



## ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO TEOR DE LIGANTE EM PROJETOS DE CONCRETO ASFÁLTICO

*Christiane da Silva Deolindo<sup>1</sup>; Matheus Lemos Nogueira<sup>2</sup>; Anelise Schmitz<sup>3</sup>; Jéssica Santos Rossi<sup>4</sup>*

*<sup>1,2,4</sup> Universidade de Caxias do Sul, <sup>1</sup>csdeolindo@ucs.br, <sup>2</sup>mlnogueira@ucs.br, <sup>4</sup>jsrossi1@ucs.br*

*<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná, [anelise.schmitz@gmail.com](mailto:anelise.schmitz@gmail.com)*

### RESUMO

O controle de qualidade corresponde às ações necessárias para identificar rapidamente o nível de qualidade dos processos de produção e para corrigir os erros quando este nível estiver aquém do especificado. No Brasil, diversas publicações associam os insucessos das obras e a ocorrência de patologias prematuras a problemas do controle de qualidade. Tendo em vista a importância de controlar a variabilidade dos materiais e processos para o desempenho final do pavimento asfáltico, este trabalho tem como objetivo apresentar uma forma de determinar a variabilidade de características de qualidade do concreto asfáltico. Para isso, foi realizado um estudo de caso que contou com 5 projetos de misturas utilizadas nos revestimentos de rodovias no Rio Grande do Sul. Aqui foi considerado apenas o teor de ligante, embora o método possa (deve) ser utilizado para outras características como granulometria, volume de vazios e espessura da camada. Como considerações finais, ressaltou-se a importância de uma medida de variabilidade que também incorpore a habilidade dos executores em mirar suas produções nos parâmetros de projeto. Além disso, deve ser destacada a importância da formação e alimentação contínua de um banco de dados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto asfáltico, Controle de qualidade, Característica de qualidade.

### ABSTRACT

*Quality control corresponds to actions necessary to quickly identify the quality level of the production processes and to correct errors when this level is below the specified level. In Brazil, several publications associate the failures of construction and the occurrence of premature pathologies with problems of quality control. In view of the importance of controlling the variability of materials and processes for the final performance of the asphalt pavement, this paper aims to present a way to determine the variability of quality characteristics of asphalt concrete. To this end, a case study was carried out that included 5 mix designs used in road coverings in Rio Grande do Sul. Here, only the binder content was considered, although the method can (should) be used for other characteristics such as granulometry, air void and thickness. As final considerations, the importance of a variability measure that also incorporates the ability of the executors to target their productions in the design parameters was emphasized. In addition, the importance of a database and its continuous feeding must be highlighted.*

**KEYWORDS:** Asphalt concrete, Quality control, Quality characteristic.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo 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. Neste sentido, Balbo (2007) define a negligência e muitas vezes a ausência



deste controle como a grande mazela das obras rodoviárias no Brasil. Ainda nesta linha, segundo a Confederação Nacional dos Transportes (2019), um dos problemas encontrados no país relacionado aos pavimentos flexíveis é o não atendimento das exigências técnicas tanto da capacidade de suporte das camadas como da qualidade dos materiais empregados no revestimento.

A qualidade do processo construtivo é fator determinante quando se trata de desempenho de pavimentos sujeitos à ação do tráfego e ações climáticas (DEACON et al., 2001). Embora “controle de qualidade” ou “controle tecnológico” de materiais e processos remeta, muitas vezes, a ensaios de laboratório, existe uma demanda cada vez maior para que os materiais tenham sua qualidade atestada na pista, principalmente para critérios de aceitação final do produto (FERRI, 2013). 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 variabilidade da construção tem um impacto significativo no desempenho do pavimento, independentemente da fonte do agregado e do tipo de ligante. No entanto, algumas misturas preparadas em laboratório podem ter um desempenho melhor que a mistura real, tendo em vista que em campo não é possível o controle sobre todas as variáveis da mesma forma que em laboratório. Se o empreiteiro violar os limites de especificação, há 81% de chance de a seção de pavimento ter desempenho inferior ao da mistura ideal (SEBBALY e BAZI, 2005).

### **1.1. Objetivo do trabalho**

Tendo em vista a importância de controlar a variabilidade dos materiais e processos para o desempenho final do pavimento, percebe-se o quão necessário se faz o controle de qualidade. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma forma de determinar a variabilidade de características de qualidade do concreto asfáltico. Para ilustrar a aplicação da metodologia, foram utilizadas medidas de teor de ligante da produção de 5 diferentes misturas utilizadas no revestimento de rodovias no Rio Grande do Sul.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O controle de qualidade ou controle do processo compreende as ações planejadas e sistemáticas necessárias para garantir a confiabilidade necessária a um produto ou instalação, para que o mesmo, quando em serviço, funcione com desempenho satisfatório. A sua problemática, de forma geral, é obter a qualidade de um serviço ou produto da maneira mais eficiente, econômica e satisfatória possível. Para isso, é necessário a avaliação contínua das atividades de planejamento, especificações, publicidade e adjudicação de contratos, construção, manutenção, e a interação destas atividades (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2009).

Segundo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2004), o controle de qualidade se dá por meio de atividades operacionais, simultâneas à execução da obra rodoviária, e técnicas operacionais que se destinam a monitorar todo o processo em todas as etapas do ciclo da qualidade da obra, para atender aos requisitos de qualidade. As medidas adotadas devem ser detalhadas por meio de um plano da qualidade (PGQ) e de acordo com a legislação e normas técnicas em vigor.

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 (LAPIN, 1990).

Conforme Fortes e Merighi (2004), o controle tecnológico e de qualidade se constitui na amostragem dos serviços que são realizados, além da realização de ensaios para verificar se os serviços estão atendendo às especificações vigentes e ao projeto. A verificação é feita nas diversas fases de execução, de modo que erros possam ser corrigidos em tempo hábeis, garantindo então o seu desempenho. Inclui desde a seleção dos materiais, misturas ou aplicação desses materiais e fases posteriores da produção.

Com o propósito de verificar a conformidade da produção em relação a uma dada exigência ou especificação, são medidas as características de qualidade. Elas devem ser correlacionáveis com propriedades fundamentais de engenharia e permitirem a estimativa do desempenho do revestimento construído (TRB, 2009). Burati et al. (2003) definem a diferença entre “propriedade” e “característica de qualidade” por meio do seguinte exemplo:



para o concreto asfáltico, uma propriedade pode ser a durabilidade enquanto que a característica de qualidade correlacionada a ela 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. Algumas outras características são: Volume de vazios, Vazios nos Agregados Minerais, temperatura da mistura no misturador e espessura da camada compactada.

### 3. METODOLOGIA

Neste item são apresentados os projetos analisados neste trabalho e a forma de cálculo da variabilidade do teor de ligante.

#### 3.1. Banco de dados

Os dados analisados referem-se a 5 projetos de concreto asfáltico utilizados nos revestimentos de rodovias no Rio Grande do Sul, fornecidos pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem, DAER/RS. O fornecimento dos mesmos se deu em formato de relatórios mensais de acompanhamento da execução dos serviços, por parte das empresas executoras. Na Tabela 1 são identificados os projetos aqui considerados e os teores de ligante correspondentes.

Tabela 1 – Parâmetros de projeto

Projeto	Teor de ligante de projeto (%)
1	5,30
2	5,60
3	5,62
4	5,10
5	5,20



Cada projeto foi dividido em lotes, correspondentes a cada mês de produção. Esta escolha deveu-se a forma como os dados foram fornecidos, sendo o ideal para o controle de qualidade período menores. A vantagem da amostragem com base no tempo é a possibilidade de avaliações em períodos isolados de tempo, onde podem ocorrer modificações no processo de produção. Por outro lado, a quantidade de mistura produzida pode variar entre os lotes, fazendo com que quantidades diferentes sejam avaliadas (RUSSELL et al., 2001).

Após organizado o banco de dados, foram calculadas as diferenças entre as medidas de teor de ligante obtidas nos ensaios de extração e o teor de projeto. Este valor não deve exceder  $\pm 0,3 \%$  (DAER, 199; DNIT, 2006). Após, foram calculados a média e o desvio padrão destas diferenças em cada lote para iniciar enfim a análise estatística.

### 3.2. Cálculo da variabilidade

A forma de cálculo aqui apresentada é descrita por Burati et al. (2003). Burati (2005) a utiliza para revisar os limites de uma especificação de garantia de qualidade nos Estados Unidos. No Brasil, o método foi utilizado e discutido em Nogueira (2011). A variabilidade de uma característica de qualidade é mensurada pelo desvio padrão,  $S_{CQ}$ . O cálculo deste parâmetro estatístico envolve duas parcelas: a variabilidade do processo de produção em si,  $S_{PROCESSO}$ , e a variabilidade da precisão com que os empreiteiros conseguem centrar suas produções nos parâmetros de projeto,  $S_{PRECISÃO}$ . O cálculo de  $S_{CQ}$  é feito conforme a 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).



O valor do desvio padrão que quantifica a variabilidade do processo deve ser coerente com a maneira na qual os lotes foram definidos: se por tempo de produção ou se por quantidade produzida. Assim, devem ser calculados os desvios padrões em cada lote e posteriormente ponderados, tendo como peso o tamanho das amostras, ou seja, o tamanho dos lotes. O cálculo foi feito por meio da Equação 2.

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

Onde:

$S_{\text{PROCESSO}}$  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.

A avaliação da variabilidade da precisão tem o propósito de verificar o quão variáveis são as médias dos processos de produção em relação aos valores de projeto. O procedimento inicia com o cálculo das médias das medidas das características de cada lote. A posterior ponderação destas médias é feita tendo o tamanho do lote como peso e, para isso, utiliza-se a Equação 3.

$$\bar{X}_1 = \frac{(\bar{x}_1 n_1) + \dots + (\bar{x}_k n_k)}{n_1 + \dots + n_k} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$\bar{X}_1$  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.

### 3.3. Nível de qualidade

Um nível de qualidade aceitável de uma característica pode ser estabelecido quando, pelo menos, 90% de suas medidas estejam em conformidade com os limites de tolerância, como o caso de  $\pm 0,3\%$  do teor de ligante com relação ao valor de projeto (DNIT, 2006). O valor de 90% é arbitrário e comumente adotado para estabelecer os limites de controle ou de aceitação em especificações rodoviárias (BURATI, 2005). Para uma distribuição normal, 90% de uma população estar dentro dos limites significa que o afastamento em relação à média é de  $zS_{CQ}$ , sendo  $z$  a variável normal padronizada e, para este caso, igual a 1,645. A Figura 1 ilustra esta consideração.

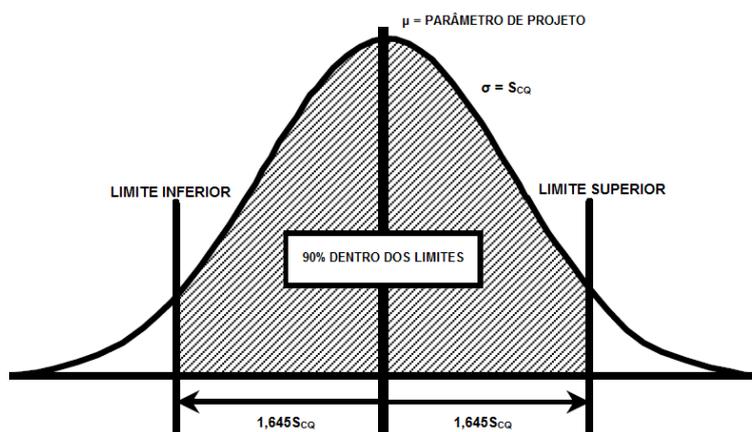


Figura 1 – Característica de qualidade com 90% da população entre os limites especificados  
 Fonte: Adaptado de Burati et al., 2003

## 4. RESULTADOS

Nas Tabelas 2 até 6 são apresentados os resultados dos lotes para os Projetos de 1 até 5, respectivamente.

Tabela 2 – Projeto 1

Lote	n	$s_i$	$(n_i-1)s_i^2$	$\bar{x}_i$	$\bar{x}_i n_i$
Jan/16	32	0,0058	0,0010	5,3313	170,60
Fev/16	37	0,0110	0,0044	5,3643	198,48
Mar/16	40	0,0122	0,0058	4,0660	162,64
Abr/16	30	0,0070	0,0014	5,4673	164,02



Mai/16	24	0,0036	0,0003	5,4525	130,86
Jun/16	39	0,0053	0,0011	5,4992	214,47
Total	202		0,0140		1041,07
	$s_{\text{PROCESSO}}$		0,0084	$\bar{X}_i$	5,1538
				$\overline{\Delta X}_i$	-0,1462

Tabela 3 – Projeto 2

Lote	n	$s_i$	$(n_i-1)s_i^2$	$\bar{x}_i$	$\bar{x}_i n_i$
Out/14	27	0,0082	0,0017	5,7593	155,50
Nov/14	27	0,0081	0,0017	5,7374	154,91
Total	54		0,0034		310,41
	$s_{\text{PROCESSO}}$		0,0081	$\bar{X}_i$	5,7483
				$\overline{\Delta X}_i$	0,1483

Tabela 4 – Projeto 3

Lote	n	$s_i$	$(n_i-1)s_i^2$	$\bar{x}_i$	$\bar{x}_i n_i$
Jun/16	124	0,0081	0,0080	5,6185	696,69
Jul/16	47	0,0010	0,00004	5,6126	263,79
Ago/16	133	0,0017	0,0004	5,7349	762,74
Total	304		0,0084		1723,22
	$s_{\text{PROCESSO}}$		0,0053	$\bar{X}_i$	5,6685
				$\overline{\Delta X}_i$	0,0485



Tabela 5 – Projeto 4

Lote	n	$s_i$	$(n_i-1)s_i^2$	$\bar{x}_i$	$\bar{x}_i n_i$
Jun/15	6	0,0045	0,0001	5,1900	31,14
Jul/15	3	0,0010	0,000002	5,2433	15,73
Jan/16	4	0,0027	0,00002	5,2650	21,06
Fev/16	17	0,0057	0,0005	5,2900	89,93
Mar/16	13	0,0030	0,0001	5,2362	68,07
Abr/16	9	0,0042	0,0020	5,2333	47,10
Mai/16	14	0,0123	0,0011	5,2843	73,98
Total	66		0,0029		347,01
	$S_{\text{PROCESSO}}$		0,0070	$\bar{X}_i$	5,2577
				$\Delta\bar{X}_i$	0,1577

Tabela 6 – Projeto 5

Lote	n	$s_i$	$(n_i-1)s_i^2$	$\bar{x}_i$	$\bar{x}_i n_i$
Jun/15	12	0,0039	0,0002	5,1708	62,05
Jul/15	13	0,0067	0,0005	5,1123	66,46
Ago/15	34	0,0089	0,0026	5,1538	175,23
Jan/16	8	0,0050	0,0002	5,2238	41,79
Total	67		0,0035		345,53
	$S_{\text{PROCESSO}}$		0,0075	$\bar{X}_i$	5,1572
				$\Delta\bar{X}_i$	-0,0428

Na Tabela 7 são apresentados os resultados finais para todos os projetos considerados neste trabalho.



Tabela 7 – Resumo dos projetos

Projeto	n	S <sub>PROCESSO</sub>	$\overline{\Delta X}_i$
1	202	0,0084	-0,1462
2	54	0,0081	0,1483
3	304	0,0053	0,0485
4	66	0,0070	0,1577
5	67	0,0075	-0,0428
k = 5	$\Sigma = 693$	$\Sigma = 0,0363$	

De posse dos valores apresentados na Tabela 7, foram calculadas as variabilidades do processo, igual a 0,0073, e da precisão, correspondente ao desvio padrão dos valores das médias e igual a 0,1123, considerando os 5 projetos em questão. A partir deste valores, pôde-se calcular a variabilidade do teor de ligante (Equação 4).

$$S_{CQ} = \sqrt{0,0073^2 + 0,1123^2} = 0,1125 \quad \text{Equação (4)}$$

Por meio da multiplicação  $zS_{CQ}$ , onde  $z$  é igual a 1,645 e  $S_{CQ}$  é igual a 0,1125, conclui-se que os limites para o nível de qualidade correspondente aos 90 % das medidas dentro das especificações seria de 0,19 %. Porém, para uma melhor avaliação, também foi realizado o processo inverso: 1) dividiu-se o limite de  $\pm 0,3$  % pela variabilidade  $S_{CQ}$  para determinar o valor da variável  $z$ ; 2) com o valor de  $z$ , pôde-se identificar a quantidade de concreto asfáltico produzida dentro dos limites especificados. O resultado de  $z$  foi de 2,67, o que indica que 99,24 % do concreto asfáltico foi produzido com o teor de ligante conforme as especificações; vale ressaltar que o mesmo processo aqui apresentado deve ser aplicado a outras características de qualidade como granulometria, volume de vazios, grau de compactação e espessura.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma metodologia para a determinação da variabilidade de características de qualidade de concreto asfáltico. Para isso, foi apresentado um estudo de caso que analisou a variabilidade do teor de ligante em 5 projetos de misturas utilizadas nos revestimentos de rodovias gaúchas. O método, que já foi relatado na literatura, se mostra interessante por considerar a habilidade do executor em mirar sua produção nos parâmetros de projeto, além da variabilidade inerente a todo processo de produção.

Quanto ao banco de dados, este se mostrou uma ferramenta de elevada importância para o controle de qualidade. Deve ser ressaltada a necessidade de alimentação contínua, de forma a permitir ajustes rápidos na produção caso material com qualidade inferior ao especificado seja identificado. Sugere-se, para o estudo de caso aqui apresentado, que os lotes sejam organizados em períodos de tempo menores ou que seja considerada a possibilidade de divisão conforme a quantidade produzida.

Quanto ao teor de ligante dos 5 projetos aqui considerados, o nível de qualidade se mostrou elevado, correspondente à 99,24 % das medidas dentro do limite de  $\pm 0,3$  % comumente imposto nas especificações. Sugere-se que o mesmo tipo de análise seja realizado para outras características de qualidade e que sejam desenvolvidos estudos que relacionem tal variabilidade com o desempenho das misturas em campo.

## REFERÊNCIAS

BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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)

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.



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 AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER-ES-P 16/91: Concreto asfáltico. Porto Alegre, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 011/2004-PRO: Gestão da qualidade em obras rodoviárias – Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2004.

\_\_\_\_\_. DNIT 031/2006-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

FERRI, S. Critérios de aceitação e controle de qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos. 2013. 331 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

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)

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

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. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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)

SEBAALY, P. E.; BAZI, G. M. Impact of Construction Variability on Pavement Performance. Nevada: Nevada Department Of Transportation, 2005. Report No: RDT06-004.