da matriz de transporte de cargas (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2006).

Apesar da grande importância para o país, as estradas encontram-se atualmente em estado tal que não são capazes de atender às necessidades de transporte de cargas nacionais. Essa realidade torna o Brasil pouco competitivo no mercado exterior e cria uma situação econômica insustentável (BERNUCCI *et al.*, 2008a). Segundo o relatório da Pesquisa CNT de Rodovias 2010 (CNT, 2010), onde foram avaliados 90.945km de rodovias brasileiras, a situação da malha rodoviária no país é preocupante porque 56,1% dos trechos apresentaram defeitos na superfície do pavimento e necessitam de algum tipo de intervenção.

Com relação aos revestimentos asfálticos, tem-se observado o aparecimento precoce de diversas patologias que comprometem o seu desempenho. Bernucci *et al.* (2008b), por exemplo, relatam que tem-se observado o aparecimento prematuro da formação de trilhas de roda e exsudação em revestimentos asfálticos, principalmente na faixa onde trafegam os veículos comerciais, mesmo que a mistura tenha sido usinada dentro dos limites do teor ótimo de ligante do projeto da mistura. Outro exemplo é relatado em LAPAV (2008), onde foi analisada a qualidade de uma mistura asfáltica que apresentou problemas prematuros graves de bombeamento, trincamento e formação de painéis pouco tempo depois do revestimento ter sido executado.

A prática vem mostrando que tais problemas são cada vez mais frequentes nos revestimentos e é consenso na bibliografia consultada que a maneira mais eficaz de evitá-los é através de um controle eficiente das operações nas usinas e na compactação em campo. Para Balbo (2007), a grande mazela das obras rodoviárias no Brasil é a negligência e muitas vezes a ausência de controle tecnológico adequado. Incorreções na usinagem, deficiência na compactação e falta de controle de umidade e temperatura são alguns dos fatores que comprometem o desempenho do revestimento asfáltico cuja mistura foi dosada

para parâmetros característicos de projeto e deve ser usinada e compactada de tal forma que na pista sejam reproduzidas as características aferidas no laboratório. De acordo com Fortes e Merighi (2004), a aplicação deficiente ou não idônea do controle tecnológico e de qualidade é a causa principal dos insucessos na execução de obras de engenharia civil.

A qualidade do processo de construção é o fator determinante para o desempenho do pavimento quando sujeito à ação do tráfego e das condições climáticas (DEACON *et al.*, 2001). Harvey *et al.* (1995), após realizarem uma pesquisa que avalia a influência do teor de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga dos revestimentos, afirmam que a conclusão mais importante a qual chegaram foi quanto à importância do controle da construção.

As operações de usinagem e de compactação são controladas através de inspeções e de medidas de características das misturas que interferem no desempenho dos revestimentos asfálticos. Tais medidas são comparadas com valores especificados e verifica-se então a condição de conformidade ou não conformidade. Trata-se do controle estatístico das obras.

Porém, deve-se salientar que a importância do controle de qualidade não se restringe apenas à verificação da conformidade dos resultados de ensaios com as especificações vigentes. Devem ser englobadas também ações e considerações necessárias para que seja possível ajustar o processo de construção de tal maneira que seja controlado o nível de qualidade em todas as etapas da execução do serviço (FORTES *et al.*, 2005).

A principal premissa deste trabalho é conhecer o nível de qualidade no qual as misturas asfálticas estão sendo produzidas atualmente, através de um estudo de caso. Contudo, não há quantidade suficiente de dados desta natureza publicados para que tal aferição seja feita, evidenciando assim a importância da formação de um banco de dados contendo as medidas das características de qualidade destas misturas. Esse banco deve ser continuamente alimentado, visto que parte-se do princípio de que o nível de qualidade é afetado pelo constante avanço tecnológico na indústria, onde os materiais, equipamentos e técnicas construtivas estão sempre sendo aprimorados.

Outra questão importante do assunto abordado é o reflexo das variações nas características de qualidade no desempenho dos revestimentos asfálticos. Como já foi dito, muitas vezes, mesmo que tais características estejam dentro dos limites especificados, o desempenho dos revestimentos é prejudicado, de forma que é comum o aparecimento precoce de patologias, tais como afundamento em trilhas de roda, trincamento, exsudação, dentre outros.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal desta pesquisa é a identificação do nível de qualidade das características das misturas asfálticas medidas para o controle de qualidade da produção e a análise do reflexo da variabilidade destas características no desempenho dos revestimentos asfálticos de uma rodovia no Estado do Rio Grande do Sul.

Para que este objetivo fosse alcançado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) formação de um banco de dados contendo medidas das características de qualidade utilizadas para o controle da produção de misturas asfálticas;
- b) análise das variabilidades das características estudadas, a fim de determinar parâmetros estatísticos que descrevam o nível de qualidade no qual as misturas estão sendo produzidas;
- c) análise da sensibilidade do desempenho do revestimento asfáltico à variabilidade das características de qualidade;
- d) identificação de relações causa-efeito entre os níveis de qualidade das características das misturas e o desempenho dos revestimentos.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. Neste primeiro (INTRODUÇÃO) foi apresentado o tema estudado na pesquisa, destacando sua relevância para o meio rodoviário e identificando os seus objetivos a serem cumpridos.

No Capítulo 2 (REVISÃO BIBLIOGRÁFICA) é apresentado o estudo teórico a respeito do controle de qualidade da produção de misturas asfálticas, onde são abordados os principais conceitos que envolvem o tema. Para finalizar, é apresentada uma breve revisão bibliográfica abordando a influência das características de qualidade no desempenho dos revestimentos asfálticos.

No Capítulo 3 (METODOLOGIA) é detalhada a metodologia adotada na pesquisa. Discute-se sobre a formação do banco de dados, o cálculo para a determinação da variabilidade total das características de qualidade e os parâmetros de entrada no *software* M-E PDG, utilizado para analisar a sensibilidade do desempenho dos revestimentos em relação à variação das características de qualidade.

No Capítulo 4 (ANÁLISE DOS DADOS) são apresentados e analisados os resultados obtidos nesta pesquisa. Na primeira parte, apresenta-se os dados necessários para a determinação das variabilidades das características de qualidade das misturas e a aferição dos seus níveis de qualidade. Após, apresenta-se a análise de sensibilidade realizada com o propósito de avaliar a influência da variabilidade das características de qualidade no desempenho dos revestimentos asfálticos.

No Capítulo 5 (CONSIDERAÇÕES FINAIS), são feitas as considerações finais do trabalho. São apresentadas as principais conclusões da pesquisa e algumas sugestões de estudos futuros a fim de que o tema continue sendo estudado.

Na sequência, são apresentadas as referências utilizadas neste trabalho, seguidas do apêndice, onde é disponibilizado o banco de dados gerado ao longo da pesquisa, contendo as características de qualidade analisadas nesta dissertação, e do anexo com a tabela de distribuição normal padronizada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o estudo teórico a respeito do controle de qualidade da produção de misturas asfálticas.

2.1 CONTROLE DE QUALIDADE

Controle de qualidade, também chamado de controle do processo, compreende todas as ações planejadas e sistemáticas necessárias para garantir que um produto ou serviço terá desempenho satisfatório. São englobadas também as ações necessárias para avaliar e ajustar o processo de produção e de construção a fim de manter o nível de qualidade no produto final (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2009). Compreende atividades simultâneas à execução dos serviços de produção da obra rodoviária, aplicando técnicas operacionais que se destinam a monitorar todo o processo em todas as etapas do ciclo da qualidade da obra (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2004).

Segundo o DNIT (2006a), o controle de qualidade deve ser considerado sobre dois enfoques: o controle administrativo e o controle técnico ou qualitativo. O primeiro objetiva a verificação da conformidade do trabalho às exigências legais e administrativas do contrato da obra. Já o controle técnico assegura a conformidade às normas e especificações, verificando, por meio de ensaios e medições, a qualidade dos serviços, dos materiais e suas respectivas utilizações.

Uma definição mais direta de controle tecnológico e de qualidade é apresentada por Fortes e Merighi (2004). Ambos se constituem da amostragem dos serviços que estão sendo realizados além da realização de ensaios para verificar nas diversas fases de execução, desde a seleção dos materiais, misturas ou aplicação desses materiais, e fases posteriores. A verificação do atendimento às especificações vigentes e apontadas no projeto deve ser feita de maneira adequada, para que seja possível corrigir em tempo hábil as distorções ou erros que porventura tenham ocorrido em uma determinada obra, garantindo o seu desempenho previsto em projeto. A Figura 1 esquematiza as diversas etapas do processo de usinagem, onde devem ser realizadas aferições e inspeções de modo a garantir a qualidade dos revestimentos asfálticos. Soma-se a essas etapas, os procedimentos de espalhamento e de compactação da mistura asfáltica na pista.

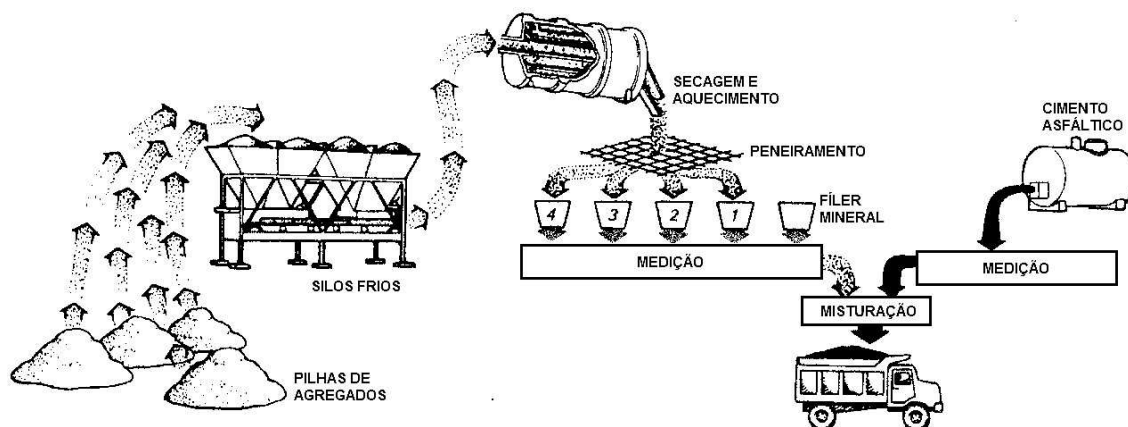


Figura 1: Etapas do processo de usinagem (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989)

Cabe aqui salientar a diferença entre controle tecnológico e controle de qualidade. O controle tecnológico visa verificar se estão sendo atendidas as especificações tanto do material quanto da mistura ou aplicação. Já o controle de qualidade é mais abrangente, uma vez que envolve, além da verificação dos resultados dos ensaios realizados para controle, a sua referência normativa e análise quanto ao atendimento ou não das especificações do empreendimento, também o acompanhamento da adequação das instalações, da devida calibração dos instrumentos ou equipamentos utilizados para medição de qualquer propriedade, dos métodos e documentação utilizados, da competência técnica e da experiência profissional dos envolvidos, enfim, todos os condicionantes para garantir confiabilidade e adequação aos resultados obtidos. Resumindo, o controle de qualidade procura verificar de maneira sistêmica o controle tecnológico, retroalimentando os processos, buscando a melhoria contínua, garantindo a rastreabilidade de cada ensaio, que não permitem anomalias originadas pela queda de qualidade dos materiais ou processos executivos (FORTES e MERIGHI, 2004).

2.2 PLANO DE CONTROLE DE QUALIDADE

Um plano de controle de qualidade bem elaborado é uma das ferramentas práticas mais eficientes que um empreiteiro pode utilizar para executar um revestimento asfáltico de qualidade. Devem ser estabelecidas as políticas, as práticas, a organização e as atividades que resultarão na produção de um produto de qualidade. O plano de controle permite que sejam determinadas áreas específicas durante a produção que precisam de mais atenção dos envolvidos no projeto (RUSSELL *et al.*, 2001).

Para o DNIT (2004) o controle de qualidade exercido pelo executante da obra divide-se em controle da produção e controle da qualidade:

a) controle da produção: é de responsabilidade dos setores encarregados da produção da obra e do apoio à produção, nas diversas frentes de serviços. Compreende as seguintes atividades:

- verificação tátil e visual de todos os materiais;
- realização de todos os ensaios de campo previstos;
- coleta de materiais em jazidas e na pista para ensaios de laboratório;
- treinamento dos encarregados, operadores e operários;
- preservação das funções dos equipamentos e aparelhos;
- manuseio e estocagem do material.

b) controle da qualidade: é o controle efetuado pela equipe responsável pela qualidade da obra, independente hierarquicamente do setor de produção e chefiada por engenheiro com perfil adequado à gestão de qualidade. Compreende as seguintes atividades:

- monitoração do controle da produção;
- manutenção dos registros de aprovação de materiais e dos serviços concluídos;
- manutenção e operação de laboratórios para os ensaios previstos;
- análise e arquivamento de todos os resultados de ensaios;
- levantamento das deflexões elásticas recuperáveis, das irregularidades e das rugosidades da pista;
- controle geométrico dos dispositivos de drenagem superficial;
- orientação do tratamento das não-conformidades;
- controle do passivo ambiental;
- verificação do atendimento à segurança e higiene do trabalho;
- manutenção de todos os controles, com acesso permanente à Fiscalização;
- demonstração rotineira da qualidade da obra à Fiscalização.

Um elemento fundamental do controle de qualidade é que toda a equipe envolvida com a produção esteja ciente dos esforços para a manutenção da qualidade através da redução sistemática da variabilidade (MONTGOMERY e RUNGER, 2007).

O propósito principal de um plano de controle de qualidade é medir as características e inspecionar as atividades que influenciam na qualidade da produção, de modo que ações corretivas possam ser tomadas evitando que material não-conforme seja incorporado ao produto final (BURATI *et al.*, 2003).

2.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE

Historicamente, procedimentos estatísticos de controle de qualidade foram desenvolvidos principalmente para o ambiente da indústria, especialmente onde os volumes de produção são altos. Estes procedimentos permitem a detecção precoce e a correção rápida de problemas. As aplicações do controle estatístico de qualidade têm como foco principal o processo de produção. A disposição dos itens já produzidos também é importante, mas secundária (LAPIN, 1990).

Segundo Montgomery e Runger (2007), é costume pensar em controle estatístico do processo (*SPC – statistical process control*) como um conjunto de ferramentas de resolução de problemas que podem ser aplicadas a qualquer processo. As principais são:

- a) histograma;
- b) diagrama de Pareto;
- c) diagrama de causa e efeito;
- d) diagrama de concentração de defeitos;
- e) gráfico de controle;
- f) diagrama de dispersão;
- g) lista de verificação.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE

As características de qualidade das misturas asfálticas são aquelas medidas com o propósito de verificar a conformidade da produção em relação a uma dada exigência ou especificação. Devem ser correlacionáveis com propriedades fundamentais de engenharia, permitindo estimar o desempenho do revestimento construído. Como exemplos de propriedades fundamentais de engenharia podem ser citados a resistência à tração, o módulo de resiliência, dano por umidade induzida e propriedades de deformação permanente e de fadiga (TRB, 2009; NÚÑEZ e SCHMITZ, 2003). Burati *et al.* (2003) definem a diferença entre “propriedade” e “característica de qualidade” através do seguinte exemplo: para o concreto asfáltico a propriedade em questão pode ser a durabilidade e a característica de qualidade a ela correlacionada pode ser o teor de ligante.

Butts e Ksaibati (2003) apresentaram as características de qualidade mais medidas nas especificações de garantia de qualidade para concreto asfáltico em 39 estados americanos.

As três mais comumente controladas são grau de compactação, teor de ligante e distribuição granulométrica. Outras características controladas são: volume de vazios (V_V), vazios nos agregados minerais (VAM), temperatura da mistura no misturador, espessura da camada compactada, dentre outras.

No Brasil, as normas DNER-ES 385/99 e DNIT 031/2006 – ES, que definem a sistemática de execução de concreto asfáltico utilizando asfalto modificado por polímero e asfalto convencional, respectivamente, sugerem que sejam feitas as seguintes medidas para o controle da produção:

- a) controle da quantidade de ligante na mistura, através de extrações de asfalto de amostras coletadas na pista, logo após a passagem da acabadora (DNER-ME 053);
- b) controle da graduação da mistura de agregados (DNER-ME 083) resultante das extrações de asfalto citadas na alínea a;
- c) controle das temperaturas na usina: do agregado no silo quente, do ligante e da mistura no momento de saída do misturador;
- d) controle das características da mistura através de ensaios Marshall (DNER-ME 043) e de ensaio de tração por compressão diametral a 25°C (DNER-ME 138);
- e) controle da temperatura da massa asfáltica durante o espalhamento imediatamente antes de iniciada a compactação;
- f) controle do grau de compactação (GC), comparando a densidade aparente de corpos de prova extraídos da pista com a densidade aparente de projeto da mistura.

Estas normas também definem a sistemática para o controle dos insumos, onde são verificadas as características dos agregados e do ligante, e para a verificação do produto, onde são verificados a espessura da camada, os alinhamentos, o acabamento da superfície e as condições de segurança.

2.4.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados é uma das principais características do concreto asfáltico e possui influência em quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à

deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, dentre outras (BERNUCCI *et al.*, 2008a). De acordo com Parker e Brown (1992), a influência da distribuição granulométrica no desempenho é evidente, porém há dificuldade em quantificar da influência do agregado de acordo com o tamanho das peneiras granulométricas.

Segundo o Instituto do Asfalto (1989), a graduação, a textura superficial e angularidade são as características primárias dos agregados que afetam a trabalhabilidade da mistura. Quanto maior o tamanho máximo de agregado e a porcentagem de agregado graúdo na mistura, tanto menor a trabalhabilidade, sendo necessário esforço de compactação crescente para atingir a densidade apropriada. Areias naturais são muitas vezes acrescentadas à mistura por motivos de economia e de melhoria na trabalhabilidade. O excesso de areia, principalmente nos tamanhos médios, resultará em misturas macias (com elevada trabalhabilidade, mas baixa estabilidade), muito sujeitas ao sobrecarregamento por rolos pesados e rolagem excessiva. Os finos ou o teor de fíler também afetam o processo de compactação. A quantidade de finos nas misturas deve ser suficiente para, juntamente com o ligante, propiciar a coesão adequada quando a mistura esfria. A adição de fíler mineral ajuda a contrabalancear a “maciez” ou as propriedades de consolidação demorada das misturas que contém areia em excesso. Por outro lado, quantidades elevadas de finos dificultam a compactação da mistura.

Parker e Brown (1992) analisaram os efeitos das propriedades dos agregados na deformação permanente nos revestimentos flexíveis do estado do Alabama. No estudo, perceberam que nas áreas onde utiliza-se agregado britado e areias naturais angulares há menor susceptibilidade à deformação permanente. Com agregados angulares bem distribuídos, seleção adequada do ligante e do seu teor, as misturas não são apenas mais resistentes à deformação permanente, mas também mais duráveis e resistentes ao trincamento.

De acordo com o *Hot-Mix Bituminous Paving Manual*, da *Federal Highway Administration* (1985), a granulometria é provavelmente a característica mais fácil de controlar e possui uma grande influência no desempenho das misturas. O propósito de controlar a granulometria nas misturas densas é manter um valor adequado de vazios do agregado mineral (VAM), que deve ser grande o suficiente para permitir que cada partícula seja recoberta pelo ligante e ainda manter um volume de vazios (V_v) adequado na mistura quando compactada. Os seguintes efeitos são destacados:

- a) excesso de agregado graúdo resulta em uma mistura que tende a segregar facilmente;

- b) excesso de areia resulta em uma mistura macia que tende a ser compactada com facilidade;
- c) excesso de filer resulta em uma mistura muito rígida;
- d) escassez de filer resulta em uma mistura com baixa coesão;
- e) agregado britado resulta em uma mistura com grande atrito entre as partículas;
- f) agregado arredondado ou pouco anguloso resulta em uma mistura com menor atrito entre as partículas.

O material passante na peneira # n200 vem sendo designado como pó (*dust*) para distingui-lo da definição do DNIT de filer. Quando a porcentagem de pó aumenta, reduz-se os vazios do esqueleto mineral e aumenta-se a trabalhabilidade da mistura asfáltica até certo ponto. Acima de um determinado teor, o pó começa a prejudicar a trabalhabilidade bem como a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas, alterando também a capacidade de compactação da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2008a).

2.4.2 Teor de ligante

As propriedades do concreto asfáltico são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico. O excesso de ligante, às vezes dentro do admissível em usinas, pode gerar problemas de deformação permanente por fluência e/ou exsudação, com fechamento da macrotextura superficial. De outro lado, a falta de ligante gera um enfraquecimento da mistura e de sua resistência à formação de trincas, uma vez que a resistência à tração é bastante afetada e sua vida de fadiga fica muito reduzida (BERNUCCI *et al.*, 2008a). Teores de ligante crescentes melhoram a vida de fadiga e o desgaste superficial, em compensação aumentam a susceptibilidade de ocorrência de deformação permanente (MEDINA e MOTTA, 2005).

Harvey *et al.* (1995) desenvolveram modelos de previsão de desempenho com o objetivo de avaliar o efeito do teor de ligante e do volume de vazios no desempenho do revestimento asfáltico em termos de vida de fadiga. Na Figura 2, é apresentado o resultado de 270 simulações onde foram analisadas 5 variações de teor de ligante, 3 variações de volume de vazios para 18 projetos diferentes de misturas asfálticas. A vida de fadiga foi normalizada em relação aos resultados para uma mistura com teor de ligante e volume de vazios iguais a 5%.

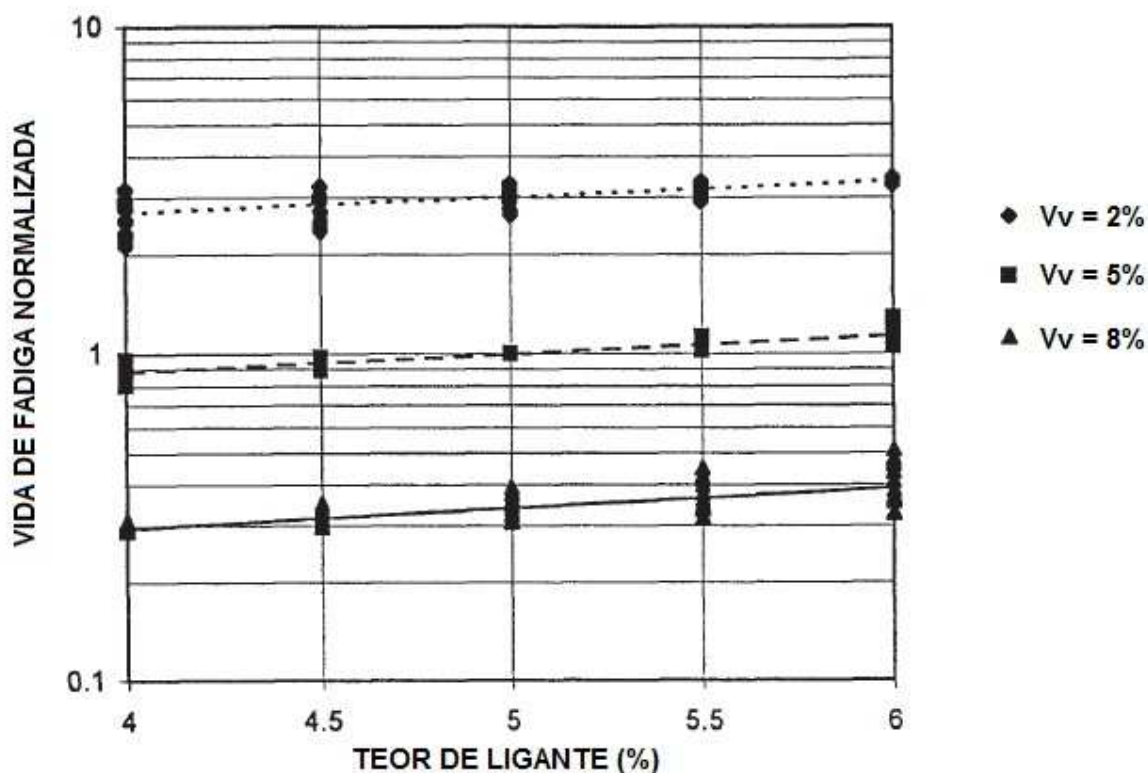


Figura 2: Efeito do teor de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga (HARVEY *et al.*, 1995)

Uma das conclusões a qual chegaram foi que uma variação de -1% no teor de ligante resulta em uma redução de 12% na vida de fadiga, considerando a mistura com teor de ligante e volume de vazios iguais a 5%.

BERNUCCI *et al.* (2008b) avaliaram o efeito do tipo e do teor de ligante na formação de trilhas de roda a partir da deformação permanente obtida no ensaio com o simulador de tráfego tipo LCPC. Foi observado que para as misturas com teores de ligante menores que o de projeto a deformação permanente ocorreu algumas centenas de ciclos maior que as demais misturas testadas, pois os volumes de vazios mais altos apresentados por estas misturas propiciam maior acúmulo de deformação após os primeiros 100 ciclos da simulação devido à consolidação e rápida redução de vazios. Já as misturas com teores de ligante maiores que o de projeto apresentaram os piores desempenhos quanto à deformação permanente; os volumes de vazios mais baixos e, eventualmente, menores resistência e rigidez destas misturas propiciam maior acúmulo de deformação ao longo de todo o período de simulação.

2.4.3 Volume de vazios

Os objetivos da compactação nas misturas asfálticas densas são conseguir com que a mistura alcance seu teor ótimo de vazios de ar e promover uma superfície de rolamento suave. Logo após o processo de compactação, o volume de vazios deve ser aproximadamente igual a 8% nas misturas asfálticas densas. Um valor mínimo de volume de vazios é desejado para permitir a expansão térmica, sem causar exsudação e instabilidade da mistura. Em compensação, uma compactação deficiente provoca um elevado volume de vazios e aumenta a susceptibilidade à deformação permanente (IA, 1989). A Figura 3 é uma representação gráfica dos efeitos do volume de vazios na durabilidade do revestimento asfáltico.

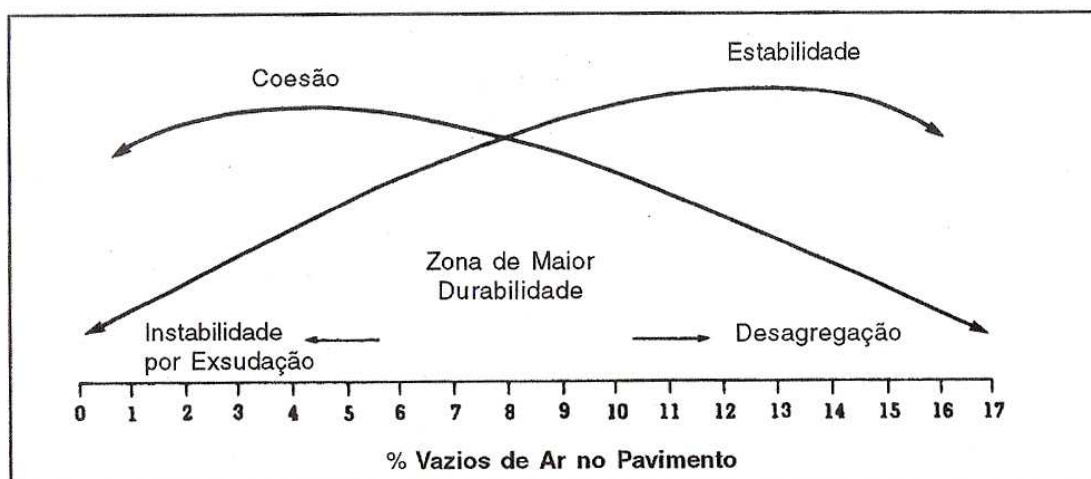


Figura 3: Durabilidade do revestimento asfáltico versus volume de vazios (IA, 1989)

LAPAV (2008) relata o estudo da qualidade de uma mistura asfáltica aplicada na execução de um revestimento que, menos de 15 dias depois de liberado ao tráfego, apresentou trincas do tipo FC-3, inclusive com a formação de panelas, e excessivo bombeamento de finos. O problema foi causado por falha no controle de qualidade. A mistura, devido aos baixos teores de ligante, apresentou elevados volumes de vazios na ordem de 12%. Ensaios de módulo de resiliência em corpos de prova extraídos da pista revelaram uma mistura muito flexível e susceptível à deformação permanente, com módulo de resiliência médio de 3.790MPa. O mais impressionante, conforme consta no relatório, são os valores de resistência à tração na ordem de 0,84MPa, menos que a metade dos valores usuais nos projetos da rodovia em questão. Visto que a espessura da camada de revestimento era de 8cm, relativamente pequena, as tensões geradas pela carga do tráfego de caminhões

provavelmente iriam ultrapassar o valor da resistência à tração e o trincamento rapidamente se agravaria, caso não houvessem sido feitas intervenções.

Voltando aos modelos de previsão de desempenho de Harvey *et al.* (1995), a mistura com teor de ligante e volume de vazios iguais a 5% sofre uma redução de 30% na vida de fadiga caso seja executada com volume de vazios 1% maior. Quando combinados os efeitos das variações de -1% no teor de ligante e +1% no volume de vazios, a redução na vida de fadiga é de 39%. Outra conclusão deste estudo é que, quanto à vida de fadiga, a precisão em alcançar o volume de vazios de projeto é mais significativa do que a precisão em alcançar o teor ótimo de ligante.

O volume de vazios influencia diretamente a ocorrência de deformação permanente. Segundo FHWA (1985):

- a) de 6% a 8%: este nível de compactação logo após a passagem do rolo compactador e antes da liberação do tráfego, deve resultar em volume de vazios entre 3% e 5% com o passar do tempo;
- b) menor que 3%: a camada de revestimento está muito compactada. Com este nível de compactação, a consolidação adicional devida ao tráfego provavelmente resultará em deformação em trilha de roda e/ou escorregamento;
- c) maior que 10%: a camada de revestimento está muito mal compactada. Este nível de compactação pode ser resultado de falta de esforço de compactação ou a mistura foi compactada com a temperatura baixa.

2.5 VARIABILIDADE DAS MEDIDAS DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE

A capacidade de produzir uma mistura asfáltica cujas características de qualidade estejam dentro dos limites das especificações depende muito da variabilidade do processo de produção, que inclui a variabilidade dos materiais, da produção, da amostragem e do método de ensaio utilizado. A variabilidade é uma preocupação fundamental do controle de qualidade, pois é utilizada para determinar a porcentagem de material dentro (ou fora) dos limites especificados. O propósito dos ensaios para controle da usinagem e das operações de compactação é assegurar que os parâmetros de projeto estejam sendo alcançados com o mínimo de variação. O empreiteiro deve utilizar os dados dos ensaios para verificar o seu processo de produção e determinar ajustes quando necessário, sendo importante discernir a

variação aleatória e a variação associada a fatores controláveis da produção (RUSSELL *et al.*, 2001).

Deacon *et al.* (2001) reuniram valores encontrados na literatura que estimam a variabilidade de algumas características de qualidades medidas em projetos rodoviário americanos. Estes valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Variabilidade de características de qualidade em projetos rodoviários americanos Fonte: (DEACON *et al.*, 2001)

CARACTERÍSTICA	MEDIDA DE VARIAÇÃO	VARIABILIDADE
TEOR DE LIGANTE	desvio padrão	0,15 – 0,44%
		0,10 – 0,40%
		0,31%
		0,30%
VOLUME DE VAZIOS	desvio padrão	0,90 – 1,90%
		0,40 – 1,50%
		1,50%
		1,94%
ESPESSURA	coeficiente de variação	12,5 – 15,0%
	desvio padrão	0 – 0,5cm
		0,58cm
		0,99cm

Burati (2005) publicou valores desta natureza no trabalho em que revisou os limites da especificação de garantia de qualidade do estado americano da Carolina do Sul. Parker e Houssain (2002) também publicaram valores desse tipo ao avaliarem as produções de empreiteiros no estado do Alabama. Na Tabela 2 são apresentadas as variabilidades, medidas por desvios padrões, publicadas nestes dois trabalhos.

Tabela 2: Variabilidades de construções americanas

CARACTERÍSTICA	VARIABILIDADE	FONTE CONSULTADA
TEOR DE LIGANTE	0,091 – 0,335%	Burati (2005)
	0,212 – 0,258%	Parker e Houssain (2002)
VOLUME DE VAZIOS	0,220 – 0,984%	Burati (2005)
	0,878 – 1,011%	Parker e Houssain (2002)
GRAU DE COMPACTAÇÃO	0,734 – 1,546%	Burati (2005)
	1,100 – 1,530%	Parker e Houssain (2002)
VAZIOS NOS AGREGADOS MINERAIS	0,262 – 0,917%	Burati (2005)

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, descreve-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente é apresentada a formação do banco de dados contendo as características de qualidade medidas para o controle da produção das misturas asfálticas. Após, são expostos os principais conceitos estatísticos abordados na interpretação dos resultados. E, finalmente, é feita uma breve apresentação do *software* M-E PDG, utilizado para a análise de sensibilidade do revestimento asfáltico em relação à variação das características de qualidade analisadas. A Figura 4 mostra o fluxograma contendo as etapas desta pesquisa.

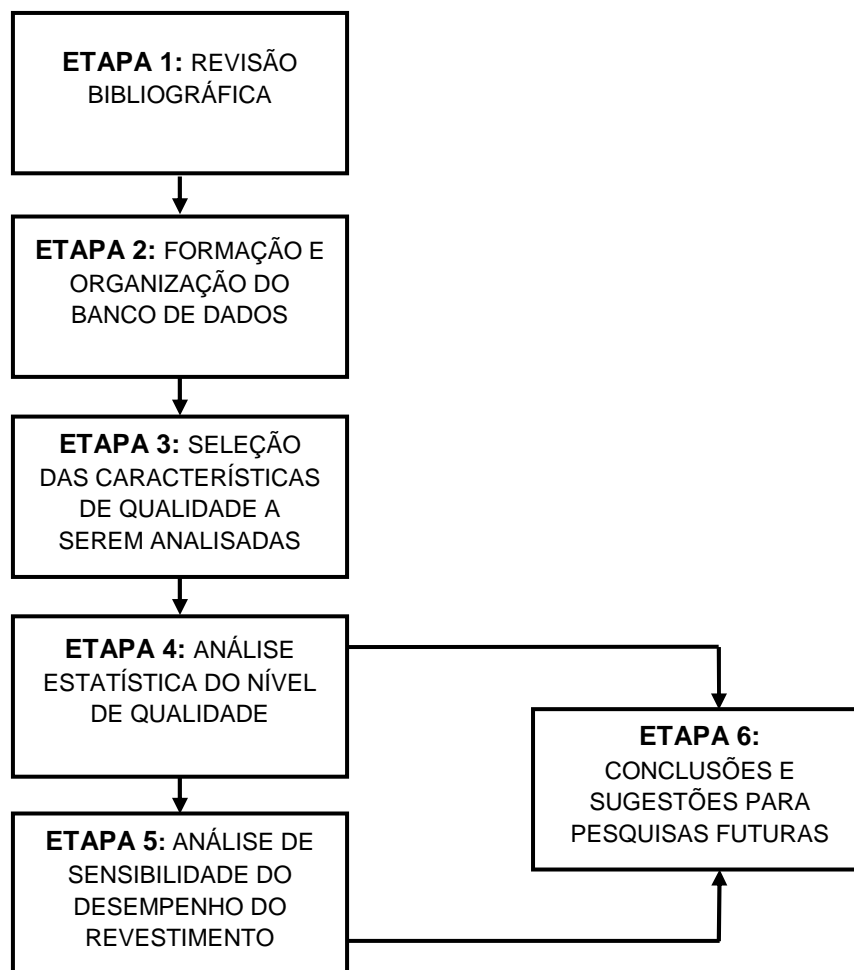


Figura 4: Fluxograma das etapas desta pesquisa

Na etapa 1, foi feito o relato do estudo teórico a respeito do controle de qualidade da produção de misturas asfálticas e como as características de qualidade influenciam no seu desempenho.

Na etapa 2, foi formado e organizado um banco de dados contendo as características de qualidade medidas pelas empreiteiras para controlar suas produções de misturas asfálticas.

Na etapa 3, selecionou-se as características de qualidade a serem analisadas na pesquisa. Os critérios adotados foram a representatividade da característica de qualidade nas condições de execução em campo e a possibilidade de analisar o desempenho do revestimento asfáltico executado com o emprego das misturas asfálticas analisadas, através do *software* M-E PDG.

Na etapa 4, analisou-se estatisticamente a qualidade da produção das misturas, em função das características de qualidade selecionadas na etapa anterior. O principal objetivo desta etapa foi verificar a variabilidade dos dados, de forma a determinar parâmetros estatísticos que indiquem o nível de qualidade no qual estas misturas foram produzidas.

Na etapa 5, foi realizada uma análise de sensibilidade, com base nos modelos de desempenho do M-E PDG, onde procurou-se verificar o reflexo da variação das características de qualidade no desempenho dos revestimentos asfálticos.

Na etapa 6, foram descritas as principais conclusões desta pesquisa, além de serem apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

3.1 FORMAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS

O banco de dados, como já foi mencionado, é uma ferramenta imprescindível para o conhecimento do nível de qualidade das características das misturas asfálticas. Contudo, a sua formação é apenas um primeiro passo, visto que ele deve ser constantemente alimentado a fim de evidenciar mudanças nos níveis de qualidade nas produções das usinas. Desta maneira, deve ser organizado de forma clara, permitindo que outros profissionais possam vir a utilizá-lo corretamente.

Os dados analisados nesta pesquisa foram fornecidos por uma concessionária que administra uma importante rodovia do Estado do Rio Grande do Sul. São oriundos do controle de qualidade de 12 projetos de misturas asfálticas empregadas na construção e manutenção da camada de revestimento entre o ano de 2006 e meados de 2010. As empreiteiras controlaram a produção medindo as características de qualidade recomendadas nas normas DNER-ES 385/99 e DNIT 031/2006 - ES, que especificam a sistemática de execução de concreto asfáltico com ligante modificado por polímero e com

ligante convencional, respectivamente. As características medidas para o controle e as normas que descrevem os métodos de ensaio empregados são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características de qualidade medidas no controle de qualidade e seus respectivos métodos de ensaio, de acordo com as normas DNER-ES 385/99 e DNIT 031/2006 - ES

CARACTERÍSTICA	MÉTODO DE ENSAIO
GRANULOMETRIA	DNER-ME 083
TEOR DE LIGANTE (TL)	DNER-ME 053
VOLUME DE VAZIOS (V_V)	DNER-ME 043
RELAÇÃO BETUME/VAZIOS (RBV)	DNER-ME 043
ESTABILIDADE mínima	DNER-ME 043
VOLUME DO AGREGADO MINERAL (VAM)	DNER-ME 043

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas do *Microsoft Office Excel*, o que possibilitou a obtenção dos parâmetros estatísticos e auxiliou na geração dos gráficos utilizados para a análise dos resultados. Com o banco de dados formado e organizado, partiu-se para a seleção das características de qualidade a serem analisadas na pesquisa. Os critérios de seleção foram:

- a) a representatividade da característica de qualidade nas condições de execução em campo. Neste momento foi decidido que V_V , RBV, ESTABILIDADE mínima e VAM não seriam analisadas de forma detalhada na dissertação, visto que os dados destas características foram medidos em corpos de prova moldados em laboratório, ou seja, não representam a qualidade da execução em campo;
- b) a possibilidade de analisar o desempenho do revestimento asfáltico através do M-E PDG. Com este critério, foram excluídas da análise as peneiras granulométricas cujas percentagens passantes ou retidas não são parâmetros de entrada no *software*. Desta maneira, optou-se por analisar apenas as percentagens passantes nas peneiras # 3/8", # n4 e # n200.

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de projeto das características de qualidade analisadas.

Tabela 4: Parâmetros de projeto das características de qualidade analisadas na pesquisa

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
# 3/8" (% passante)	85,8	84,4	88,5	84,4	85,8	80,1	84,1	84,1	83,7	83,7	83,7	82,6
# n4 (% passante)	59,8	71,1	72,9	59,3	59,8	63,2	62,8	62,8	61,1	61,1	61,1	55,3
# n200 (% passante)	6,2	8,1	9,6	4,5	6,2	6,8	7,1	7,1	5,1	5,1	5,1	6,9
TL (%)	6,3	6,0	5,1	6,1	5,9	5,7	5,5	5,0	5,1	5,3	5,4	4,7

As medidas das características de qualidade foram separadas em lotes que representam cada semana de produção das usinas, ou seja, os lotes foram baseados no tempo. O ideal seria que fossem analisados períodos diários, mas visto a grande quantidade de dados disponibilizados, optou-se por lotes semanais. Calculou-se então a média e o desvio padrão das medidas das características de qualidade em cada um destes lotes e iniciou-se a análise estatística. Tais lotes também podem ser chamados de amostras.

A principal vantagem de realizar a amostragem, para o controle de qualidade com base no tempo é a possibilidade de realizar avaliações em períodos isolados de tempo, onde podem ocorrer modificações no processo de produção. Em contrapartida, a quantidade de mistura produzida pode variar de lote a lote, fazendo com que quantidades diferentes sejam avaliadas. Russell *et al.* (2001) apresentam uma discussão detalhada das vantagens e desvantagens das amostragens baseadas no tempo e das baseadas no volume de produção.

O banco de dados das características de qualidade analisadas na dissertação encontra-se no Apêndice A.

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

O principal objetivo desta etapa consiste na determinação das variabilidades das características de qualidade. Nesta seção são discutidas as etapas para o cálculo desta determinação. Burati *et al.* (2003) fazem uma descrição desta metodologia e Burati (2005) a utiliza para revisar os limites de uma especificação de garantia de qualidade nos Estados Unidos.

Os desvios padrões que quantificam as variabilidades das características de qualidade (S_{CQ}) são compostos por duas parcelas: a variabilidade do processo de produção ($S_{PROCESSO}$) e a variabilidade da precisão com que os empreiteiros centram suas produções nos parâmetros de projeto ($S_{PRECISÃO}$). A sua determinação é feita através da Equação 1.

$$S_{CQ} = \sqrt{S_{PROCESSO}^2 + S_{PRECISÃO}^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

S_{CQ} é a variabilidade da característica de qualidade;

$S_{PROCESSO}^2$ é a variância da variabilidade do processo (desvio padrão que quantifica a variabilidade do processo elevado ao quadrado);

$S_{PRECISÃO}^2$ é a variância da variabilidade da precisão (desvio padrão que quantifica a variabilidade da precisão elevado ao quadrado).

A determinação destas duas parcelas é mostrada nas duas seções seguintes. Para uma melhor compreensão do procedimento de cálculo, optou-se por utilizar o cálculo da variabilidade das medidas de teor de ligante como exemplo de aplicação.

3.2.1 Determinação da variabilidade do processo

O primeiro passo para a determinação da variabilidade da característica de qualidade é a determinação da variabilidade do processo de produção. O valor do desvio padrão que a quantifica deve ser coerente com a maneira na qual os lotes foram definidos. Desta maneira, foram calculados os desvios padrões em cada lote para cada projeto e posteriormente ponderados, tendo como peso o tamanho das amostras, ou seja, o tamanho dos lotes. O cálculo foi feito utilizando a Equação 2.

$$S_{PROCESSO} = \sqrt{S_p^2} = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2 + \dots + (n_k-1)s_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_k - k}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

s_{PROCESSO} é o desvio padrão que quantifica a variabilidade do processo do projeto;

s_p^2 é a variância ponderada do processo do projeto;

s_i^2 é a variância de cada lote do projeto;

n_i é a quantidade de medidas da característica de qualidade para cada lote i ;

k é a quantidade de lotes no projeto.

Na Tabela 5 são apresentados o tamanho e o desvio padrão das medidas de teor de ligante de cada lote do Projeto 4.

Tabela 5: Tamanho e desvio padrão de cada lote do Projeto 4, considerando o teor de ligante

LOTE	n_i	s_i	$(n_i-1)s_i^2$
1	5	0,0421	0,0071
2	2	0,0141	0,0002
3	7	0,1086	0,0707
4	11	0,1354	0,1834
5	5	0,0970	0,0376
6	2	0,0141	0,0002
7	12	0,0954	0,1001
8	13	0,0788	0,0745
$k=8$	$\sum n_i=57$		$\sum (n_i-1)s_i^2=0,4738$

A aplicação da Equação 2 para as medidas de teor de ligante nos lotes do Projeto 4, ou seja, a ponderação dos seus desvios padrões é mostrada na Equação 3. Verifica-se que a variabilidade das medidas de teor de ligante no processo de produção do Projeto 4 pode ser quantificada através de um desvio padrão igual a 0,0983.

$$s_{\text{PROCESSO}} = \sqrt{\frac{0,4738}{57-8}} = 0,0983$$

Equação (3)

Este procedimento foi repetido para os outros 11 projetos. Os tamanhos totais dos lotes e os desvios padrões dos processos dos 12 projetos, considerando o teor de ligante, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Tamanho total dos lotes e variabilidade do processo de cada projeto, considerando o teor de ligante

PROJETO	N_i	$S_{\text{PROCESSO } i}$	$(N_i-1)S_{\text{PROCESSO } i}^2$
1	163	0,1699	4,6736
2	4	0,1803	0,0975
3	5	0,4984	0,9937
4	57	0,0983	0,5415
5	10	0,1096	0,1082
6	67	0,1114	0,8194
7	406	0,1477	8,8410
8	33	0,0869	0,2415
9	4	0,3146	0,2970
10	115	0,0761	0,6598
11	7	0,0350	0,0073
12	65	0,1049	0,7039
K=12	$\sum N_i = 936$		$\sum (N_i-1)S_{\text{PROCESSO } i}^2 = 17,9844$

Adaptando a Equação 2, onde N_i passa a ser o tamanho total dos lotes em cada projeto e K passa a ser a quantidade de projetos analisados, a sua aplicação para o teor de ligante é mostrada na Equação 4.

$$S_{\text{PROCESSO}} = \sqrt{\frac{17,9844}{936-12}} = 0,1395 \quad \text{Equação (4)}$$

Finalmente, conclui-se que a variabilidade do processo, para este universo de projetos e considerando as medidas de teor de ligante, pode ser quantificada através de um desvio padrão igual a 0,1395%.

Cabe aqui salientar que não existe uma única maneira para a determinação do desvio padrão que quantifica a variabilidade do processo. Burati (2005), por exemplo, ao revisar os limites da especificação de aceitação do Departamento de Transportes da Carolina do Sul (SCDOT), fez as seguintes considerações ao selecionar o desvio padrão para quantificar a variabilidade do processo:

- a) o valor do 70º percentil dos desvios analisados para o teor de ligante;
- b) o valor do 80º percentil dos desvios analisados para o volume de vazios em misturas aplicadas na camada de rolamento;
- c) o maior valor dos desvios dos projetos analisados para o volume de vazios das misturas aplicadas nas camadas intermediárias e para o volume do agregado mineral.

A escolha pela ponderação dos desvios calculados em cada projeto deu-se por parecer a maneira mais racional de determinar a variabilidade do processo.

3.2.2 Determinação da variabilidade da precisão

Além da variabilidade inerente a qualquer processo de produção, também é importante considerar a capacidade dos empreiteiros de centrarem suas produções nos parâmetros de projeto das misturas asfálticas. A avaliação da variabilidade da precisão, que mede tal capacidade, tem o propósito de verificar o quão variáveis são as médias dos processos de produção em relação aos valores ótimos dos projetos de dosagem das misturas.

O procedimento para a determinação da variabilidade da precisão começa com o cálculo das médias das medidas das características de qualidade de cada lote em cada projeto. A posterior ponderação destas médias é feita tendo o tamanho do lote como peso e utiliza-se a Equação 5.

$$\bar{X}_i = \frac{(\bar{x}_1 n_1) + \dots + (\bar{x}_k n_k)}{n_1 + \dots + n_k} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

\bar{X}_i é a média ponderada dos valores médios das medidas da característica qualidade;

\bar{x}_i é o valor médio das medidas de determinada característica em cada lote;

n_i é a quantidade de medidas da característica de qualidade para cada lote i ;

k é a quantidade de lotes no projeto.

Para exemplificar, o tamanho e as médias das medidas de teor de ligante de cada lote do Projeto 4 são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Tamanho e médias aritméticas das medidas de teor de ligante de cada lote do Projeto 4

LOTE	n_i	\bar{x}_i	$\bar{x}_i n_i$
1	5	6,082	30,410
2	2	5,940	11,880
3	7	6,027	42,190
4	11	5,867	64,540
5	5	5,970	29,850
6	2	6,060	12,120
7	12	5,969	71,630
8	13	5,999	77,990
$\sum n_i = 57$		$\sum \bar{x}_i n_i = 340,610$	

Com a aplicação da Equação 5 para o exemplo em questão, temos a Equação 6.

$$\bar{X}_i = \frac{340,610}{57} = 5,976 \quad \text{Equação (6)}$$

Conclui-se então que o valor médio das medidas de teor de ligante no Projeto 4 é de 5,976%, ficando 0,124% abaixo do teor do projeto da mistura, visto que este é de 6,1%. A diferença entre os valores médios medidos e os respectivos parâmetros de projeto será indicada por $\overline{\Delta X}_i$.

Repetindo o procedimento para os projetos restantes, obtiveram-se os valores médios de teor de ligante para os 12 projetos. Na Tabela 8 são apresentadas as diferenças entre os valores de teor de ligante medidos para controle de qualidade e os teores ótimos das misturas.

Tabela 8: Diferenças entre os valores de teor de ligante medidos para controle de qualidade e os teores ótimos nos projetos analisados

PROJETO	N_i	$\overline{\Delta X}_i$
1	163	-0,022
2	4	0,015
3	5	0,264
4	57	-0,124
5	10	0,086
6	67	0,026
7	406	-0,134
8	33	0,057
9	4	0,210
10	115	-0,166
11	7	-0,229
12	65	0,089

A variabilidade da precisão com que os empreiteiros atingem os valores de projeto, considerando as medidas de teor de ligante, é quantificada pelo desvio padrão das diferenças médias apresentadas na Tabela 8 e é igual a 0,1497%.

3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO

Para a análise de sensibilidade do desempenho dos revestimentos asfálticos em relação à variabilidade das características de qualidade, foi utilizado o *software* M-E PDG.

3.3.1 M-E PDG: Uma breve descrição

O M-E PDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) é um *software* desenvolvido pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) com o patrocínio da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e pode ser considerado uma das ferramentas mais completas para a previsão de desempenho de pavimentos. O seu princípio de funcionamento é baseado na análise de características dos materiais componentes das camadas do pavimento ao longo da vida de projeto utilizando métodos mecânicos. Em cada iteração, são calculadas as propriedades dos materiais e

os danos induzidos pelas condições climáticas e pelo tráfego correspondente em cada diferencial de tempo acumulados. Previsões de desempenho são feitas a partir de tensões e qualidade de rolamento. Nas seções seguintes serão apresentados rapidamente os ajustes de tráfego realizados.

3.3.1.1 Ajustes no M-E PDG

O primeiro ajuste realizado foi quanto à classificação de veículos comerciais. Tal classificação foi alterada a fim de seguir os padrões empregados pela concessionária que administra a rodovia. Os valores percentuais de veículos comerciais das classes empregadas pela concessionária e as classes equivalentes segundo o M-E PDG encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9: Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela concessionária e pelo M-EPDG

Classe de Veículo Segundo a Concessionária	Classe de Veículo Equivalente no M-E PDG	Porcentagem de Veículos na Classe
2	5	27,22
4	4, 6 e 8	30,89
6	7	5,78
7	9	18,64
8	10	12,91
11, 12, 13, 14 e 15	13	4,56

Os percentuais de veículos comerciais que trafegam sobre a rodovia, de hora em hora, são apresentados na Tabela 10; salienta-se que os horários apresentados referem-se ao início do período.

Tabela 10: Distribuição horária do tráfego comercial

Meia-noite	1,8%	Meio-dia	4,6%
1:00 am	1,3%	1:00 pm	4,9%
2:00 am	1,1%	2:00 pm	5,6%
3:00 am	1,0%	3:00 pm	5,7%
4:00 am	1,4%	4:00 pm	6,0%
5:00 am	2,7%	5:00 pm	6,4%
6:00 am	5,0%	6:00 pm	6,4%
7:00 am	6,2%	7:00 pm	5,5%
8:00 am	5,8%	8:00 pm	4,3%
9:00 am	5,6%	9:00 pm	3,4%
10:00 am	5,5%	10:00 pm	2,6%
11:00 am	5,2%	11:00 pm	2,0%

A estação climática escolhida foi a da Flórida, visto que é o Estado americano cujo clima mais se assemelha ao do Rio Grande do Sul. Como o M-E PDG analisa os efeitos combinados do tráfego (representado pelos fatores de ajuste de tráfego) e do clima, foi necessário defasar os fatores de ajuste em 6 meses, pois quando é inverno nos Estados Unidos é verão no Brasil. Os fatores mensais de ajuste de tráfego, já defasados, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Fatores mensais de ajuste de tráfego

Mês	Classe de Veículo									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Janeiro	1,00	0,92	0,96	0,99	1,00	1,04	0,97	1,00	1,00	1,00
Fevereiro	1,00	0,89	0,96	0,96	1,00	1,03	1,04	1,00	1,00	1,08
Março	1,00	0,96	1,00	1,06	1,00	1,05	1,06	1,00	1,00	1,04
Abril	1,00	1,04	1,12	1,14	1,00	1,09	1,12	1,00	1,00	1,09
Mai	1,00	1,02	1,06	1,13	1,00	1,06	1,13	1,00	1,00	1,13
Junho	1,00	1,29	1,12	1,18	1,00	1,03	1,14	1,00	1,00	1,20
Julho	1,00	1,15	1,07	0,79	1,00	0,87	0,86	1,00	1,00	0,84
Agosto	1,00	1,06	0,96	0,80	1,00	0,83	0,83	1,00	1,00	0,83
Setembro	1,00	0,99	1,00	1,05	1,00	1,02	1,03	1,00	1,00	0,93
Outubro	1,00	0,91	0,93	0,89	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	0,93
Novembro	1,00	0,90	0,92	1,01	1,00	1,04	0,95	1,00	1,00	0,94
Dezembro	1,00	0,86	0,90	1,00	1,00	0,95	0,88	1,00	1,00	0,98

3.3.2 Estrutura do pavimento considerada na análise de sensibilidade

A estrutura do pavimento considerada na análise de sensibilidade do desempenho do revestimento asfáltico em relação à variação das características de qualidade é a mesma estrutura estudada por Vitorello (2008) e Victorino (2008) e é apresentada na Figura 5.



Figura 5: Estrutura do pavimento considerada nesta pesquisa (VICTORINO, 2008)

Através do M-E PDG foi possível variar as porcentagens passantes nas peneira # 3/8", # n4 e # n200, além do teor de ligante e do volume de vazios e verificar as mudanças na evolução do afundamento em trilhas de roda e porcentagem de área trincada do revestimento. Os parâmetros de projeto da mistura asfáltica analisada são apresentadas na Tabela 12, trata-se da mistura do Projeto 5.

Tabela 12: Parâmetros de projeto da mistura asfáltica escolhida para a análise de sensibilidade

CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE	PARÂMETRO DE PROJETO
# 3/8" (% passante)	85,8
# n4 (% passante)	59,8
# n200 (% passante)	6,2
TL (%)	5,9
V _v (%)	4,3

Salienta-se que para as peneiras # 3/8" e # n4, os parâmetros de entrada no *software* são as porcentagens retidas acumuladas. Para o teor de ligante, o parâmetro de entrada é o vazios cheios com betume (VCB). Ambos se relacionam através da Equação 7.

$$VCB = \frac{G_{mb}}{G_a} TL \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

G_{mb} é a massa específica aparente da mistura;

G_a é a densidade real do asfalto.

Para o volume de vazios, o M-E PDG considera o valor logo após a execução, que deve ser um tanto maior que o de projeto, considerando que haverá uma compactação posterior devido ao tráfego. O *default* do *software* considera que este volume de vazios é de 7% e este valor foi mantido nesta pesquisa.

A mistura foi executada com ligante convencional CAP 50-70, com penetração de 52 (0,1mm). No M-E PDG foi considerado o intervalo de penetração de 40-50, visto que o intervalo seguinte é o 60-70.

4. ANÁLISE DOS DADOS

Neste Capítulo são apresentados os resultados desta pesquisa. Com base no banco de dados formado, foram determinadas as variabilidades de quatro características de qualidade: porcentagens passantes nas peneiras # 3/8", # n4 e # n200 e o teor de ligante. O objetivo desta etapa foi a determinação do nível de qualidade com que as misturas foram produzidas, de acordo com os parâmetros de variabilidade destas características. Finalmente, foi feita uma análise de sensibilidade verificando a influência da variação de tais características no desempenho do concreto asfáltico em termos de deformação permanente e trincamento por fadiga.

4.1 ANÁLISE DA VARIABILIDADE

4.1.1 Variabilidade do processo

4.1.1.1 Porcentagem passante na peneira # 3/8"

Na Tabela 13 e na Figura 6 são apresentados os desvios padrões que representam a variabilidade do processo para a porcentagem passante na peneira # 3/8".

Tabela 13: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # 3/8"

PROJETO	N_i	$S_{\text{PROCESSO } i}$
1	163	1,9295
2	4	0,5000
3	4	0,9215
4	57	2,0041
5	10	0,9503
6	67	2,3508
7	403	2,1145
8	33	1,5581
9	4	1,2685
10	115	2,2679
11	7	2,0185
12	65	3,0795

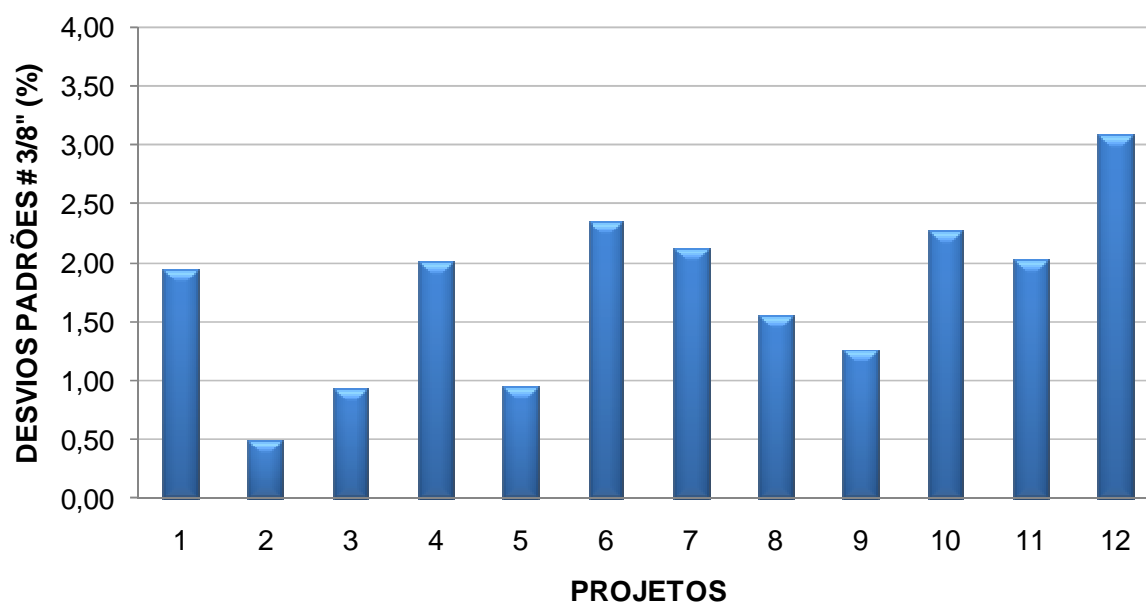


Figura 6: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # 3/8"

4.1.1.2 Porcentagem passante na peneira # n4

Na Tabela 14 e na Figura 7 são apresentados os desvios padrões que representam a variabilidade do processo para a porcentagem passante na peneira # n4.

Tabela 14: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n4

PROJETO	N_i	$S_{\text{PROCESSO } i}$
1	163	2,2710
2	4	0,9341
3	4	1,8822
4	57	3,8243
5	10	2,4610
6	67	2,2714
7	403	2,1656
8	33	0,7632
9	4	1,3672
10	115	1,1751
11	7	1,5078
12	65	3,4166

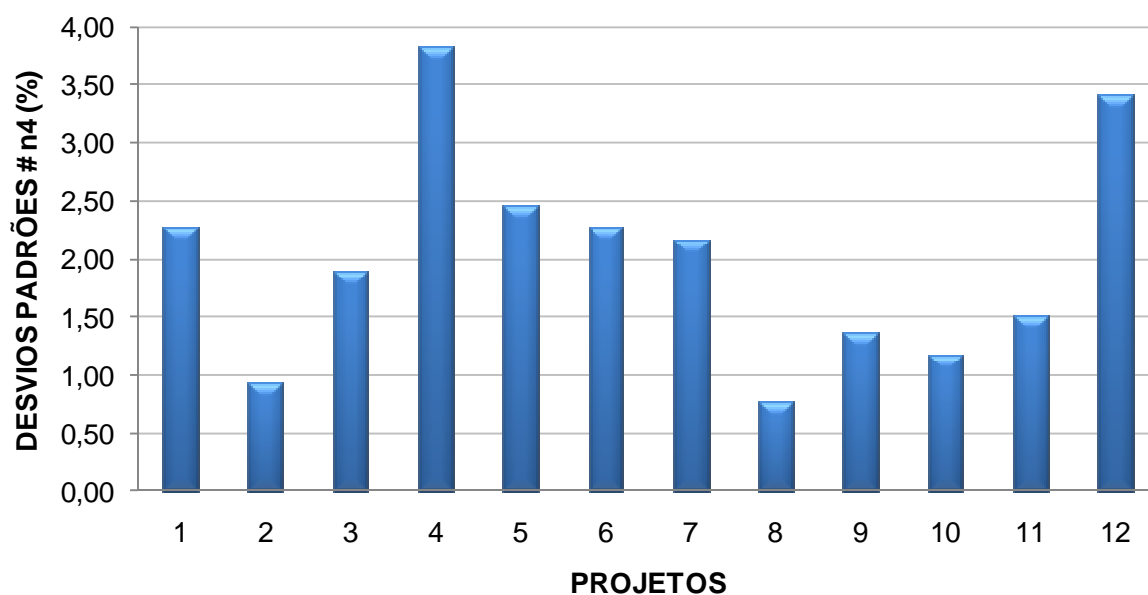


Figura 7: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n4

4.1.1.3 Porcentagem passante na peneira # n200

Na Tabela 15 e na Figura 8 são apresentados os desvios padrões que representam a variabilidade do processo para a porcentagem passante na peneira # n200.

Tabela 15: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n200

PROJETO	N_i	$S_{\text{PROCESSO } i}$
1	163	0,5887
2	4	0,4551
3	4	0,3183
4	57	0,4961
5	10	0,5162
6	67	0,5418
7	403	0,7326
8	33	0,5729
9	4	0,2380
10	115	0,6671
11	7	0,6499
12	65	0,7521

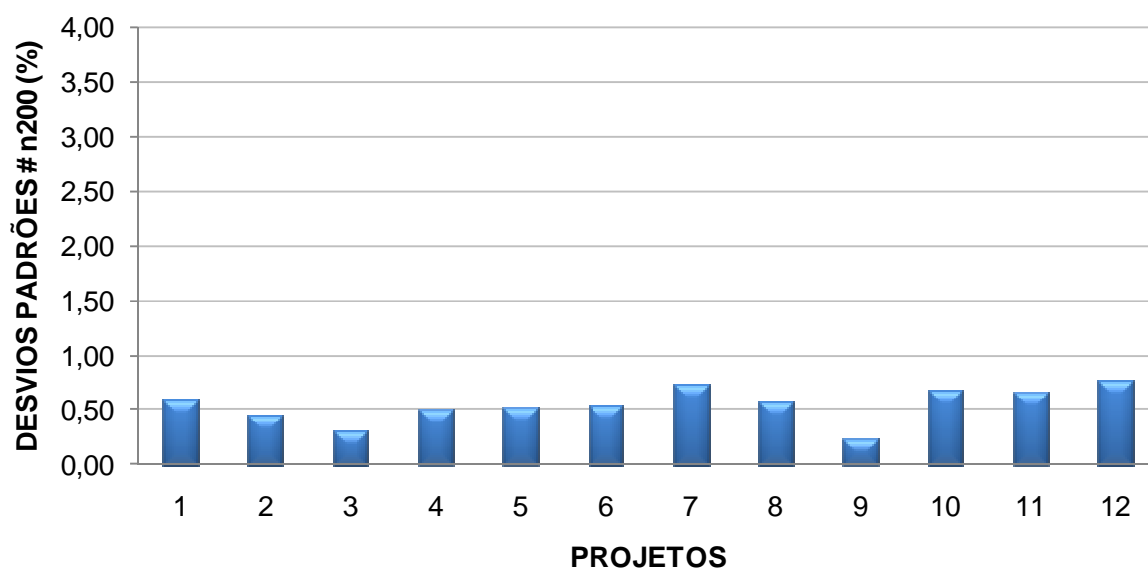


Figura 8: Desvios padrões das medidas das porcentagens passantes na peneira # n200

4.1.1.4 Teor de ligante

Na Tabela 16 e na Figura 9 são apresentados os desvios padrões que representam a variabilidade do processo para o teor de ligante.

Tabela 16: Desvios padrões das medidas dos teores de ligante TL

PROJETO	N_i	$S_{\text{PROCESSO } i}$
1	163	0,1699
2	4	0,1803
3	5	0,4984
4	57	0,0983
5	10	0,1096
6	67	0,1114
7	406	0,1477
8	33	0,0869
9	4	0,3146
10	115	0,0761
11	7	0,0350
12	65	0,1049

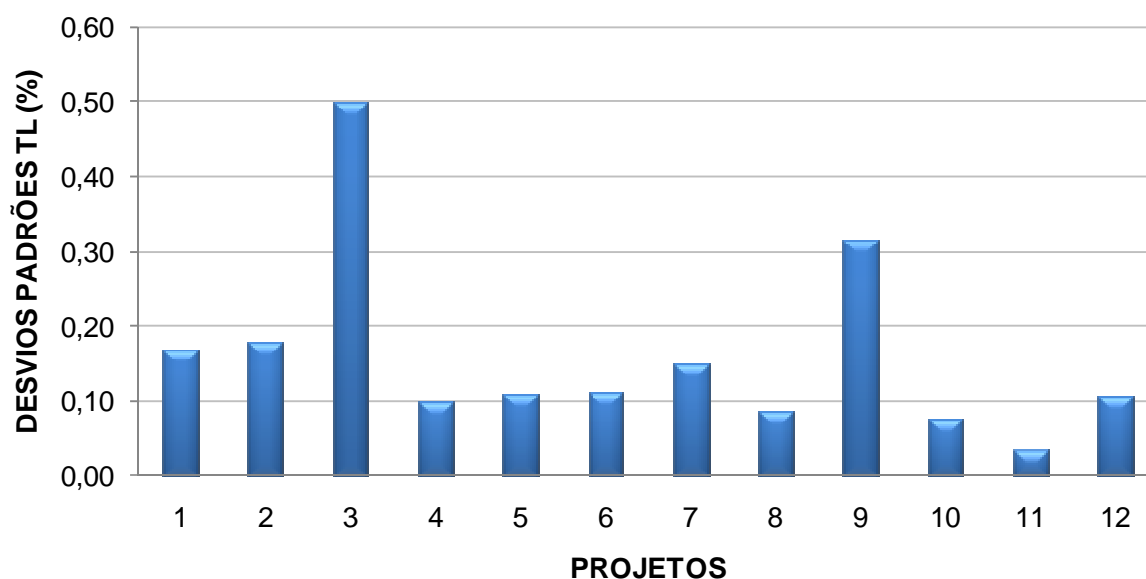


Figura 9: Desvios padrões das medidas dos teores de ligante TL

Através da análise dos desvios padrões apresentados nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 e representados graficamente nas Figuras 6, 7, 8 e 9, percebe-se que as variabilidades entre os projetos são bastante distintas para todas as características de qualidade. Para a porcentagem passante na peneira # 3/8" o menor valor é igual a 0,5000 (P2) e o maior igual a 3,0795 (P12). Para a porcentagem passante na peneira # n4 o intervalo de valores é de 0,7632 (P8) e 3,8243 (P4). Para a porcentagem passante na peneira # n200, os desvios padrões variam de 0,2380 (P9) até 0,7521 (P12). Para o teor de ligante, o valor mínimo é 0,0350 (P11) e o valor máximo é 0,4984 (P3). As variabilidades do processo para as quatro características de qualidade analisadas, considerando este universo de projetos, são apresentadas na Tabela 17. Para as peneiras, 9 projetos possuem variabilidades menores que o valor de desvio padrão adotado para quantificar as variabilidades do processo. No caso do teor de ligante, este número cai para 7.

Tabela 17: Variabilidades do processo das características de qualidade

	# 3/8"	# n4	# n200	TL
S_{PROCESSO}	2,1624	2,3056	0,6663	0,1395

4.1.2 Variabilidade da precisão

4.1.2.1 Porcentagem passante na peneira # 3/8"

Na Tabela 18 e na Figura 10 são apresentadas as diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # 3/8".

Tabela 18: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # 3/8"

PROJETO	N_i	$\overline{\Delta X_i}$
1	163	-0,679
2	4	2,900
3	4	3,925
4	57	-1,179
5	10	-1,010
6	67	2,354
7	403	0,599
8	33	0,858
9	4	-1,875
10	115	0,718
11	7	-1,100
12	65	-2,575

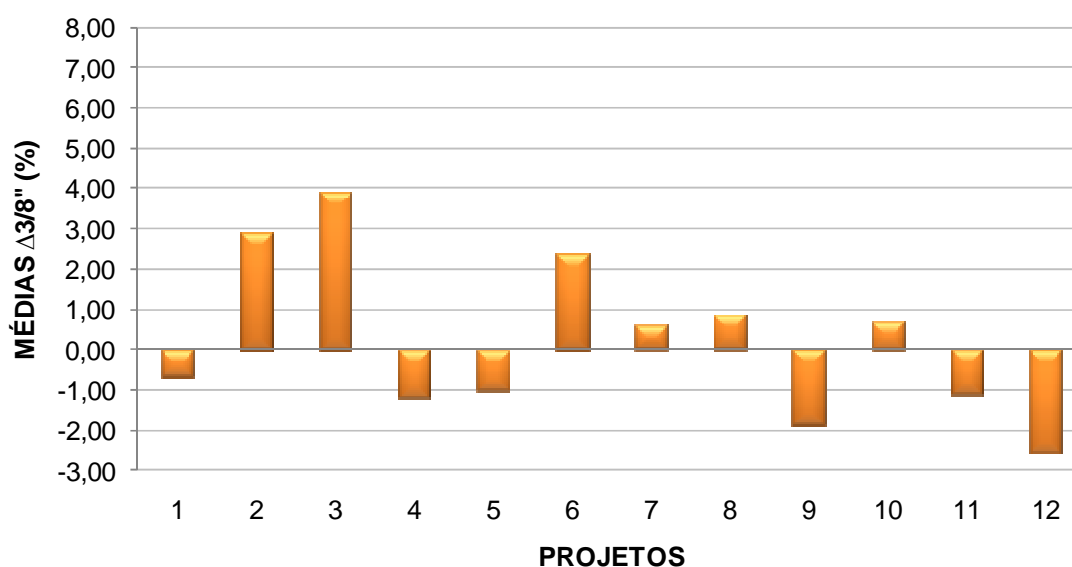


Figura 10: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # 3/8"

4.1.2.2 Porcentagem passante na peneira # n4

Na Tabela 19 e na Figura 11 são apresentadas as diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n4.

Tabela 19: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n4

PROJETO	N_i	ΔX_i
1	163	3,789
2	4	5,525
3	4	1,825
4	57	7,581
5	10	2,820
6	67	-0,713
7	403	3,135
8	33	1,482
9	4	2,175
10	115	3,007
11	7	1,371
12	65	2,520

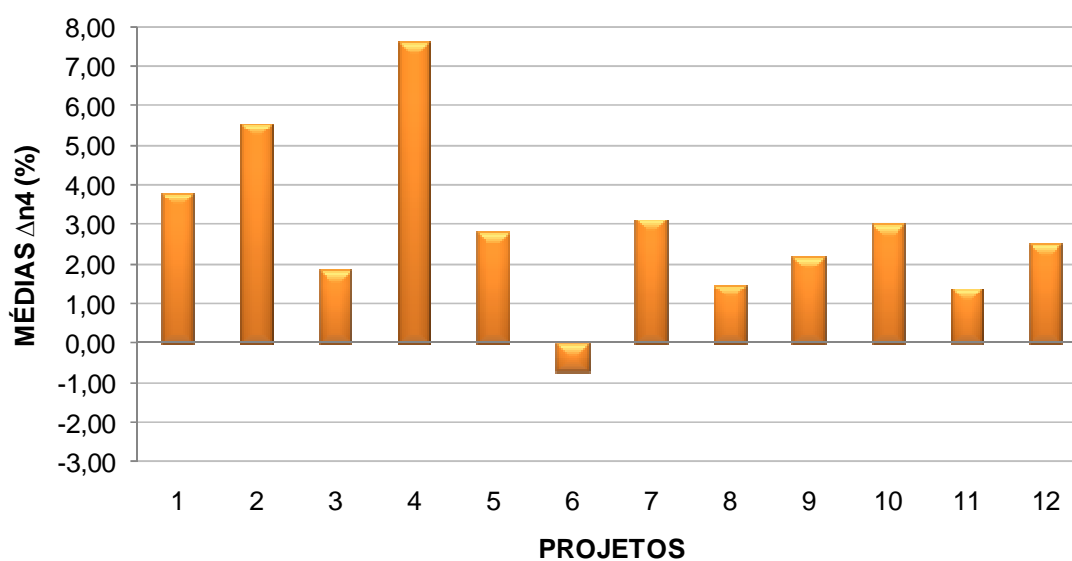


Figura 11: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n4

4.1.2.3 Porcentagem passante na peneira # n200

Na Tabela 20 e na Figura 12 são apresentadas as diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n200.

Tabela 20: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n200

PROJETO	N_i	$\overline{\Delta X}_i$
1	163	-0,339
2	4	-2,618
3	4	-2,378
4	57	0,379
5	10	-0,037
6	67	-0,806
7	403	-0,392
8	33	-0,200
9	4	1,850
10	115	1,908
11	7	1,471
12	65	-0,666

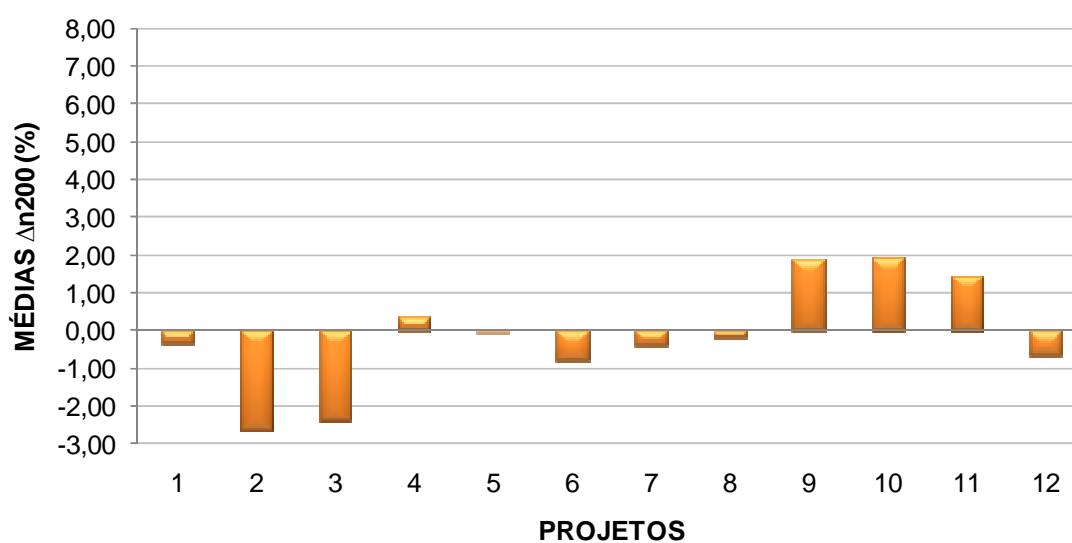


Figura 12: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto das porcentagens passantes na peneira # n200

4.1.2.4 Teor de ligante

Na Tabela 21 e na Figura 13 são apresentadas as diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto dos teores de ligante.

Tabela 21: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto dos teores de ligante

PROJETO	N_i	ΔX_i
1	163	-0,022
2	4	0,015
3	5	0,264
4	57	-0,124
5	10	0,086
6	67	0,026
7	406	-0,134
8	33	0,057
9	4	0,210
10	115	-0,166
11	7	-0,229
12	65	0,089

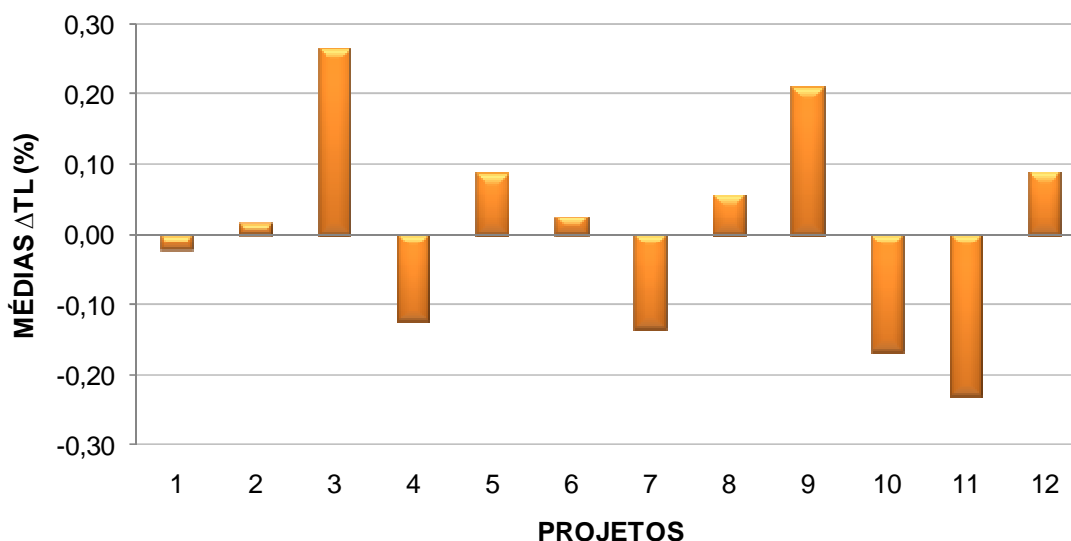


Figura 13: Diferenças entre os valores médios medidos e os parâmetros de projeto dos teores de ligante

As diferenças entre os valores médios das medidas das características de qualidade e os respectivos parâmetros de projeto para a porcentagem passante na peneira # 3/8" estão no intervalo de -2,575 (P12) a 3,925 (P3), para a porcentagem passante na peneira # n4 a variação está entre os valores de -0,713 (P6) e 7,581 (P4), para a porcentagem passante na peneira # n200 as diferenças variaram de -2,618 (P2) a 1,908 (P10) e para o teor de ligante o intervalo é entre -0,229 (P11) e 0,264 (P3). As discrepâncias apresentadas nestas diferenças indicam que a variabilidade da precisão é uma importante parcela da variabilidade total das características de qualidade, o que pode ser comprovado através dos valores dos desvios padrões apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Variabilidades da precisão

	# 3/8"	# n4	# n200	TL
S_{PRECISÃO}	2,0108	2,1081	1,4460	0,1497

4.1.3 Variabilidades das características de qualidade

Determinadas as variabilidades do processo e da precisão, determinou-se então as variabilidades das características de qualidade, apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23: Variabilidades das características de qualidade

	# 3/8"	# n4	# n200	TL
S_{CQ}	2,9528	3,1241	1,5921	0,2047

O conhecimento da variabilidade total das características de qualidade das misturas asfálticas é fundamental para a avaliação do nível de qualidade no qual estas estão sendo produzidas atualmente.

A primeira consideração feita, diz respeito aos limites de controle condizentes com a variabilidade apresentada pelas características de qualidade analisadas. Considerando que um nível de qualidade aceitável pode ser estabelecido para uma característica onde 90% de suas medidas estejam em conformidade com os limites de tolerância, está-se considerando que esta característica possui uma população centrada no seu parâmetro de projeto e possui um desvio padrão igual a sua variabilidade total S_{CQ} . O valor de 90% é arbitrário, mas é comumente adotado para estabelecer os limites de controle ou de aceitação em especificações rodoviárias (Burati, 2005). Para uma distribuição normal, dizer que 90% de uma população está dentro dos limites significa que o afastamento em relação à média é de $\pm zS_{CQ}$, onde z é a variável normal padronizada e para 90% é igual a 1,645. A Figura 14 ilustra esta consideração.

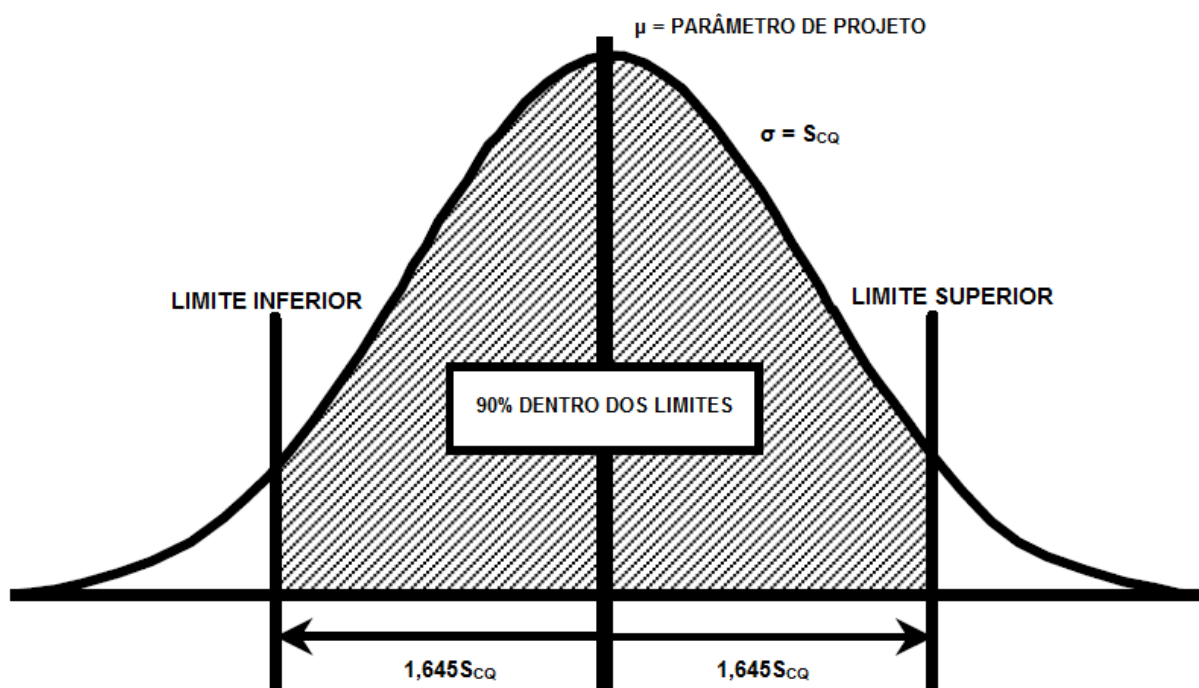


Figura 14: Característica de qualidade com 90% da população entre os limites especificados (Adaptado de Burati *et al.*, 2003)

Multiplicando os desvios padrões que medem as variabilidades totais das características de qualidade por 1,645, são estabelecidos os limites de controle apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Limites de controle para as características de qualidade

CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE	LIMITES (%)
# 3/8" (% passante)	$\pm 4,86$
# n4 (% passante)	$\pm 5,14$
# n200 (% passante)	$\pm 2,62$
TL (%)	$\pm 0,34$

A comparação dos limites estabelecidos na Tabela 24 com os limites especificados nas normas do DNIT são um indício de que as misturas asfálticas estão sendo produzidas com nível de qualidade inferior ao preconizado. Apenas o limite estabelecido para a porcentagem passante na peneira # 3/8" foi inferior ao limite já especificado (salienta-se que para esta peneira o intervalo de tolerância é de $\pm 7,0\%$).

Com o propósito de avaliar a porcentagem de material (mistura asfáltica) que é produzida em conformidade com o nível de qualidade condizente com os limites de tolerância especificados pelo DNIT, foram divididos os valores destes limites pelo valor da variabilidade total da característica de qualidade correspondente, determinando assim os valores z para estas características. Determinadas as variáveis normais padronizadas, pode-se aferir a porcentagem de cada característica que está dentro dos limites. No Anexo A é apresentada a Tabela Normal Padronizada. Os valores de z e da porcentagem dentro dos limites são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25: Porcentagem dentro dos limites de cada característica de qualidade

CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE	LIMITES DO DNIT	z	PORCENTAGEM DENTRO DO LIMITES
# 3/8" (% passante)	$\pm 7,0\%$	2,37	98
# n4 (% passante)	$\pm 5,0\%$	1,60	89
# n200 (% passante)	$\pm 2,0\%$	1,26	79
TL (%)	$\pm 0,3\%$	1,47	86

A conclusão a que se chega através da análise dos valores apresentados na Tabela 25 é que o nível de qualidade de 3 destas características está abaixo do nível de qualidade comumente adotado como aceitável, onde 90% da população de cada característica deve estar compreendido entre os limites.

4.1.4 Comentários gerais a respeito da análise da variabilidade

Nesta seção foram avaliadas as variabilidades totais das características de qualidade. Concluiu-se que as porcentagens passantes nas peneiras # n4 e # n200 e o teor de ligante estão com um nível de qualidade inferior ao comumente adotado como aceitável. Apenas a porcentagem passante na peneira # 3/8" está com nível de qualidade superior, característica na qual o intervalo de tolerância também é superior ao das demais.

Através da comparação entre os valores apresentados na Tabela 22 e os apresentados na Tabela 17, percebe-se que os desvios padrões que quantificam a variabilidade da precisão possuem valores muito próximos aos que quantificam a variabilidade do processo. Para a porcentagem passante na peneira # n200 o desvio padrão da precisão é, inclusive, maior que o dobro do desvio padrão do processo. Isso comprova a importância de considerar esta parcela na determinação da variabilidade total das características de qualidade e denuncia a dificuldade dos empreiteiros em centrarem suas produções nos parâmetros de projeto.

4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nesta seção é apresentada a análise de sensibilidade do desempenho dos revestimentos asfálticos à variação das características de qualidade, realizada com o auxílio do *software* M-E PDG. Foram atribuídos incrementos aos parâmetros de projeto de cada uma das características analisadas a fim de verificar as perdas ou ganhos em termos de afundamento em trilhas de roda e porcentagem de área trincada. Optou-se por realizar uma análise adicional, variando apenas o volume de vazios, devido a grande influência desta característica no desempenho dos revestimentos. Os incrementos atribuídos são designados pela letra grega Δ . As diferenças entre os parâmetros de desempenho (ATR e TR) para as misturas que sofreram variações nas características e para a mistura sem variações foram avaliadas através de diferenças percentuais. Admitiu-se um valor aceitável máximo de 7mm para ATR (ARTESP) e de 20% para TR (considerando apenas o trincamento por fadiga).

4.2.1 Porcentagem passante na peneira # 3/8"

Os incrementos atribuídos para a porcentagem passante na peneira # 3/8" de projeto foram de $\pm 5\%$ (limite com valor próximo ao do verificado Tabela 24), $\pm 7\%$ (limite especificado pelo DNIT) e $\pm 9\%$ (incremento que extrapola o valor dos incrementos anteriores). As evoluções do ATR e da TR para as 6 misturas são apresentadas nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

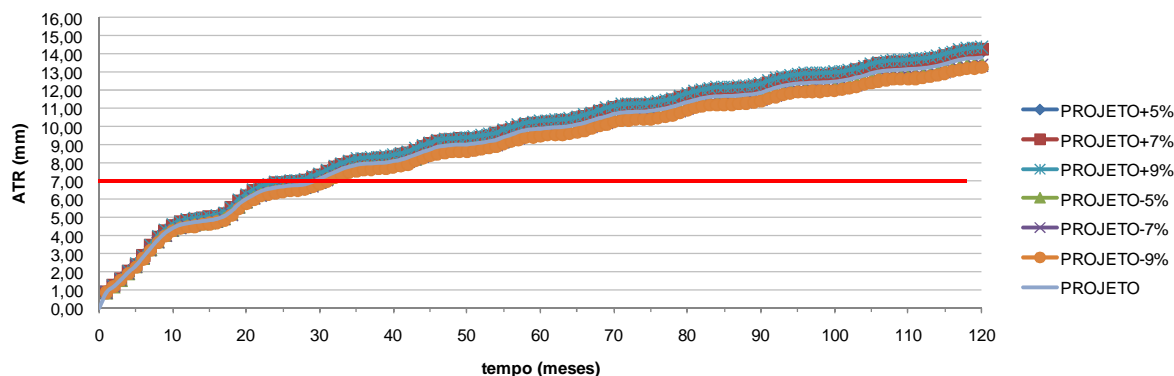


Figura 15: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"

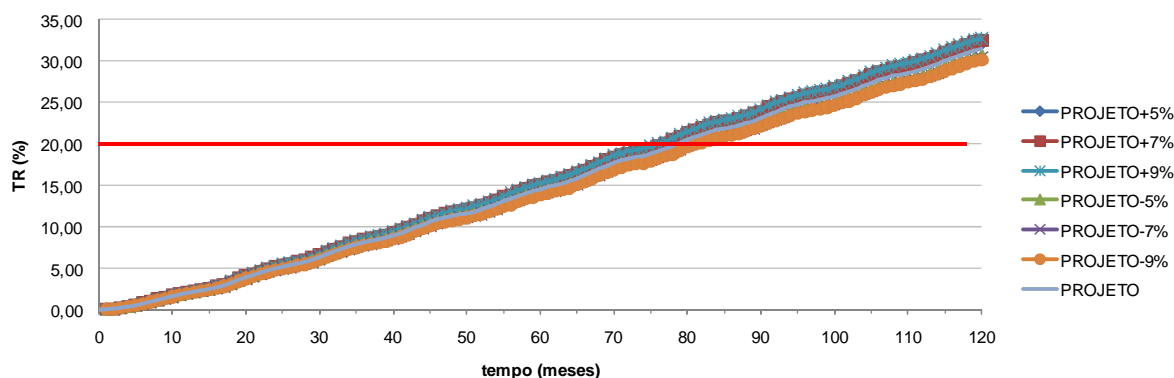


Figura 16: Evolução da TR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"

Os incrementos positivos foram prejudiciais para os dois parâmetros de desempenho analisados. Contudo, considerando que estes parâmetros alcançaram os valores limites admissíveis aos 30 meses para ATR e aos 79 meses para TR na mistura sem variações, não houve uma redução significativa destes tempos devido aos incrementos atribuídos. Para a variação de +9%, ATR alcança o valor admissível com 4 meses de antecedência e TR com 3. Os tempos, em meses, para que os valores admissíveis sejam alcançados são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando a porcentagem passante na peneira # 3/8"

	$\Delta=-9\%$	$\Delta=-7\%$	$\Delta=-5\%$	PROJETO	$\Delta=+5\%$	$\Delta=+7\%$	$\Delta=+9\%$
$t_{ATR=7mm}$	31	31	31	30	29	28	26
$t_{TR=20\%}$	82	81	80	79	78	77	76

As magnitudes das perdas e dos ganhos no desempenho podem ser verificadas nas Figuras 17 e 18 para ATR e TR, respectivamente.

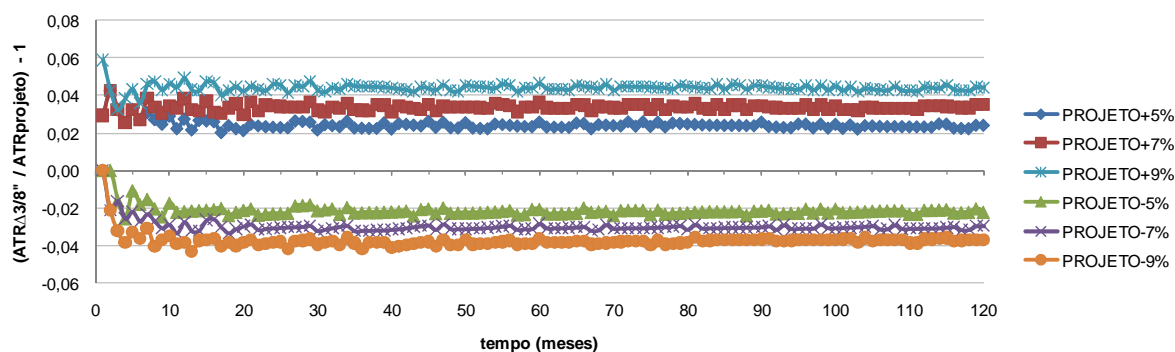


Figura 17: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"

A razão entre os valores de ATR para as misturas com variação e os valores de ATR para a mistura sem variação da porcentagem passante na peneira # 3/8" é praticamente constante, visto que as suas diferenças percentuais praticamente não variam ao longo do período de tempo considerado na análise. Os valores médios das diferenças percentuais são iguais a 2,4%, 3,4% e 4,4% para os incrementos de +5%, +7% e +9%, respectivamente.

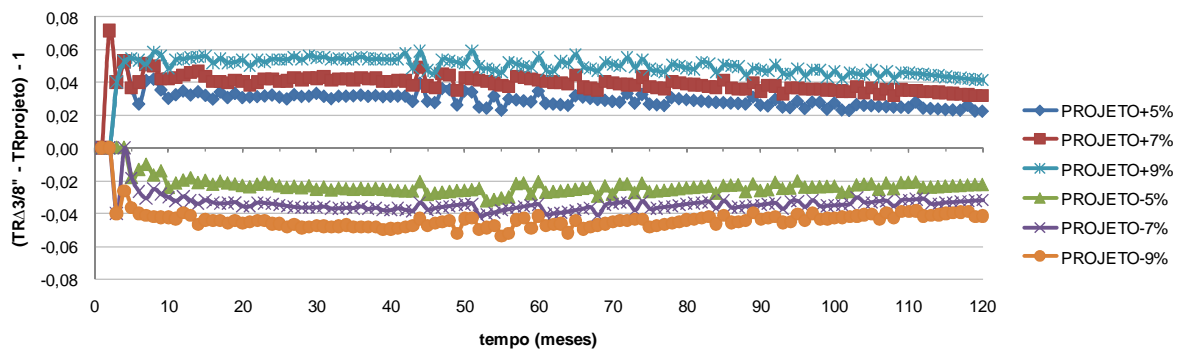


Figura 18: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # 3/8"

As diferenças percentuais são praticamente constantes até o mês 45 apresentando uma leve tendência de diminuição posterior. Quando TR atinge o valor de 20%, as diferenças percentuais são iguais a 3,0%, 3,6% e 4,7% para os incrementos de +5%, +7% e +9%.

4.2.2 Porcentagem passante na peneira # n4

Os incrementos atribuídos à porcentagem passante na peneira # n4 de projeto foram de $\pm 5\%$ (limite especificado pelo DNIT), $\pm 6\%$ (como a diferença entre o valor limite verificado na Tabela 24 e o limite especificado pelo DNIT foi de 0,14%, optou-se por um incremento maior nesta análise) e $\pm 7\%$ (incremento que extrapola o valor dos incrementos anteriores). As evoluções dos parâmetros de desempenho para as misturas estes incrementos são apresentadas nas Figuras 19 e 20 para ATR e TR, respectivamente.

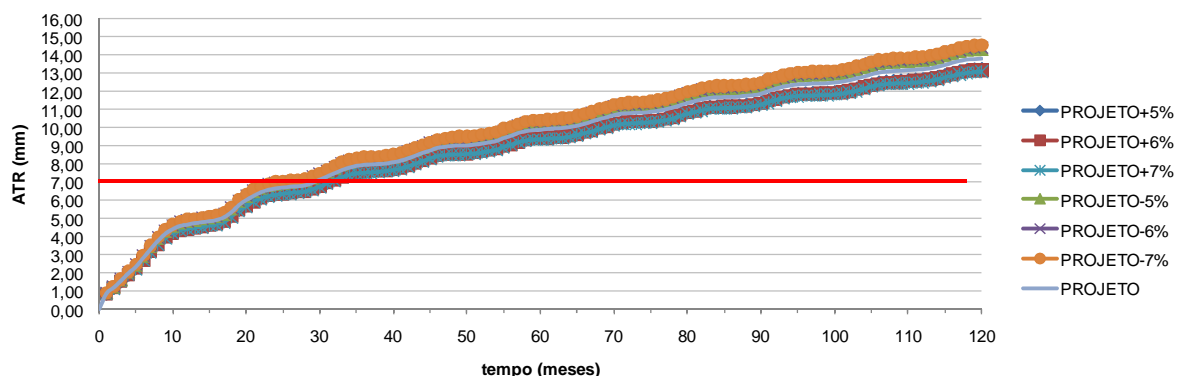


Figura 19: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n4

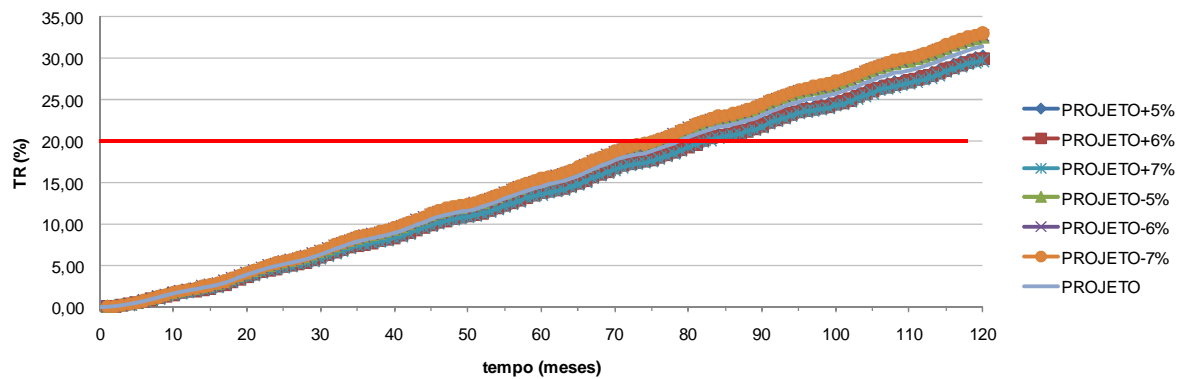


Figura 20: Evolução da TR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n4

Os incrementos negativos na porcentagem passante na peneira # n4 foram os que ocasionaram perdas de desempenho do revestimento asfáltico, para ambos parâmetros considerados. Houve uma diminuição maior nos tempos para que ATR e TR atinjam os limites admissíveis. Para o maior incremento atribuído, de -7%, ATR alcança o valor de 7mm com 6 meses de antecedência e TR alcança o valor de 20% 3 meses antes. Os tempos, em meses, para que estes parâmetros atinjam seus valores admissíveis são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando a porcentagem passante na peneira # n4

	$\Delta=-7\%$	$\Delta=-6\%$	$\Delta=-5\%$	PROJETO	$\Delta=+5\%$	$\Delta=+6\%$	$\Delta=+7\%$
$t_{ATR=7mm}$	24	25	27	30	31	32	32
$t_{TR=20\%}$	76	76	77	79	82	82	83

As diferenças percentuais que comparam a evolução dos parâmetros de desempenho entre as misturas com e sem incrementos na porcentagem passante na peneira # n4 são apresentadas nas Figuras 21 e 22 para ATR e TR, respectivamente.

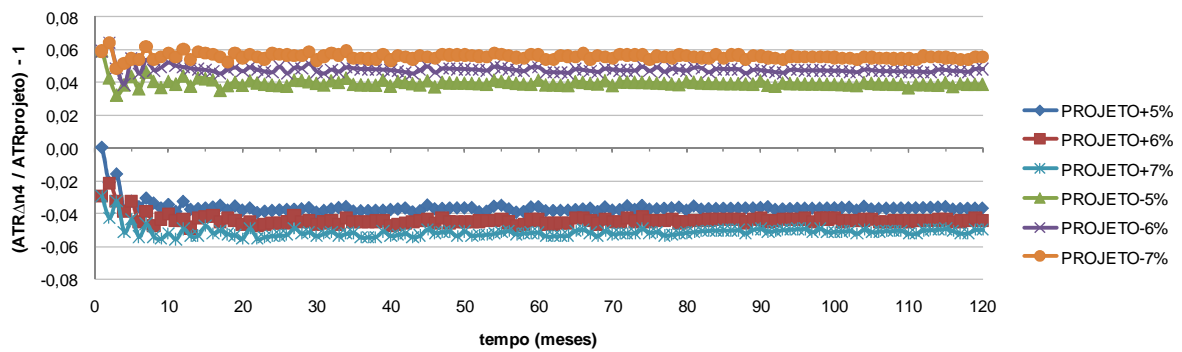


Figura 21: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n4

Os valores médios das diferenças percentuais para os incrementos de -5%, -6% e -7% são iguais a 3,9%, 4,8% e 5,6, respectivamente.

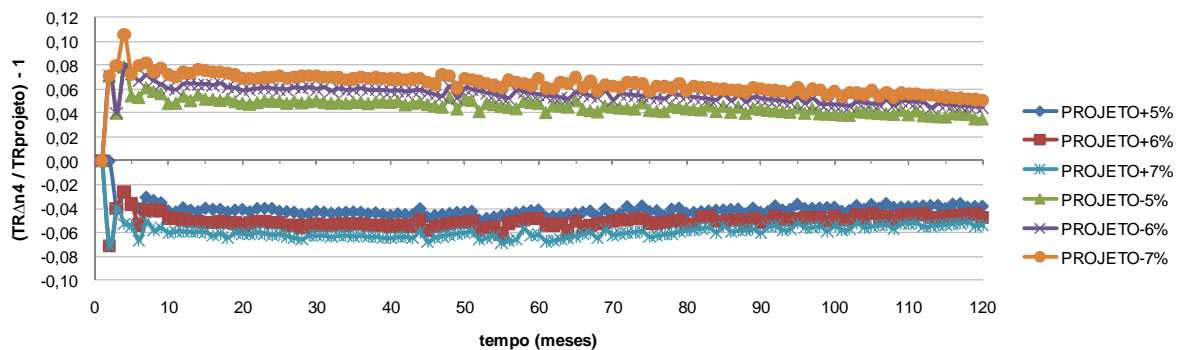


Figura 22: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n4

A tendência de diminuição nos valores das diferenças percentuais depois de um período de constância também foi observada para os incrementos na porcentagem passante na peneira # n4, mas a partir do mês 50 aproximadamente. Quando atingido o valor admissível de 20%, as diferenças percentuais são iguais a 4,1%, 5,2% e 6,3% para os incrementos de -5%, -6% e -7%, respectivamente.

4.2.3 Porcentagem passante na peneira # n200

Os incrementos atribuídos à porcentagem passante na peneira # n200 de projeto foram de $\pm 2\%$ (limite especificado pelo DNIT), $\pm 3\%$ (limite com valor próximo ao do verificado na Tabela 24) e $\pm 4\%$ (incremento que extrapola o valor dos incrementos anteriores). A

evolução do ATR e da TR para as misturas com estes incrementos é apresentada nas Figuras 23 e 24, respectivamente.

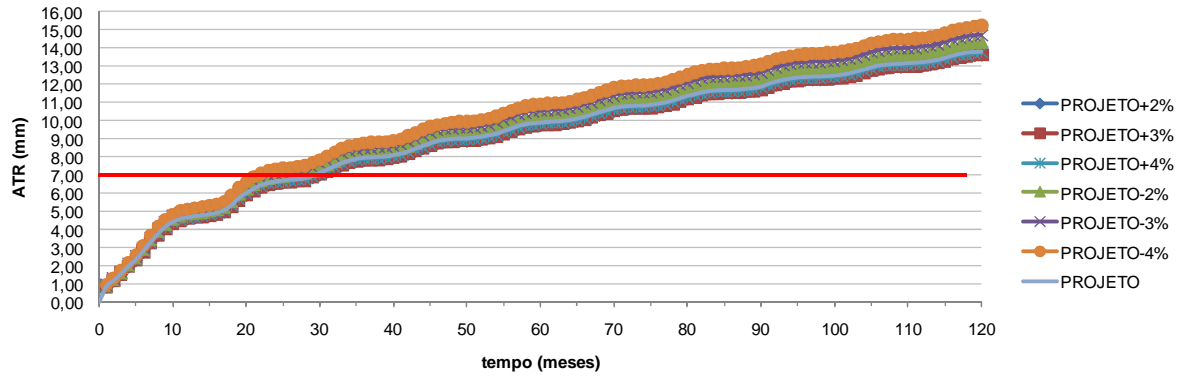


Figura 23: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n200

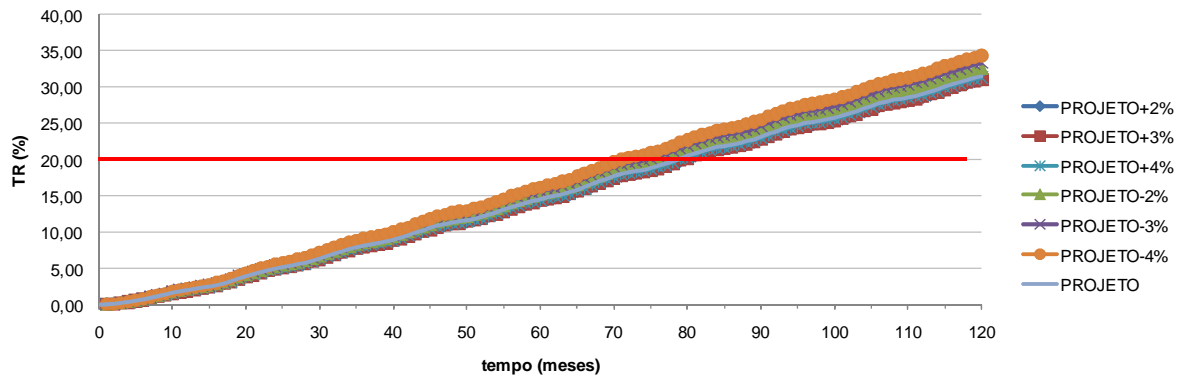


Figura 24: Evolução da TR, para a mistura com incrementos na porcentagem passante na peneira # n200

Os incrementos negativos na porcentagem passante na peneira # n200, ou seja, menores quantidades de pó (*dust*) na mistura, aumentam a susceptibilidade ao ATR e a TR. Para uma variação de -4%, ambos os parâmetros de desempenho atingem seus valores admissíveis com 8 meses de antecedência, a diferença é que ATR atinge no mês 22 e TR no mês 71. Os tempos, em meses, para que os parâmetros de desempenho analisados atinjam os valores admissíveis são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando a porcentagem passante na peneira # n200

	$\Delta=-4\%$	$\Delta=-3\%$	$\Delta=-2\%$	PROJETO	$\Delta=+2\%$	$\Delta=+3\%$	$\Delta=+4\%$
$t_{ATR=7mm}$	22	23	27	30	30	30	30
$t_{TR=20\%}$	71	75	77	79	79	80	80

As diferenças percentuais entre os parâmetros de desempenho para as misturas com e sem variação na porcentagem passante na peneira # n200 são apresentadas nas Figuras 25 e 26 para ATR e TR, respectivamente.

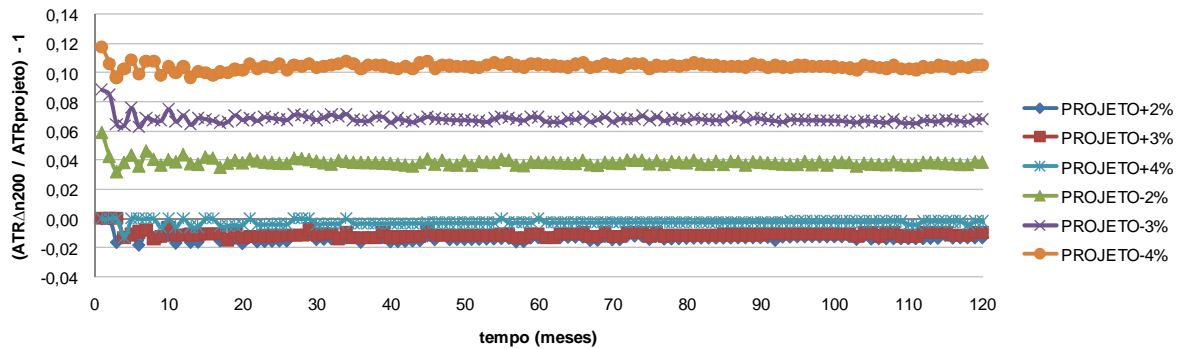


Figura 25: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n200

As diferenças percentuais para o ATR são, em média, iguais a 3,9%, 6,8% e 10,4% para os incrementos de -2%, -3% e -4%, respectivamente.

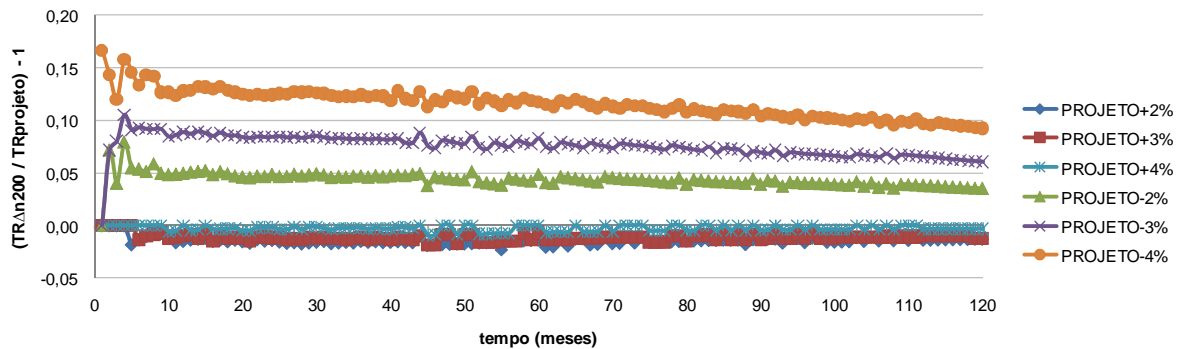


Figura 26: Diferenças percentuais entre os TR decorrentes dos incrementos na porcentagem passante na peneira # n200

A tendência de valores decrescentes para as diferenças percentuais, depois de um período de quase constância, foi novamente percebida a partir do mês 45 aproximadamente. Ao atingir o valor limite de 20%, as diferenças percentuais são iguais a 4,1%, 7,4% e 11,1% para os incrementos de -2%, -3% e -4%, respectivamente.

Quanto aos incrementos positivos, percebe-se que para os incrementos de +2% e +3% os parâmetros de desempenho possuem diferenças percentuais com valores bastante próximos (-1,3% e -1,1% para ATR e -1,4% e -1,1% para TR) e para o incremento de +4% os valores das diferenças percentuais são, em média, quase iguais a zero (-0,24% para ATR e -0,28% para TR), indicando que para este incremento a evolução dos parâmetros de desempenho não se diferencia muito da evolução dos mesmos para a mistura sem variações. A tendência de melhora na trabalhabilidade e estabilidade das misturas com o aumento da porcentagem passante na peneira # n200 até certo ponto, a partir do qual começam a ser prejudicadas foi explicada na revisão bibliográfica.

4.2.4 Teor de ligante

Os incrementos atribuídos ao teor de ligante de projeto foram de $\pm 0,3\%$ (limite especificado pelo DNIT), $\pm 0,4\%$ (como a diferença entre o valor limite verificado na Tabela 24 e o limite especificado pelo DNIT foi de 0,04%, optou-se por um incremento maior nesta análise) e $\pm 0,5\%$ (incremento que extrapola o valor dos incrementos anteriores). Nas Figuras 27 e 28 são apresentados gráficos com a evolução do ATR e da TR para as misturas com incrementos no teor de ligante, respectivamente.

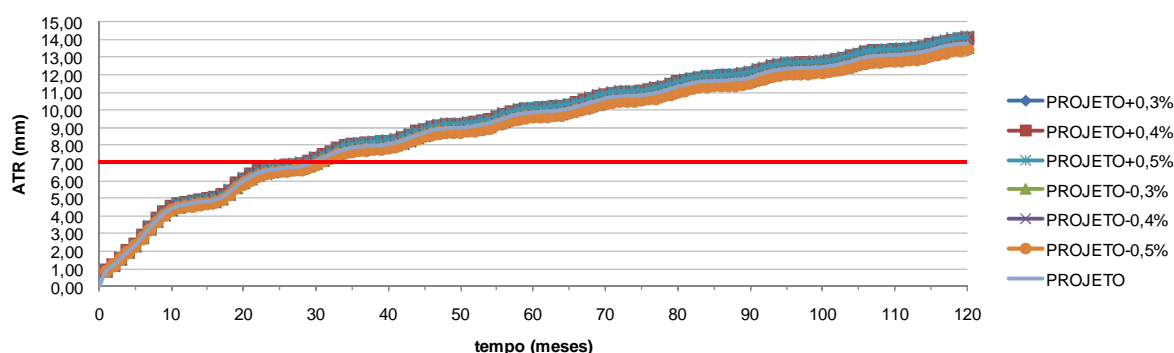


Figura 27: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos no teor de ligante

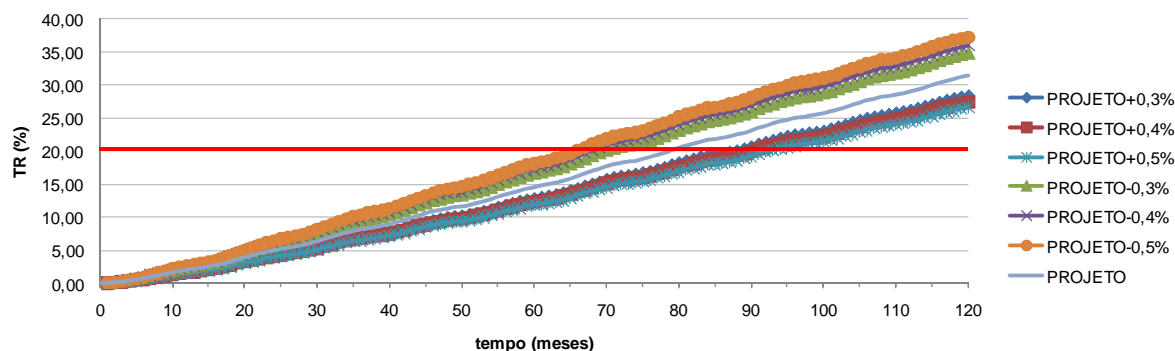


Figura 28: Evolução da TR, para a mistura com incrementos no teor de ligante

Os incrementos positivos no teor de ligante, ou seja, excesso de ligante na mistura, aumentam a susceptibilidade do revestimento asfáltico ao ATR. Em contrapartida, a evolução da TR é agravada pelos incrementos negativos. Não há diferenças consideráveis nos tempos em que o ATR leva para atingir o valor admissível de 7,0mm. Para a TR, em compensação, uma variação de -0,3% no teor de ligante, o menor incremento atribuído, faz com que o valor limite de 20% seja alcançado com 9 meses de antecedência. Quando o incremento é de -0,5%, a antecedência é de mais de 1 ano. Os tempos, em meses, para que sejam atingidos os valores admissíveis de ATR e TR para todas as configurações estudadas são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando o TL

	$\Delta=-0,5\%$	$\Delta=-0,4\%$	$\Delta=-0,3\%$	PROJETO	$\Delta=+0,3\%$	$\Delta=+0,4\%$	$\Delta=+0,5\%$
$t_{ATR=7mm}$	31	31	31	30	29	29	29
$t_{TR=20\%}$	66	68	70	79	88	91	93

Nas Figura 29 e 30 são apresentadas as diferenças percentuais entre os parâmetros de desempenho para as misturas com e sem variações no teor de ligante, para ATR e TR, respectivamente.

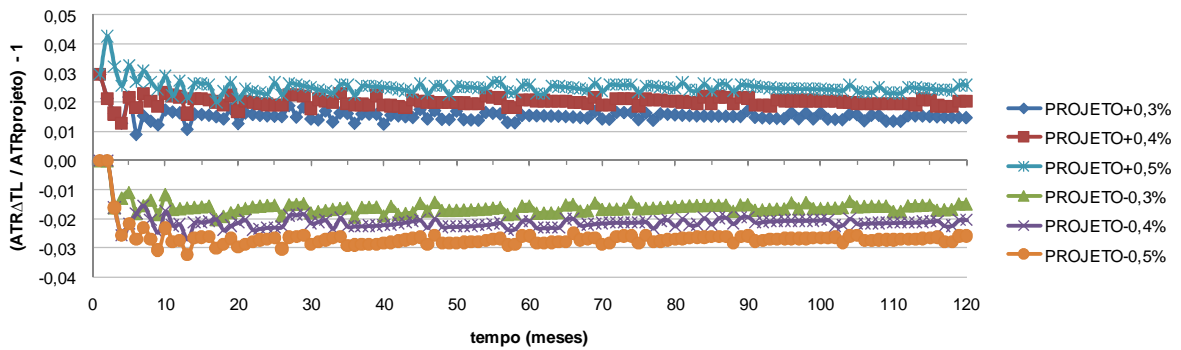


Figura 29: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos no teor de ligante

Um incremento de +0,3% no teor ótimo faz com que o ATR seja aproximadamente 1,5% maior do que o ATR da mistura sem variação. Para os incrementos de +0,4% e +0,5%, o ATR é em média 2,0% e 2,5% maior, respectivamente, evidenciando a tendência de aumento da susceptibilidade para valores teores de ligante maiores.

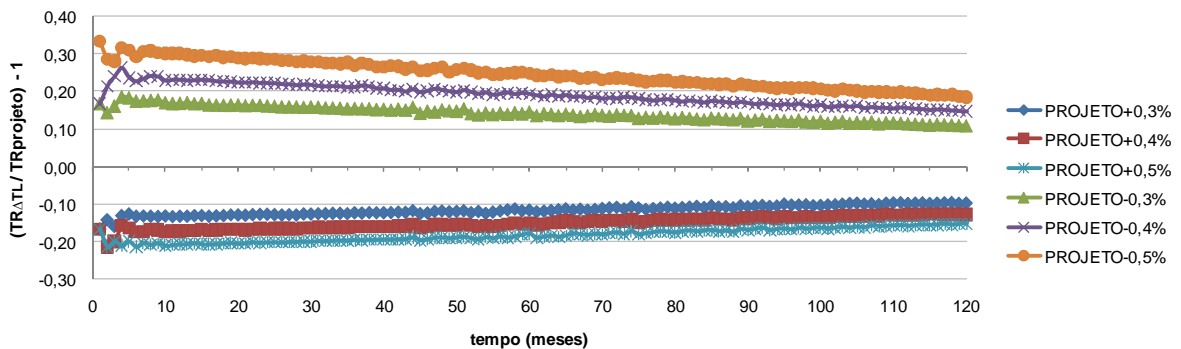


Figura 30: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos no teor de ligante

Quanto à evolução da TR, as diferenças percentuais possuem valores máximos no início do período e decrescem ao longo do tempo. Quando atingem o valor limite de 20%, a porcentagem de área trincada é 13,6%, 18,2% e 24,1% maior do que a mistura sem variação no teor de ligante, para os incrementos de -0,3%, -0,4% e -0,5%, respectivamente.

4.2.5 Volume de vazios

Os incrementos atribuídos ao volume de vazios de 7% logo após a operação de compactação foram de $\pm 1\%$, $\pm 2\%$ e $\pm 3\%$. A evolução do ATR e da TR para as misturas com incrementos no volume de vazios são apresentadas nas Figuras 31 e 32, respectivamente.

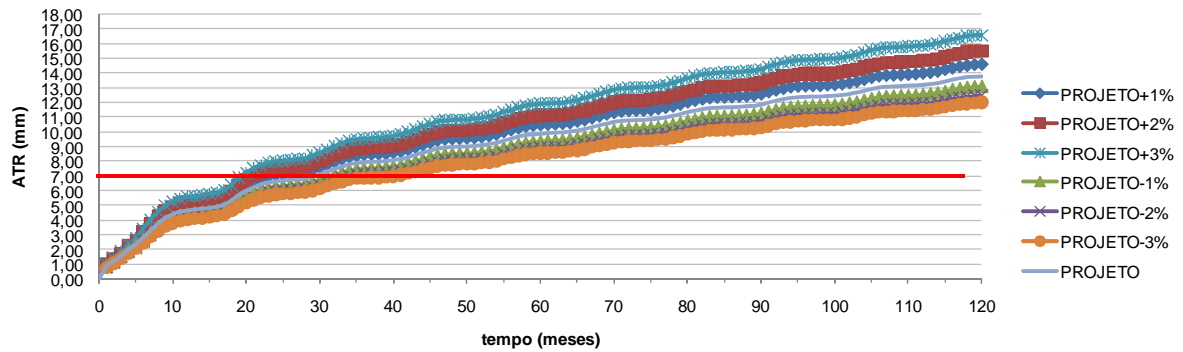


Figura 31: Evolução do ATR, para a mistura com incrementos no volume de vazios

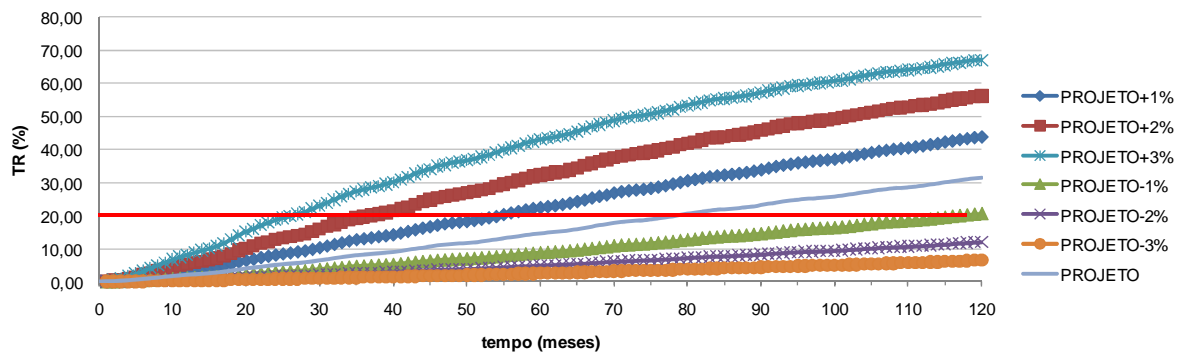


Figura 32: Evolução da TR, para a mistura com incrementos no volume de vazios

O volume de vazios foi a característica de qualidade onde os incrementos mostraram maiores impactos nas evoluções dos parâmetros de desempenho considerados. As análises mostram que incrementos positivos no volume de vazios de projeto fazem que tanto o ATR quanto a TR atinjam os valores admissíveis muito antes do que o ATR e a TR do revestimento com mistura asfáltica sem variação. Para ATR, verifica-se que um incremento de +1% faz com que o valor de 7,0mm seja alcançado com 6 meses de antecedência. Para TR este tempo é ainda mais expressivo, pois a mesma variação faz com que os 20% admissíveis sejam alcançados 2 anos antes. Os tempos, em meses, para que os valores limites de ATR e TR sejam alcançados são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Tempos para que sejam atingidos os valores limites de ATR e TR, variando o V_V

	$\Delta=-3\%$	$\Delta=-2\%$	$\Delta=-1\%$	PROJETO	$\Delta=+1\%$	$\Delta=+2\%$	$\Delta=+3\%$
$t_{ATR=7mm}$	41	35	32	30	24	21	20
$t_{TR=20\%}$	-	-	118	79	55	37	27

As diferenças percentuais entre os parâmetros de desempenho para as misturas com e sem variação no volume de vazios são apresentadas nas Figura 33 e 34 para ATR e TR, respectivamente.

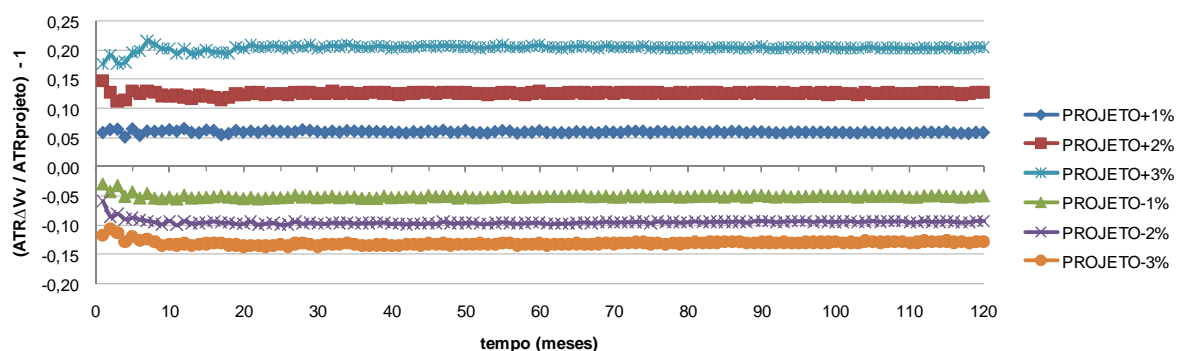


Figura 33: Diferenças percentuais entre os ATR decorrentes dos incrementos no volume de vazios

As diferenças percentuais para o ATR, conforme pode ser visto na Figura 33, são aproximadamente constantes ao longo dos 120 meses considerados na análise, ou seja, a razão entre o ATR para as misturas com variação e o ATR para a mistura sem variação no volume de vazios praticamente não varia. Para os incrementos de +1%, +2% e +3%, as diferenças percentuais médias são de 6,0%, 12,6% e 20,4%.

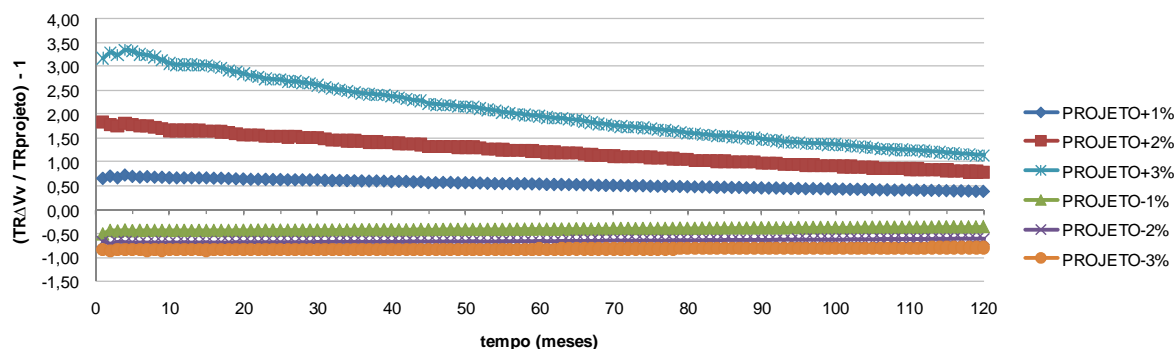


Figura 34: Diferenças percentuais entre as TR decorrentes dos incrementos no volume de vazios

Quanto a TR, a constância nas diferenças percentuais só se observa nos incrementos negativos. Para as variações positivas, os valores máximos iniciais tendem a diminuir com o passar do tempo. Observa-se também que estas diferenças percentuais iniciais são um tanto maiores quanto maior for o incremento no volume de vazios, assim como a taxa com que decrescem. Ao atingir o valor máximo de 20%, as diferenças percentuais para os incrementos de +1%, +2% e +3% são de 55,7%, 141,9% e 268,0%, respectivamente.

4.2.6 Comentários gerais a respeito da análise de sensibilidade

A análise da sensibilidade do revestimento asfáltico mostrou o reflexo do nível de qualidade das características de qualidade nos parâmetros de desempenho adotados (ATR e TR).

Quanto à análise granulométrica, a sensibilidade aferida foi menor do que para o teor de ligante e o volume de vazios, apesar da grande importância da graduação e de outras características dos agregados para o desempenho dos revestimentos. Porcentagens passantes acima do especificado no projeto de dosagem da mistura para a peneira # 3/8" aumentam a susceptibilidade ao afundamento em trilhas de roda e favorecem a evolução da porcentagem de área trincada ao longo do tempo. Para os limites aferidos na seção anterior, que avaliou a variabilidade desta característica, os parâmetros de desempenho considerados atingem os valores admissíveis com 1 mês de antecedência, para os limites especificados pelo DNIT essa antecipação é de 2 meses, com o ATR 3,4% e o TR 3,6% maiores em comparação ao ATR e TR da mistura sem variações.

Quanto às porcentagens passantes na peneira # n4, os limites para o nível de qualidade desta característica foram bem próximos aos do DNIT, de forma que uma variação de -5% resulta em um aumento médio de 3,9% do ATR, fazendo com que este parâmetro atinja o valor admissível 3 meses antes. Para a TR, a antecipação é de 2 meses e com um valor

4,1% maior. Dentre as porcentagens passantes analisadas, os incrementos nas porcentagens da peneira # n200 foram os que causaram maiores impactos no desempenho do revestimento. O incremento de -3%, valor próximo ao limite aferido na seção anterior de acordo com o nível de qualidade desta característica nos projetos analisados, resultou em ATR médio de 6,8% maior, chegando ao valor de 7mm com 7 meses de antecedência. Considerando a TR, o valor admissível é atingido 4 meses antes, possuindo um valor 7,4% maior.

A tendência esperada de que teores de ligante maiores aumentam a susceptibilidade ao ATR e de que valores menores aumentam a evolução do trincamento foi constatada. O impacto mais expressivo foi quanto a TR. Variando o teor em -0,3%, valor limite especificado pelo DNIT e próximo ao valor dos limites aferidos na seção anterior, a TR chega a 20% 9 meses antes e possui um valor 13,6% maior.

A característica de qualidade cujos incrementos causaram maiores impactos no desempenho do revestimento foi o volume de vazios. A variação de +1%, a menor considerada, fez com que o ATR chegasse ao valor admissível 6 meses antes e com um valor 6,0% maior que o da mistura sem variação. A TR chega aos 20% com 2 anos de antecedência e possui valor 55,7% maior. Quando considerado o maior incremento, de +3%, este valor sobe para 268,0%.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa descrita nesta dissertação teve como principal objetivo a identificação do nível de qualidade das características medidas para controlar a produção de misturas asfálticas e a análise do reflexo da variação destas características no desempenho dos revestimentos asfálticos. Neste Capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho. São apresentadas também algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Os níveis de qualidade das características medidas para controlar a produção das misturas asfálticas foi aferido e análise de sensibilidade evidenciou o reflexo da sua variabilidade no desempenho do revestimento asfáltico.

A partir dos objetivos inicialmente estabelecidos, pode-se concluir que:

- a) os níveis de qualidade das características analisadas nesta dissertação foram aferidos através da determinação da variabilidade total da produção e para três destas características averiguou-se um nível de qualidade inferior ao nível de qualidade comumente considerado aceitável em especificações rodoviárias;
- b) a formação do banco de dados é uma ferramenta essencial para o conhecimento e a análise do nível de qualidade das misturas asfálticas produzidas;
- c) a parcela da variabilidade total das características de qualidade referente à precisão com que os parâmetros de projeto são atingidos possui valores semelhantes aos da variabilidade do processo, sendo maior que o dobro no caso das porcentagens passantes na peneira # n200. Isto demonstra a sua importância quando da determinação da variabilidade total e denuncia que os empreiteiros estão com dificuldade em centrar suas produções nos parâmetros de projeto das misturas;
- d) para um nível de qualidade aceitável, que considera que 90% das medidas de cada característica de qualidade tenha valores compreendidos entre os intervalos de tolerância, os limites de controle determinados neste trabalho foram maiores dos que os já especificados pelo DNIT em 3 das 4 características analisadas. Isso significa que a variabilidade das características das misturas que estão sendo produzidas é maior do que a

- variabilidade admitida pelo DNIT quando da determinação dos limites de tolerância especificados em suas normas;
- e) o desempenho do revestimento asfáltico mostrou-se sensível às variações em todas as características de qualidade;
 - f) o controle das características de qualidade durante o processo de produção é imprescindível para o sucesso da obra rodoviária. Mesmo para variações pequenas, dentro dos limites de tolerância especificados, o impacto no desempenho dos revestimentos asfálticos é considerável. Para uma variação de -0,3% no teor de ligante, por exemplo, a análise de sensibilidade mostrou que o valor máximo admissível de 20% da porcentagem de área trincada foi atingido com 9 meses de antecedência caso a mistura tivesse sido usinada no teor ótimo de projeto;
 - g) a maior sensibilidade dos parâmetros de desempenho considerados foi quanto às variações do volume de vazios. Para o incremento de +1%, o menor considerado na análise, o afundamento em trilhas de roda atingiu o valor máximo admissível de 7mm com 6 meses de antecedência em relação à mistura sem o incremento. Para a porcentagem de área trincada, o valor admissível foi atingido 2 anos antes;
 - h) através da análise de sensibilidade ficou claro a importância de controlar a granulometria, o teor de ligante e o volume de vazios durante os processos de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

5.2 SUGESTÕES

O controle de qualidade da produção de misturas asfálticas é um tema de extrema importância para o meio rodoviário. Para que continue sendo estudado, algumas sugestões são feitas:

- a) alimentação do banco de dados com informações de diversas regiões, a fim de avaliar o nível de qualidade das misturas de áreas mais abrangentes;
- b) inclusão de outras características de qualidade no banco de dados, como o volume de vazios, por exemplo;
- c) realização da análise de sensibilidade para diferentes misturas asfálticas, com características diferentes dos agregados e do ligante;
- d) realizar o acompanhamento do processo de controle de qualidade de projetos sendo executados simultaneamente com avaliações do desempenho em campo do revestimento asfáltico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. CNT **Atlas do Transporte**, 2006.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. CNT **Pesquisa CNT de Rodovias 2010: Relatório Gerencial**. Brasília, DF, 2010.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. S. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro. 2008a
- BERNUCCI, L. L. B.; MOURA, E.; FURLAN, A. P.; MOTTA, R. S. ; LEITE, F. C.; FARIA, V. . Efeito do Teor de Tipo de Ligante na Formação de Trilhas de Roda em Misturas Asfálticas. In: 19º Encontro de Asfalto, 2008, Rio de Janeiro. 19º Encontro de Asfalto, 2008b. v. 1. p. 215-224.
- BURATI, J. L. Revising specification limits of an existing QA specification. In: TRB 84th Annual Meeting, 2005, Washington D.C. **Proc...**Washington D.C.: TRB, 2005 (1 CD-ROM)
- BURATI, J. L.; WEED, R. M.; HUGHES, C. S.; HILL, H. S. **Optimal procedures for quality assurance specifications**. Clemson: Clemson University, 2003. (Final Report, FHWA-RD-02-095).
- BUTTS, N. E.; KSAIBATI, K. Asphalt pavement quality control/quality assurance programs in the United States. In: TRB 82th Annual Meeting, 2003, Washington DC **Proc...** Washington DC:TRB, 2003 (CD-ROM)
- DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L.; HARVEY, J. T.; POPESCU, L. **Pay factors for asphalt-concrete construction: effect of construction quality on agency costs**. Berkeley: University of California, 2001. (Technical Memorandum: tm-ucb-prc-2001-1).
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95**: Misturas asfálticas a quente – ensaio Marshall: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1995.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 053/94**: Misturas asfálticas – percentagem de betume: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 138/94**: Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/98**: Agregados – análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 385/99**: Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro: IPR, 1999.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 011/2004-PRO**: Gestão da qualidade em obras rodoviárias – Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2004.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro: IPR, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro: IPR, 2006b.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **FWHA-ED-88-028 HOT-MIX BITUMINOUS PAVING MANUAL.** U. S. Department of Transportation, 1985.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V. Controle Tecnológico e Controle de Qualidade – Um Alerta sobre sua Importância. In: Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2004, Brasília. **Anais...** Brasília: Anais do Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2004.

FORTES, R. M.; NETO, A. Z.; MENETTI, N. C.; BARBOSA, A. S.; MERIGHI, C. F. A importância do Controle Tecnológico e de Qualidade na Reabilitação de Pavimentos após Intervenção de Concessionárias em São Paulo. In: 36ª Reunião Anual de Pavimentação, 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: 36ª Reunião Anual de Pavimentação, 2005. (1 CD-ROM)

HARVEY, J. T.; DEACON, J. A.; TSAI, B. W.; MONISMITH, C. L. **Fatigue performance concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California.** Berkley, 1995 (RTA-65W485-2)

INSTITUTO DE ASFALTO. **Manual de Asfalto.** Rio de Janeiro, 1989 (MS-4)

LAPAV. **Análise da qualidade de misturas asfálticas executadas em segmentos da Pista Sul da rodovia BR-290/RS, trecho Osório-Porto Alegre (Freeway).** Relatório interno. 2008

LAPIN, L. L. **Probability and statistics for modern engineering,** 2ª ed. Boston: Pws-Kent, 1990. 810p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005. 574p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers.** 4ªed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, c2007. Xvi, 768p.

NÚÑEZ, W. P.; SCHMITZ, C.S. **Conceitos Básicos sobre garantia de qualidade/controle de qualidade (QA/QC) na construção e conservação de pavimentos.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 8, Gramado, 2003. Anais. Gramado: DAER-RS, 2003 (CD-ROM)

PARKER, F.; BROWN, R. **Effects of aggregate properties in flexible pavement rutting in Alabama.** In: Effects of aggregate and mineral fillers on asphalt mixture performance. ASTM STP 1147. Richard C. Meininger, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.

PARKER, J.R.; HOSSAIN, M.S. Statistics for Superpave hot-mix asphalt construction quality control/quality assurance data. **Transportation Research Record,** Washington DC, n1813 p151-156, 2002

RUSSELL, J. S.; HANNA, A. S.; NORDHEIM, E. V.; SCHMITT, R. L. **Testing and inspection levels for hot-mix asphaltic concrete overlays.** Washington D. C.: Transportation Research Board, 2001. (National Cooperative Highway Research Program, Report 447)

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Glossary of Highway Quality Assurance Terms.** Washington DC: Transportation Research Board, May 2009. (Transportation Research Board, Number E-C137)

VICTORINO, D. R. Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VITORELLO, T. Análise de Desempenho de Estrutura de Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS no Trecho Osório – Porto Alegre. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

APÊNDICE A – BANCO DE DADOS

PROJETO 1												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i
1	9	-2,16	2,1972	9	4,49	2,6643	9	0,37	0,5494	9	-0,05	0,1892
2	9	-2,24	2,1720	9	2,19	2,4328	9	0,03	0,4536	9	0,06	0,2116
3	2	0,60	0,1414	2	2,40	0,5657	2	0,08	0,1768	2	-0,07	0,0566
4	6	-0,23	1,1776	6	3,33	3,7877	6	-0,49	0,1938	6	0,13	0,3955
5	5	-0,04	1,9667	5	3,42	3,3589	5	-0,69	0,9741	5	0,04	0,1108
6	5	1,04	2,3255	5	6,84	2,0305	5	-0,12	0,1875	5	-0,09	0,1997
7	3	-0,10	1,1533	3	7,13	0,8505	3	-0,03	0,6788	3	-0,09	0,1210
8	2	2,35	0,3536	2	5,95	0,4950	2	0,28	0,7637	2	-0,06	0,3111
9	3	-3,10	3,3181	3	3,93	3,1182	3	-0,94	0,2082	3	-0,07	0,1249
10	2	1,30	2,2627	2	6,30	1,4142	2	0,05	0,2828	2	-0,09	0,0636
11	6	-0,55	3,0369	6	4,03	1,9023	6	0,53	1,0291	6	0,07	0,0719
12	5	-1,02	1,8472	5	3,32	1,4567	5	0,19	0,6249	5	-0,07	0,1746
13	3	-0,23	2,8042	3	3,87	2,6502	3	-0,67	0,3100	3	-0,06	0,0513
14	4	0,13	1,4953	4	5,33	3,2014	4	-0,03	0,6610	4	0,00	0,2346
15	3	-1,87	1,5044	3	6,27	2,2030	3	0,12	0,1097	3	-0,07	0,1721
16	2	0,15	2,0506	2	4,15	1,6263	2	-0,55	0,2121	2	0,04	0,0424
17	5	1,02	1,6888	5	4,62	0,6797	5	-0,12	0,4958	5	-0,03	0,1720
18	3	-0,13	0,6807	3	4,87	1,3650	3	-0,47	0,5370	3	-0,13	0,1701
19	7	-1,47	2,4302	7	1,56	1,8265	7	-1,06	0,4224	7	0,04	0,2001
20	5	-1,10	2,7322	5	1,30	2,7359	5	-0,56	0,4775	5	0,00	0,1604
21	5	-0,98	1,9804	5	4,88	2,4682	5	-0,26	0,3647	5	-0,01	0,1757
22	2	-2,35	1,6263	2	3,80	2,5456	2	-0,65	0,7778	2	-0,03	0,1626
23	9	-0,11	1,8306	9	3,79	1,9212	9	-0,62	0,4868	9	-0,12	0,1253
24	4	-0,27	1,9120	4	3,53	1,1177	4	-0,43	0,3403	4	-0,13	0,0681
25	3	-0,83	1,8502	3	3,97	2,0599	3	-0,03	0,0577	3	-0,08	0,2307
26	5	-1,42	2,2027	5	2,94	3,7760	5	-0,94	0,3578	5	-0,04	0,1481
27	6	0,22	1,4372	6	2,42	2,3336	6	-0,87	0,3077	6	-0,04	0,1311
28	4	-1,63	0,5909	4	3,03	1,2738	4	-0,70	0,3559	4	0,01	0,1486
29	3	-0,73	1,3614	3	3,93	0,3512	3	-0,37	0,2082	3	0,15	0,0208
30	3	0,77	1,1015	3	5,40	0,0000	3	0,23	0,8083	3	0,02	0,1562
31	7	-0,67	0,7675	7	3,57	1,8554	7	-0,57	0,7274	7	-0,03	0,1281
32	8	-0,12	1,4528	8	3,25	2,1434	8	-0,41	0,7080	8	0,07	0,1410
33	7	-0,07	1,9311	7	4,60	1,1972	7	-0,50	0,9522	7	-0,04	0,0832
34	8	-1,99	1,7233	8	2,90	2,4413	8	-0,60	0,8089	8	-0,12	0,0916
PROJETO 2												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i
1	2	2,800	0,4243	2	5,150	0,3536	2	-2,770	0,5233	2	-0,090	0,2121
2	2	3,000	0,5657	2	5,900	1,2728	2	-2,465	0,3748	2	0,120	0,1414

PROJETO 3												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	4	3,925	0,9215	4	1,825	1,8822	4	-2,378	0,3183	5	0,264	0,4984
PROJETO 4												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	5	0,600	2,9504	5	9,500	8,3487	5	1,860	0,1140	5	-0,018	0,0421
2	2	1,150	3,4648	2	7,650	1,9092	2	-0,350	1,0607	2	-0,160	0,0141
3	7	1,800	1,5937	7	6,657	1,7596	7	0,057	0,3552	7	-0,073	0,1086
4	11	-3,627	2,0727	11	5,800	5,5348	11	-0,245	0,5203	11	-0,233	0,1354
5	5	-4,320	1,3498	5	5,240	2,3607	5	0,540	0,8961	5	-0,130	0,0970
6	2	-1,900	0,2828	2	9,650	0,0707	2	0,350	0,0707	2	-0,040	0,0141
7	12	-1,333	2,0895	12	8,308	1,5889	12	0,192	0,5143	12	-0,131	0,0954
8	13	-0,292	1,7414	13	8,746	2,2210	13	0,738	0,3280	13	-0,101	0,0788
PROJETO 5												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	2	-0,250	1,0607	2	5,050	1,3435	2	0,7	0,0212	2	0,075	0,2192
2	2	-0,200	0,7071	2	3,800	0,8485	2	0,0	0,7000	2	0,230	0,0707
3	3	-1,533	0,6658	3	1,567	4,0673	3	-0,8	0,2406	3	0,070	0,0954
4	3	-1,533	1,2055	3	1,933	0,6028	3	0,2	0,7044	3	0,013	0,0208
PROJETO 6												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	8	3,188	2,3564	8	-1,100	3,1337	8	-1,175	0,3284	8	0,004	0,2078
2	6	2,867	2,5812	6	-1,083	1,8082	6	-0,883	0,4875	6	0,060	0,0473
3	8	0,038	1,8102	8	-3,288	1,4865	8	-1,250	0,3586	8	-0,011	0,0925
4	6	1,650	3,5394	6	-0,633	3,0243	6	-0,633	0,6532	6	-0,017	0,1261
5	7	3,171	2,4411	7	0,000	2,1315	7	-1,157	0,2760	7	0,007	0,1254
6	3	7,300	0,0000	3	-0,600	0,0000	3	-0,700	0,7000	3	0,137	0,0945
7	5	-1,100	2,3420	5	-1,880	2,5243	5	-1,120	0,3564	5	0,104	0,0404
8	7	0,943	2,3790	7	-0,314	1,5399	7	-1,143	0,7458	7	0,084	0,0730
9	7	3,986	1,7715	7	0,814	1,7382	7	-0,329	0,7973	7	0,009	0,0930
10	2	5,000	0,8485	2	2,100	0,1414	2	-0,100	0,5657	2	-0,005	0,1202
11	6	2,067	2,5438	6	-0,583	3,2202	6	0,067	0,3077	6	-0,055	0,0459
12	2	4,650	1,6263	2	2,300	0,7071	2	0,200	1,1314	2	0,115	0,0495
PROJETO 7												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	7	0,200	2,4590	7	3,057	1,9697	7	-0,414	0,6866	7	0,146	0,1166
2	6	0,683	1,8925	6	4,500	2,0229	6	-0,200	0,6164	6	-0,040	0,1550
3	3	1,467	3,6611	3	8,733	5,5717	3	-0,767	0,3215	3	-0,107	0,0462
4	5	3,540	2,7853	5	4,680	3,2912	5	-0,680	0,1789	5	-0,092	0,1869
5	7	4,029	1,7886	7	5,914	1,5561	7	-0,186	0,8050	7	0,004	0,2462
6	5	3,260	0,9476	5	6,440	0,8444	5	0,200	0,3391	5	-0,064	0,2361
7	6	1,450	1,3457	6	3,667	1,9896	6	0,000	0,6899	6	-0,035	0,2181
8	7	2,443	2,3387	7	3,743	3,3950	7	-0,343	0,4117	7	-0,023	0,2173

PROJETO 7												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i
9	2	-0,650	3,1820	2	1,850	4,3134	2	0,700	0,1414	2	0,140	0,2687
10	3	-0,667	0,4163	3	3,200	1,1533	3	0,533	0,7506	3	-0,070	0,0755
11	7	-1,443	2,5618	7	1,143	2,2449	7	0,000	0,8524	7	0,029	0,1860
12	2	1,000	4,3841	2	3,900	1,1314	2	-0,500	0,1414	2	0,055	0,3606
13	4	-3,400	1,0863	4	-0,450	2,6338	4	-0,300	0,4690	4	-0,075	0,1535
14	3	0,133	3,7421	3	3,433	3,2347	3	0,467	0,7506	3	0,147	0,1762
15	8	1,950	1,9420	8	3,650	2,3682	8	0,000	0,5127	8	-0,038	0,1829
16	7	-0,357	1,4943	7	2,514	1,2747	7	-0,257	0,9325	7	-0,011	0,1631
17	11	-0,173	1,9314	11	2,791	2,3620	11	-0,791	0,6332	11	-0,043	0,1945
18	9	-0,567	2,1083	9	2,689	2,6695	9	-0,489	1,0458	9	-0,076	0,1868
19	6	1,017	3,4406	6	3,617	2,8231	6	-0,800	0,7899	6	0,018	0,2404
20	8	-1,362	1,9449	8	1,438	2,3513	8	0,075	1,8607	9	0,016	0,2864
21	4	1,000	2,3424	4	3,250	1,0661	4	0,525	1,1701	4	-0,007	0,2687
22	13	-0,546	1,9590	13	2,515	1,9117	13	-0,369	0,5793	13	-0,112	0,1362
23	8	-1,912	2,1344	8	1,088	2,6476	8	-0,488	0,4422	8	-0,163	0,1839
24	8	-1,925	0,9896	8	1,350	1,9413	8	-0,200	0,7483	8	-0,131	0,1769
25	9	2,356	1,4266	9	3,578	2,2426	9	0,244	0,7955	10	-0,304	0,0647
26	3	-0,800	0,6083	3	2,633	2,5580	3	-0,900	0,2646	3	-0,283	0,0379
27	2	-0,600	2,2627	2	1,550	2,4749	2	-0,350	1,3435	2	-0,230	0,0707
28	8	0,138	2,4945	8	1,888	1,8106	8	-0,363	0,8831	8	-0,240	0,1199
29	5	0,000	2,9470	5	1,800	2,9757	5	-0,740	0,3050	5	-0,298	0,0507
30	8	0,463	1,8715	8	2,363	1,5306	8	-0,075	0,7833	8	-0,186	0,1356
31	3	0,800	1,3229	3	3,767	1,1015	3	-0,333	0,8083	3	-0,177	0,0850
32	12	-0,392	1,4638	12	2,942	1,5258	12	-0,408	0,4795	12	-0,198	0,1072
33	9	-1,700	1,4908	9	-0,233	1,7614	9	-1,056	0,7126	9	-0,194	0,0635
34	10	0,680	2,3456	10	3,370	2,5743	10	-0,290	0,6839	10	-0,165	0,1077
35	8	0,325	3,2495	8	2,688	2,2344	8	-0,213	0,8184	8	-0,231	0,1153
36	5	0,960	1,7257	5	4,360	2,4450	5	-0,180	0,5263	5	-0,184	0,1615
37	2	0,650	2,7577	2	1,650	3,3234	2	-1,850	0,2121	2	-0,235	0,0354
38	6	-0,950	1,2422	6	1,650	1,0291	6	-1,750	0,5468	6	-0,323	0,0446
39	7	-0,029	2,3956	7	1,771	3,1261	7	-0,957	0,7976	7	-0,234	0,1803
40	4	-1,500	1,2111	4	0,725	1,1236	4	-1,975	0,5909	4	-0,185	0,1434
41	5	-0,480	0,8927	5	3,040	2,5851	5	-0,500	0,2915	5	0,028	0,1103
42	5	-0,560	1,6979	5	2,860	1,5307	5	-1,140	0,4278	5	-0,162	0,0593
43	7	-0,057	2,1322	7	2,571	1,5997	7	-1,014	0,7777	7	-0,157	0,1179
44	5	0,500	3,4358	5	3,740	2,4193	5	-0,540	0,7335	5	-0,220	0,0972
45	3	1,700	1,5100	3	2,467	1,8610	3	-0,767	0,6429	3	-0,113	0,0404
46	4	0,650	2,6789	4	1,750	1,6031	4	0,075	1,0996	4	-0,047	0,0881
47	8	2,300	2,2181	8	4,550	1,5175	8	-0,600	0,5732	8	0,050	0,1399
48	4	2,700	2,1833	4	5,600	0,4243	4	-0,350	0,2517	5	-0,024	0,1831
49	2	1,600	2,1213	2	3,750	1,0607	2	-0,150	0,9192	2	-0,015	0,0778
50	5	2,820	1,7370	5	3,840	2,7162	5	-0,080	0,5541	5	-0,082	0,2007
51	10	2,430	2,3636	10	3,960	2,5070	10	-0,090	0,5507	10	-0,221	0,0694
52	7	0,943	1,9773	7	3,614	1,9489	7	-0,371	0,7455	7	-0,203	0,0836
53	5	2,720	0,9654	5	4,380	1,8539	5	-0,260	0,8050	5	-0,236	0,0844
54	10	1,430	2,6395	10	3,370	1,0995	10	-0,470	0,5697	10	-0,144	0,0576

PROJETO 7												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
55	5	1,020	1,3424	5	4,660	1,0597	5	-0,020	0,3899	5	-0,164	0,1137
56	7	0,929	1,3487	7	3,643	0,2637	7	-0,171	0,3638	7	-0,116	0,0752
57	7	1,300	3,3705	7	4,643	2,7269	7	-0,171	0,5964	7	-0,179	0,0604
58	8	0,363	2,3366	8	3,700	1,1759	8	-0,350	0,6824	8	-0,220	0,1549
59	5	0,500	1,0247	5	2,880	2,4098	5	-0,580	0,7694	5	-0,354	0,1036
60	7	0,129	1,7212	7	4,043	0,9572	7	-0,743	0,8284	7	-0,274	0,0913
61	10	2,360	2,0764	10	4,900	2,9728	10	-0,460	0,5582	10	-0,265	0,1164
62	3	-0,833	1,8877	3	3,333	2,6274	3	-0,333	0,2309	3	-0,247	0,1405
63	5	1,740	1,5694	5	3,740	0,9529	5	-0,940	0,5941	5	-0,206	0,1159
64	7	2,071	1,3683	7	3,143	1,5186	7	-0,157	1,1088	7	-0,171	0,1250
65	5	2,380	1,7556	5	5,300	2,8205	5	0,160	1,0784	5	-0,294	0,0611
66	4	-0,250	2,8302	4	0,850	1,9706	4	-0,450	0,7326	4	-0,220	0,0606
PROJETO 8												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	4	0,075	1,8945	4	0,825	1,1413	4	-0,400	0,3830	4	-0,063	0,0699
2	2	-3,650	0,7778	2	-1,300	1,2728	2	-0,800	0,5657	2	-0,020	0,1556
3	6	1,867	0,9585	6	1,900	0,8944	6	0,117	0,7223	6	0,088	0,0828
4	4	0,225	2,4663	4	1,000	0,8083	4	0,075	0,6131	4	0,095	0,0370
5	3	1,067	1,6258	3	1,467	0,4041	3	-0,467	0,5132	3	0,117	0,0451
6	2	0,500	2,8284	2	2,800	0,4243	2	-0,850	0,2121	2	-0,035	0,1202
7	4	1,250	0,8347	4	2,025	0,5123	4	0,000	0,3916	4	0,043	0,1323
8	8	1,750	1,2593	8	1,838	0,5041	8	-0,163	0,6186	8	0,100	0,0760
PROJETO 9												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	4	-1,875	1,2685	4	2,175	1,3672	4	1,850	0,2380	4	0,210	0,3146
PROJETO 10												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i
1	8	-1,850	4,8264	8	2,563	2,2090	8	1,600	0,9914	8	-0,251	0,0803
2	6	-0,350	2,3721	6	3,650	0,6775	6	2,350	0,2950	6	-0,373	0,1280
3	6	0,750	1,7886	6	3,133	0,3266	6	1,467	0,8335	6	-0,263	0,0356
4	6	0,583	2,5238	6	2,367	1,1978	6	1,950	0,8216	6	-0,285	0,1239
5	3	3,067	0,9292	3	3,733	0,9713	3	1,600	0,3464	3	-0,127	0,1159
6	5	-0,020	0,8643	5	2,600	0,7649	5	1,680	0,5933	5	-0,218	0,0687
7	2	-0,650	2,3335	2	3,250	0,9192	2	1,550	0,7778	2	-0,190	0,0566
8	5	0,320	2,7031	5	2,760	0,7797	5	2,320	0,7014	5	-0,224	0,0924
9	5	0,460	2,8254	5	1,880	2,2554	5	1,800	0,5385	5	-0,178	0,0971
10	4	1,975	1,1413	4	3,175	0,4924	4	2,000	0,9487	4	-0,133	0,0538
11	4	2,875	1,9856	4	3,875	0,5252	4	2,375	1,0210	4	-0,105	0,0265
12	4	1,200	1,5144	4	3,225	0,5123	4	1,600	0,6164	4	-0,183	0,0818
13	5	0,680	1,5189	5	3,340	0,4669	5	1,740	0,4336	5	-0,090	0,0620
14	3	-1,500	2,7404	3	2,100	1,0149	3	2,500	1,0583	3	-0,187	0,0153
15	7	0,986	1,4112	7	3,343	0,1988	7	1,957	0,3780	7	-0,090	0,0583
16	3	0,867	0,4933	3	3,467	0,2517	3	2,133	0,3215	3	-0,113	0,0586

PROJETO 10												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i
17	9	0,700	2,1342	9	3,411	1,0810	9	1,944	0,4126	9	-0,099	0,0756
18	5	0,620	2,3210	5	3,620	1,2558	5	2,060	0,5505	5	-0,078	0,0740
19	2	1,850	2,6163	2	1,700	0,0000	2	1,200	0,1414	2	-0,135	0,0071
20	7	1,343	1,5651	7	2,400	1,7833	7	1,586	0,2545	7	-0,094	0,0645
21	6	0,883	1,5980	6	2,433	1,0985	6	2,417	0,5879	6	-0,103	0,0294
22	5	2,900	0,8155	5	3,200	1,4036	5	2,060	0,9990	5	-0,108	0,0698
23	5	0,980	1,4653	5	3,800	0,4301	5	1,760	0,6465	5	-0,140	0,0529
PROJETO 11												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i
1	5	-1,340	2,2289	5	0,680	1,6858	5	1,340	0,7232	5	-0,224	0,0329
2	2	-0,500	0,7071	2	3,100	0,0000	2	1,800	0,1414	2	-0,240	0,0424
PROJETO 12												
LOTES	# 3/8" (% passante)			# n4 (% passante)			# n200 (% passante)			TEOR DE LIGANTE (%)		
	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i	n _i	\bar{x}_i	s _i
1	4	-2,700	2,5755	4	4,125	2,5838	4	-0,950	0,2517	4	0,080	0,0966
2	5	-2,380	2,3188	5	2,820	3,2752	5	-1,100	0,5477	5	0,086	0,1024
3	5	0,860	1,6319	5	2,960	3,0738	5	-0,760	0,6542	5	0,102	0,1256
4	9	-2,144	3,7239	9	1,967	2,9198	9	-0,600	0,9110	9	0,211	0,0848
5	6	-2,150	5,6801	6	4,450	6,2918	6	-0,333	0,9522	6	0,173	0,1962
6	9	-3,144	2,7727	9	0,100	4,8389	9	-0,689	0,6585	9	0,101	0,0766
7	6	-5,150	1,0114	6	-0,417	1,5342	6	-0,617	1,2156	6	0,025	0,0862
8	3	-4,067	2,3502	3	0,533	2,1733	3	-1,100	0,5000	3	0,007	0,1172
9	5	-2,820	2,0801	5	4,400	1,6386	5	-0,640	0,5225	5	0,036	0,0518
10	7	-1,014	1,7724	7	4,243	1,5778	7	-0,886	0,5815	7	0,021	0,0972
11	3	-4,133	5,2548	3	3,867	2,6502	3	-0,167	0,6351	3	0,000	0,0917
12	3	-3,933	2,1502	3	3,567	1,3317	3	0,100	0,4583	3	0,060	0,0458

ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRONIZADA

