



ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR A ILUMINÂNCIA NA ZONA LIMIAR DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS. ESTUDOS DE CASO APLICADOS AO TÚNEL 3 DO RODOANEL METROPOLITANO MÁRIO COVAS

Norberto Corrêa da Silva Moura

FAUUSP - LABAUT Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética / Departamento de Tecnologia da Arquitetura - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: norbertomoura@terra.com.br

RESUMO

Proposta: A iluminação de túneis rodoviários ocupa uma posição especial na iluminação pública. No período diurno, quando a iluminação artificial de vias não está normalmente em uso, é que o sistema apresenta mais problemas. Estes se devem principalmente a três causas: grande diferença entre o nível de iluminação interior e exterior ao túnel, adaptação do olho humano e consumo energético, necessitando iluminâncias da ordem de 3000 lux na entrada do túnel (Zona Limiar). Neste artigo, são propostas estratégias para diminuir a iluminância necessária na Zona Limiar, algumas aplicadas a estudos de caso no Túnel 3 do Rodoanel Mário Covas. **Método de pesquisa/Abordagens:** Estudo comparativo de normas e recomendações nacionais e internacionais; levantamento *in loco* dos elementos que interferem na iluminação de túneis; determinação da luminância de véu equivalente pelo Método L_{seq} . **Resultados:** A aplicação de algumas estratégias proporcionou uma redução de 42% na luminância da Zona Limiar. Foram identificadas deficiências e discrepâncias no projeto de norma ABNT em relação às recomendações adotadas internacionalmente. **Contribuições/Originalidade:** Intervenções de baixo custo implicaram em significativa redução do consumo energético na iluminação da Zona Limiar, sem prejuízo de sua eficiência. Para motivar e permitir o aproveitamento destes recursos de acordo com instruções normativas, propõe-se a revisão do projeto de norma ABNT, adotando critérios para reduzir as fontes de ofuscamento.

Palavras-chave: iluminação de túneis, eficiência energética, ofuscamento desabilitador.

ABSTRACT

Proposal: Tunnel lighting occupies a special position in public lighting. During the daytime, when the artificial street lighting is not usually in use, tunnel lighting presents more problems. These ones have mainly three causes: the great difference between the illumination level inside and outside the tunnel, visual adaptation and energy consumption, which demands about 3000 lux at the tunnel entrance (Threshold Zone). In this article strategies are proposed in order to reduce the illuminance in the Threshold Zone, some of them applied in case studies in the Metropolitan Area Ring Road Mario Covas Tunnel 3. **Methods:** Comparative study including national and international standards; on-site measurements of relevant elements in tunnel lighting. Method L_{seq} for the determination of the equivalent veiling luminance. **Findings:** Some of the strategies put into effect resulted in reducing 42% the luminance in the Threshold Zone. Deficiencies and discrepancies were identified in the ABNT standard project in relation to the international recommendations adopted. **Originality/value:** Low cost actions result in significant decrease in the Threshold Zone lighting energy consumption, preserving its efficiency. In order to motivate and to take advantage of these resources according to standard instructions, a revision of the ABNT standard project is proposed, adopting criteria to reduce glare sources.

Keywords: tunnel lighting, power efficiency, disability glare.

1 INTRODUÇÃO

Para atenuar o impacto visual provocado durante o período diurno no emboque de túneis rodoviários, normalmente utiliza-se a luz artificial, com alto nível de iluminação inicial e gradual diminuição para o interior do túnel. Essa solução apresenta dois inconvenientes imediatos, relacionados ao consumo de energia e falta de segurança.

Em relação ao consumo de energia, devido à radiação direta do sol, a iluminância exterior pode atingir níveis acima de 100.000 lux, e a iluminação no interior do túnel deve estar dimensionada para atender essa situação extrema. Quanto à falta de segurança, o sistema pode ficar desguarnecido na hipótese de falta de energia, e já existem relatos de acidentes provocados nesta situação, pois o reflexo do usuário, acometido de uma cegueira temporária, pode ser frear. Embora possam ser considerados sistemas de controle com ajuste automático e gerador, estes sistemas aumentam a complexidade operacional e de manutenção, ainda mais se considerarmos a localização e agressividade do meio aos componentes eletrônicos, devido à fuligem e gases emitidos pelos veículos.

No cálculo luminotécnico de túneis rodoviários, a prática brasileira está fundamentada no Projeto de Norma ABNT P-NB-318. Entretanto, em relação às recomendações internacionais pesquisadas, existem significativas divergências que não incentivam, no Brasil, a adoção de procedimentos e estratégias que possibilitem diminuir ou adequar naturalmente o nível de iluminação necessário sem prejuízo da segurança.

Este artigo parte de uma análise crítica das recomendações pesquisadas e propõe procedimentos e estratégias relacionados à iluminação de túneis. Alguns destes procedimentos são aplicados a um estudo de caso no Túnel 3 do Rodoanel Mário Covas. Além de introduzir uma discussão que poderá contribuir para a revisão em andamento do Projeto de Norma ABNT P-NB-318, o objetivo deste trabalho é demonstrar a influência de soluções passivas - a serem adotadas principalmente na fase projetual - na redução do consumo energético para iluminação de túneis rodoviários, buscando tratar adequadamente os aspectos significativos que regem os fenômenos em questão: ofuscamento desabilitador e adaptação visual.

2 TERMINOLOGIA

Na iluminação de túneis são consideradas cinco zonas:

- **Zona de Acesso ou de Aproximação:** Trecho exterior imediato à entrada do túnel;
- **Zona Limiar:** Primeiro trecho após a entrada do túnel. Apresenta o maior nível de iluminação;
- **Zona de Transição:** Trecho que interliga as zonas Limiar e Interior. Nível de iluminação variável;
- **Zona Interior:** Trecho posterior à Zona de Transição, onde o nível de iluminação é mínimo;
- **Zona de Saída:** Trecho final. Sofre influência da iluminação exterior.

A Figura 1 é um corte longitudinal esquemático que ilustra as zonas de iluminação

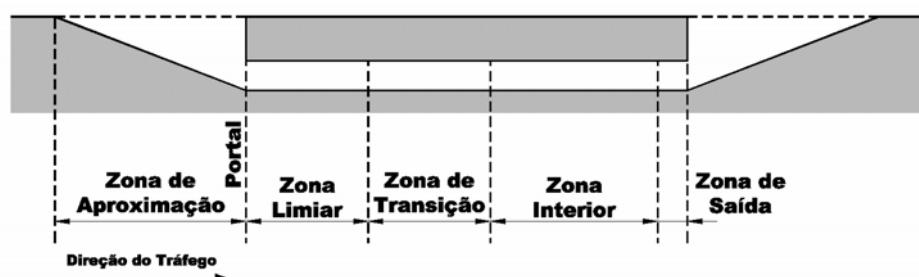


Figura 1 – Terminologia
Fonte – SCHREUDER, 1967, p.158

Acrescentam-se ainda à terminologia o **Portal**, situado no plano que separa o exterior e interior do túnel, e o **Emboque**, relativo às imediações do portal no lado exterior.

No estudo luminotécnico de túneis admitem-se dois fenômenos distintos. O primeiro ocorre no instante em que o motorista se aproxima do portal de entrada. É conhecido por “Efeito Buraco Negro”, envolvendo a presença simultânea no campo visual de áreas com grande diferença de brilho (entorno do portal e interior do túnel.). Neste fenômeno estuda-se a visibilidade de um objeto alvo de 20 x 20cm sobre o pavimento. O segundo fenômeno inicia quando o interior do túnel abrange todo o campo visual do motorista, que passa a observar uma seqüência decrescente de diferentes luminâncias. Embora sejam fenômenos semelhantes, o primeiro ocorre lado a lado e o segundo um após o outro. Por isso, os dois fenômenos são estudados separadamente.

Basicamente, as recomendações buscam dimensionar os comprimentos e luminâncias das referidas zonas. A chave do problema encontra-se na Zona Limiar, pois influencia tanto a Zona de Aproximação como as zonas interiores do túnel.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Instruções Normativas

Foram selecionadas as seguintes normas e recomendações para uma análise comparativa:

- ABNT: **P-NB-318: Iluminação de Túneis;**
- ANSI/IESNA: **RP-22-96: American National Standard Practice for Tunnel Lighting;**
- CIE: **CIE 88: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses;**
- BSI: **BS 5489: Code of Practice for the Lighting of Tunnels and Underpasses**

O critério de escolha considerou a ABNT por ser a representante brasileira perante a ISO, a IESNA e CIE por serem entidades de reconhecimento internacional, freqüentemente citadas como referência em todo o mundo na área de iluminação, e a BSI como mais uma representante da ISO mas em outro hemisfério e continente, com condições climáticas diferenciadas. Embora haja variações, as recomendações internacionais utilizam critérios e parâmetros semelhantes, o que não se observa no projeto de norma brasileiro, onde ocorrem significativas discrepâncias em relação às demais (Tabela 1).

Tabela 1 – Analise Comparativa (ABNT x CIE/BSI/IESNA)

	ABNT P-NB-318	CIE / BSI / IESNA
Classificação	Longo e Curto	Longo e Curto
Zona Limiar:		
Método de Cálculo	Não utiliza	Lseq X L20
Comprimento	2s (28 a 67 m)	60 a 200m (função DSF)
Dispositivo Quebra-Luz	Sem critério	Critério fundamentado
Zona de Transição:		
Redução 1/10	Por tempo (2s)	Método Gráfico (8 a 10s)
Zona Interior:	100 lx	3 a 10 cd/m ²
Zona de Saída	Sem recomendação	Recomendações complementares
Geral		
Uniformidade	Sem recomendação	Lmin / Lmed > 0,6
Intermitência (a evitar):	entre 5 e 10 Hz	entre 5 e 10 Hz ou 2,5 e 15 Hz

As maiores divergências são identificadas nos comprimentos das zonas e no critério para determinar o nível de iluminação necessário na Zona Limiar. A falta de um método de cálculo pela ABNT induz à adoção de valores mínimos, que não possuem correspondência com qualquer característica do emboque. Desta forma, desconsidera-se a influência dos elementos fundamentais do problema que são as fontes de ofuscamento. Este é um aspecto determinante do fenômeno, que é tratado em detalhe nas recomendações internacionais.

3.2 Luminância na Zona Limiar: Método de Cálculo

A principal discussão no meio especializado para calcular a Luminância da Zona Limiar (L_{th}), vem ocorrendo entre dois métodos conhecidos como Método L_{seq} (luminância de véu equivalente) e Método L_{20} (luminância média em um campo cônico de visão com abertura de 20°). Os dois métodos consistem em avaliar graficamente a influência dos elementos que interferem no campo visual a uma determinada distância do portal do túnel.

A CIE e BSI propõem o Método L_{20} . Entretanto, a CIE considera o método provisório e apresenta o Método L_{seq} em Anexo. A IESNA cita as recomendações da CIE de maneira bastante vaga, mas enfatiza o Método L_{seq} .

A principal crítica ao Método L_{20} é que, ao considerar a média das luminâncias, todos os elementos têm o mesmo impacto, independente da distância à linha de visão do observador. Além disso, a escolha do ângulo 20° deve-se ao equipamento de medição disponível na época, desenvolvido, especialmente, para iluminação viária. (ADRIAN, 1990. p.125). Assim, existe uma tendência à adoção do Método L_{seq} como alternativa ao tradicional Método L_{20} (PIMENTA, 2002).

O diagrama polar proposto no Método L_{seq} parte de um círculo central correspondente ao ângulo cônico de 2° que é envolvido por nove anéis subdivididos em doze seções, consideradas como fontes individuais de ofuscamento (Figura 2). O diagrama é sobreposto a uma vista do emboque tomada à distância aproximada de 160m. A esta distância, a altura da abertura do túnel quase coincide com o círculo central do diagrama. As luminâncias de cada seção do diagrama podem ser determinadas por medições “in loco” ou estimadas por valores tabelados. Como as áreas das seções do diagrama diminuem ao se aproximar do centro, sua contribuição é valorizada, pois o cálculo baseia-se na somatória das luminâncias das seções.

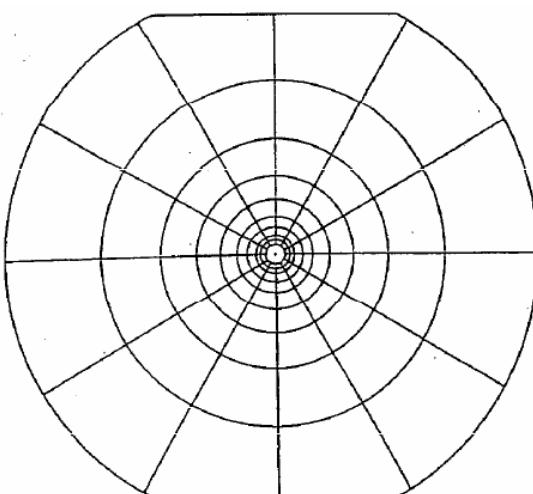


Figura 2 – Diagrama Polar
FONTE IESNA,1996 p.26

A equação adotada para construção do diagrama baseia-se na versão modificada da fórmula de Holladay-Stiles (IESNA, 1996):

$$L_{seq} = 9.2 \sum_{i=1}^n \frac{E_{Gli}}{\theta_i^2} \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

- L_{seq} Luminância de véu equivalente (cd/m²);
 E_{Gli} Iluminância produzida no olho pela fonte de ofuscamento (lux);
 θ_i^2 Ângulo entre a linha de visão e a fonte de ofuscamento (grau).

A luminância média de cada seção resulta da média aritmética das contribuições dos elementos inseridos em sua área. A Luminância na Zona Limiar L_{th} é obtida em função da Luminância de Véu Equivalente L_{seq} segundo as seguintes equações:

$$L_{seq} = 0.5131 \cdot 10^{-3} \sum L_i \quad (\text{eq.2})$$

$$L_{th} = F_{SRN5} \cdot L_{seq} \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

- L_{seq} Luminância de véu equivalente;
 L_i Luminância média de cada seção;
 L_{th} Luminância na Zona Limiar;
 F_{SRN5} Fator para SRN=5 que corresponde a 1,41

4 METODOLOGIA

A Luminância na Zona Limiar L_{th} é o ponto chave do problema. Para sua determinação adotou-se o Método L_{seq} , considerando ser sua fundamentação teórica mais consistente que o Método L_{20} .

Os túneis do Rodoanel Mário Covas foram escolhidos como amostra para os estudos de caso. Influenciaram na escolha a disponibilidade de recursos - tanto pela proximidade do local como pelo acesso à documentação técnica - e a característica recente da obra, representando soluções adotadas atualmente no Brasil para iluminação de túneis.

Os dados obtidos foram referenciados nas recomendações nacionais e internacionais pesquisadas para análise, cálculo e aplicação das estratégias.

4.1 Medições e cálculo aplicando o Método L_{seq}

O Rodoanel Mário Covas é composto de 4 trechos: OESTE, NORTE, LESTE e SUL. A principal característica funcional da obra está em desviar o tráfego externo que apenas passa pela metrópole, interligando as rodovias que convergem para a cidade de São Paulo. Existem duas pistas em toda a sua extensão: Pista Externa e Pista Interna. O fluxo de veículos da Pista Externa tem sentido anti-horário e da Pista Interna, horário. O trecho OESTE, já concluído, contém três túneis com emboques nas orientações Sul, Sudoeste e Nordeste. Uma particularidade dos túneis é a existência de quatro faixas de rolamento. Nos emboques de entrada dos túneis, há uma placa que os identifica. A nomenclatura TE ou TI significa, respectivamente, Túnel Pista Externa e Túnel Pista Interna, seguida do número de ordem para identificação dos emboques.

As medições foram efetuadas em 24 de julho de 2003 e utilizaram basicamente um luminancímetro “Minolta – LS110” com tripé e uma Câmera digital “Nikon” – Coolpix 5700. Os procedimentos foram referenciados nos Métodos L_{seq} e L_{20} , posicionando os equipamentos a aproximadamente 160m do portal para registrar as luminâncias e o cenário do ponto de vista do motorista. Os valores registrados *in loco* foram transportados para as imagens digitais, compondo a base para sobrepor o diagrama da Figura 2.

5 RESULTADOS: DIAGNÓSTICO E ESTRATÉGIAS

Aplicando o Método L_{seq} nos túneis do Rodoanel Mário Covas, observou-se grande variação nos valores encontrados para Luminância L_{th} e consequentemente para a Iluminância E_{th} na Zona Limiar, em função do horário da medição e orientação do portal do túnel. Para a latitude de São Paulo (23°37' Sul), a data escolhida para as medições, próxima ao Solstício de Inverno, representa a condição crítica para a orientação Norte em torno das 12:00h. Nos emboques TE-2 e TE-3, que mais bem representam essa condição, a iluminância calculada se aproximou da registrada em campo e também da recomendada pelas normas internacionais pesquisadas, mas está acima da recomendada pela ABNT. Nos demais emboques, os valores calculados estão sempre significativamente abaixo dos medidos em campo, em torno de 50 e 38% nos emboques TI-3 e TI-2, chegando a 16 e 5% nos emboques TI-1 e TE-1 ao aproximar-se o final da tarde (Tabela 2).

Tabela 2 – Método L_{seq} : Resumo dos Resultados

Cod.	Nome do Emboque	Orient.	Horário	Método L_{seq}		Recomendações		
				Eth (lx)	L_{th} (cd/m ²)	ABNT ¹ L_{th} (lx)	IESNA ² L_{th} (cd/m ²)	CIE/BSI ³ L_{th} (cd/m ²)
TE-1	Jesus	45° NE	17:00 às 17:10	169	16	260	320	450
TI-1	Ithyê	30° SO	16:25 às 16:40	582	56	260	310	300
TE-2	Parque Imperial	20° NE	11:00 às 12:00	3882	371	260	320	450
TI-2	Tamboré	40° SO	15:45 às 16:15	1374	131	260	310	300
TE-3	Gramado	20° NE	12:45 às 13:00	3225	308	260	320	450
TI-3	Vista Alegre	0° S	14:45 às 15:20	1822	174	260	310	300

5.1 Estratégias para diminuição de L_{th}

A grande variação encontrada nas medições reforça a importância da adoção de um Método de Cálculo nas instruções normativas. Além disso, tal recurso é fundamental para propor alternativas que possibilitem diminuir o potencial das fontes de ofuscamento. Neste intuito, foram identificadas cinco estratégias:

1. Tratamento superficial, diminuindo a Luminância de Véu Equivalente L_{seq} ;
2. Elementos de controle da luz no plano do portal;
3. Desenho do portal, buscando diminuir as fontes de ofuscamento e aumentar a penetração da luz difusa por reflexão;
4. Túnel falso no emboque de entrada, dosando a luz por aberturas zenitais e laterais;
5. Painéis fotovoltaicos, suprindo total ou parcialmente a iluminação em todas as zonas do túnel.

As três primeiras tratam principalmente as fontes de ofuscamento e deverão trabalhar em sintonia com o sistema artificial, sem caracterizar a autonomia do sistema. Observa-se que as Estratégias 1 e 2 são medidas mitigadoras, enquanto que as Estratégias 4 e 5 são provedoras de luz e energia. Já a Estratégia 3 pode apresentar dupla função, interferindo tanto nas fontes de ofuscamento como no nível de iluminação na Zona Limiar.

¹ Para facilitar a verificação comparativa, o valor recomendado pela ABNT para E_{th} (2700 lx) foi transformado em L_{th} em função da refletância da pista de concreto (30%).

² Adotaram-se, nesta coluna, valores tabelados apresentados pela IESNA como opção para determinar L_{th} .

³ Os valores indicados foram determinados por um método expedido recomendado pela CIE, que estima o valor de L_{20} sem a necessidade de aplicação do método gráfico.

As estratégias estão dispostas em ordem crescente do investimento necessário e da complexidade para sua implantação. Este aspecto dependerá de outros elementos envolvidos no projeto, e tal ordem poderá não corresponder a situações específicas. Entretanto, com pequenas variações, deverá ocorrer conforme apresentado, o que pode auxiliar na escolha da melhor opção. Esta consideração é importante para uma primeira seleção das alternativas viáveis segundo os recursos disponíveis. Cabe salientar que, para configurar soluções mais simples e econômicas, as estratégias 1, 2 e 3 devem ser contempladas na fase projetual, sem o que perderão esta qualidade e poderão tornar-se inviáveis.

As estratégias podem trabalhar isoladas ou combinadas entre si, configurando novas estratégias. Pela ordem apresentada, cada estratégia pode conter a anterior. Assim, os painéis fotovoltaicos (Estratégia 5) podem ser dispostos como um túnel falso (Estratégia 4) e incorporar um desenho adequado do portal para melhor aproveitamento da luz (Estratégia 3), com elementos de controle da luz (Estratégia 2). Por fim, o tratamento das superfícies envolvidas irá otimizar o desempenho de todo dispositivo (Estratégia 1).

5.1.1 Aplicação das Estratégias 1 e 2

Pela Figura 3a, observa-se que as fontes de ofuscamento mais significativas estão na pista, no entorno do portal e na parcela de céu visível. Exceto para a última, é possível propor intervenções que diminuam o potencial de ofuscamento dessas fontes. Alterando a refletância da pista existente, que é aproximadamente 30% (concreto), para 15% (asfalto) e substituindo o revestimento do entorno do portal por vegetação, pode-se ter uma idéia da influência das Estratégias 1 e 2 na Luminância de Véu Equivalente L_{seq} e consequentemente na Luminância na Zona Limiar L_{th} (Figura 3b)⁴.



Figura 3 – Emboque Gramado (TE-3). (a) Situação existente. (b) Aplicação das estratégias, alterando a refletância da pista de 30% para 15% (Estratégia 1) e substituindo o entorno do portal (Estratégia 2)

Aplicando o Método L_{seq} foram estimados os novos valores decorrentes das alterações propostas. A Figura 4a e a Tabela 3 referem-se à situação existente.

A Estratégia 1 está representada com valores na cor branca (Figura 4b) e em itálico (Tabela 4). Como a refletância admitida para a pista (15%) é metade da registrada nas medições (30%), os valores originais foram divididos por 2.

Para a Estratégia 2, na cor azul (Figura 4b) e fundo cinza (Tabela 4), foi adotado um valor fixo (0,94 cd/m^2), registrado nas vegetações mais densas no lado direito do emboque.

⁴ A Figura 3b foi alterada através de recursos computacionais para ilustrar a aplicação das estratégias.

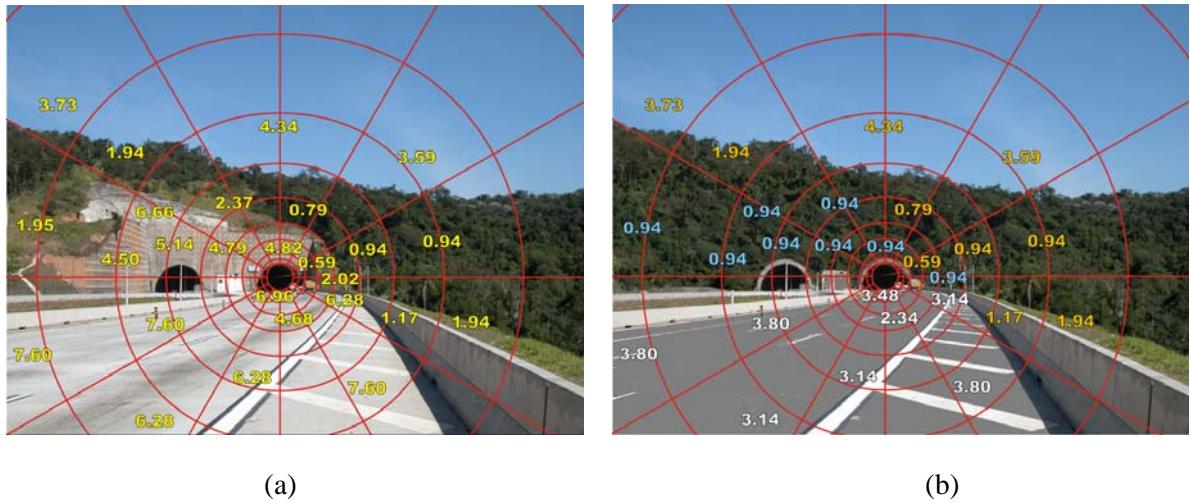


Figura 4 – Diagrama do Método L_{seq} aplicado ao Emboque Gramado (TE-3). (a) Situação existente. (b) Aplicação da Estratégia 1 (valores na cor branca) e da Estratégia 2 (valores em azul)

Tabela 3 – Método L_{seq} : Situação Existente

Túnel: 3 - Régis Bittencourt RODOANEL METROPOLITANO MÁRIO COVAS										
Extensão: 450m										
Emboque: Gramado (TE-3)										
Orientação: 20°NE										
ANÉIS										
Seções	A	B	C	D	E	F	G	H	I	SOMA
1	4,82	4,82	4,82	3,35	0,79	1,28	4,34	4,34	NÃO	28,56
2	4,82	4,82	4,40	3,20	0,87	0,94	2,53	3,59	3,59	28,76
3	0,25	0,59	0,59	2,02	0,94	0,94	0,94	1,47	1,60	9,34
4	0,25	0,59	1,86	3,35	3,94	3,24	1,06	1,23	1,23	16,75
5	0,25	6,96	4,68	4,68	6,28	7,60	6,96	5,03	3,09	45,53
6	6,96	6,96	6,96	4,68	6,28	7,60	7,60	7,60	NÃO	54,64
7	6,96	6,96	6,96	5,82	4,68	6,28	6,28	7,60	NÃO	51,54
8	0,25	3,60	6,96	6,96	6,00	6,14	5,48	6,28	6,28	47,95
9	0,25	1,16	4,82	6,96	5,82	6,08	6,05	6,00	6,00	43,14
10	0,25	4,82	4,82	4,82	4,79	4,62	4,82	3,77	1,95	34,66
11	4,82	4,82	4,82	4,82	3,58	3,20	2,15	3,19	3,75	35,15
12	4,82	4,82	4,82	3,35	1,58	1,58	4,34	4,34	NÃO	29,65
$\sum Li (kcd/m^2) =$									425,67	
OBS: Sol direto predominante										
$L_{seq} (cd/m^2) =$									218	
$L_{th} (cd/m^2) =$									308	
ρ (pavimento) =									0,30	
$Eth (lx) =$									3225	

Tabela 4 – Método L_{seq} : Aplicação das Estratégias: Estratégia 1 (ítalo) Estratégia 2 (fundo cinza)

Túnel: 3 - Régis Bittencourt RODOANEL METROPOLITANO MÁRIO COVAS									
Extensão:	450m								
Emboque:	Gramado (TE-3)								
Orientação:	20°NE								
ANÉIS									
Seções	A	B	C	D	E	F	G	I	SOMA
1	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	4,34	4,34	NÃO
2	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	2,53	3,59	3,59
3	0,25	0,59	0,59	2,02	0,94	0,94	0,94	1,47	1,60
4	0,25	0,59	1,86	3,35	3,94	3,24	1,06	1,23	1,23
5	0,25	3,48	3,51	2,34	3,14	3,80	3,48	2,52	2,00
6	3,48	3,48	3,48	2,34	3,14	3,80	3,80	3,80	NÃO
7	3,48	3,48	3,48	2,91	2,34	3,14	3,14	3,80	NÃO
8	0,25	3,60	3,48	3,48	3,00	3,07	2,74	3,14	3,14
9	0,25	1,16	0,94	6,96	2,91	3,04	3,03	3,00	3,00
10	0,25	0,94	0,94	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
11	4,82	0,94	0,94	4,82	0,94	0,94	0,94	2,19	3,75
12	4,82	0,94	0,94	3,35	0,94	1,58	4,34	4,34	NÃO
$\sum Li (kcd/m^2) =$									244,50
OBS: Sol direto predominante									
$L_{seq} (cd/m^2) =$									125
$L_{th} (cd/m^2) =$									177
$\rho (pavimento) =$									0,30
$E_{th} (lux) =$									1852

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Aplicando as duas estratégias, observou-se a seguinte redução no nível de iluminação:

	$L_{seq} (cd/m^2)$	$L_{th} (cd/m^2)$	$E_{th} (lux)$
Valores originais:	218	308	3225
Estratégias 1 e 2:	125	177	1852

A aplicação das estratégias resultou na diminuição de 42,5% no nível de iluminação inicial e, embora com menor impacto que a Estratégia 1, a Estratégia 2 proporcionou 16,5% desta redução. Sendo incorporada nos projetos de engenharia, a Estratégia 1 não deverá onerar a obra, bastando alterar a especificação do pavimento. A Estratégia 2 também deverá ter pouca influência no custo final da obra se contemplada na fase projetual, substituindo muros de contenção e empenas de concreto por taludes com revestimento vegetal. Tal opção também favorece o resultado arquitetônico e o impacto ambiental, diminuindo a interferência do emboque na paisagem.

Na Zona Limiar dos túneis do Rodoanel são utilizadas aproximadamente 170 lâmpadas HPS 400W, resultando no consumo mensal de 24.480 kWh. Considerando a área abrangida por esta zona (1020 m²), tem-se o consumo de 24 kWh/m²/mês, próximo ao normalmente observado no consumo total do setor de supermercados. Além disso, tem-se o mesmo nível indicado para tarefas prolongadas de elevada acuidade atendendo uma situação transitória de dirigir, onde o requisito visual é baixo. Portanto, embora o problema do ofuscamento desabilitador em túneis rodoviários pareça satisfatoriamente resolvido pela iluminação artificial, existem outras implicações a serem consideradas, como o consumo energético inadequado. Intervir nos elementos que provocam o fenômeno está de acordo com a noção de conservação de energia, que não pode ser entendida como uma mera redução de consumo, mas deve procurar conservar trabalho, pois é este que mede a eficiência da produtividade da energia.

Para possibilitar e motivar a redução do consumo energético no projeto luminotécnico de túneis rodoviários, sem prejuízo de sua eficiência, é fundamental o aprimoramento da norma brasileira, incluindo uma metodologia de cálculo e dimensionamento que considere a influência das fontes de ofuscamento.

7 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

As estratégias 3, 4 e 5 envolvem certa complexidade e dependerão dos recursos do empreendimento para serem viabilizadas. Embora não tenham sido tratadas em detalhe neste trabalho, foram identificadas as seguintes obras utilizando estas estratégias:

- **Estratégia 3 - Obra:** Thorold / Ontario / Canadá. – túnel sob canal.
Observações: portal com desenho diferenciado favorecendo a penetração da luz natural;
- **Estratégia 4 - Obra:** Schipholtunnel /Amsterdã / Holanda.- túnel sob pista de aeroporto.
Observações: Emboque com túnel falso de 150m. Pista de alta velocidade (sem limite)
- **Estratégia 5 - Obra:** perto de Abha e Al-baha / Arábia Saudita - túnel em montanha.
Observações: sistema fotovoltaico autônomo.

As recomendações CIE 88 e ANSI / IESNA. RP-22 foram revisadas recentemente e publicadas respectivamente em 2004 e 2006, introduzindo significativas alterações. Estas estão sendo analisadas e não foram incluídas neste trabalho, mas serão incorporadas futuramente.

8 REFERÊNCIAS

- ADRIAN, W. **A Method for the Design of Tunel Entrance Lighting.** Journal of the IES. winter 1990. p. 125-33
- ALEXANDER, G. A.; HOBSON, R. C.; McKNIGHT, S. W. **Lighting the New Four-Lane Highway Tunnel at Thorold, Ontario.** Journal of the IES. March 1970. p. 163-71.
- ANSI / IESNA. **RP-22-96: American National Standard Pratice for Tunnel Lighting.** New York, 1996. 31 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **P-NB-318: Iluminação de Túneis.** Rio de Janeiro, 1976. 10 p.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5489: Road Lighting: Code of Pratice for the Lighting of Tunnels and Underpasses.** 3. ed. London, 1992. 38 p.
- COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 88: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses.** Viena, 1990. 42 p.
- ENERGY RESEARCH INSTITUTE (ERI), KING ABDULAZIZ CITY FOR SCIENCE AND TECNOLOGY (KACST). **Lighting Tunnels: Saudi Arabia.** Disponível em: <<http://tcdc.undp.org/experiences/vol8/Saudi%20Arabia.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2003.
- PIMENTA, J. L. **A Luz no Emboque do Túnel.** Revista Lumiere. n.46. fev. 2002. p.84-90.
- SCHREUDER, D. A. **Tunnel Lighting.** In: BOER, J.B. de, *Public Lighting*. Eindhoven: N.V. Philips, 1967. p.156-92.

9 AGRADECIMENTOS

O autor agradece à prof. Marcia Peinado Alucci pelo acompanhamento deste trabalho; à CAPES pelo apoio à pesquisa; aos professores e alunos do LABAUT Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética; à Seção Técnica de Fotometria do IEEUSP pelo fornecimento dos equipamentos para as medições; à DERSA por autorizar as medições e pelo fornecimento de informações e documentação técnica.