

SÉRGIO MEDICI DE ESTON

BC

FT-663

V. 1

A ILUMINAÇÃO DE MINAS SUBTERRANEAS: UMA ANÁLISE
DA SITUAÇÃO BRASILEIRA.

Tese apresentada à Escola
Politécnica da USP para a
obtenção do título de
Doutor em Engenharia.

São Paulo, 1992

V. 1

SÉRGIO MÉDICI DE ESTON
Engenheiro de Minas, Escola Politécnica da USP, 1971
Master of Science, Standord University, 1975

BC

FT-663
v.1

A ILUMINAÇÃO DE MINAS SUBTERRÂNEAS: UMA ANÁLISE
DA SITUAÇÃO BRASILEIRA

Orientador: Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies

RECEBIDO
<i>marall</i>
11/9/92
PÓS-GRADUAÇÃO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da USP para a
obtenção do título de
Doutor em Engenharia.

São Paulo, 1992

A Cidinha.

Ao Nedo.

Ao Pedro e Jorge.

A Maria Luiza.

Ao Claude e ao Klaus.

Bons companheiros que tem iluminado meu caminho.

Quando se olha as estrelas, se sonha.
Quando se olha para dentro, se acorda.

(Mestre budista)

AGRADECIMENTOS

O autor expressa seus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que diretamente ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies, responsável pela nossa integração ao corpo docente do Departamento, nosso orientador e amigo de todas as horas.

Aos Prof. Dr. Antonio Stellin Jr. e Arthur Pinto Chaves pelos constantes incentivos e orientações na elaboração desta tese.

Aos Prof. Dr. Eduardo Camilher Damasceno e Helmut Born pelas críticas e sugestões sempre apropriadas.

Aos colegas do Departamento de Engenharia de Minas que sempre me incentivaram, em especial ao Dr. Henrique Kahn pelo auxílio quanto a normas e padronização de teses.

A todas as empresas que colaboraram permitindo a elaboração deste trabalho, principalmente a Petromisa, a Votorantin, a Mineração Morro Agudo, a Rio Paracatu Mineração, a CRM - Companhia de Riograndense de Mineração, a CBC - Companhia Brasileira de Cobre, a CBA - Companhia Brasileira de Alumínio, a COPELMI - Companhia de Pesquisa e Lavra de Minerais, a Mineração Santa Catarina Ltda, a Mineração Nossa Senhora do Carmo, a Carbonífera Metropolitana, a Companhia Carbonífera Urussanga, a Nova Próspera Mineração S/A, a CBCA - Companhia Brasileira de Carvão Araranjá, a Rio Paracatu Mineração, a Carbonífera Crisciuma S/A, a CVRD - Cia Vale do Rio Doce e a Mineração Morro Velho.

A FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro recebido que permitiu a maioria das visitas técnicas de campo.

Agradecimentos especiais ao Dr. Henrique Anavate, presidente da CBC e aos técnicos Luiz Paulo Pavão, superintendente da mina e engenheiro de segurança José Carlos Maffei.

Aos Drs. Emanuel de Moura Rybo e Castanho da CRM, bem como ao engenheiro de segurança Davi Cargnin, aos superintendentes de mina geólogo Nilo Sérgio Fernandes Barbosa e Jorge Dariano Gavronski, e ao engenheiro Paulo Roberto Souza Fernandes.

Ao engenheiro de minas Clovis Tadeu Bevilacqua exemplo dignificante da nossa profissão.

Ao engenheiro Lédio Sartor e ao geólogo Ocimar Maragno pela atenção durante a visita.

Ao engenheiro Arilton Valente pelas informações e gentileza demonstradas.

Ao engenheiro Jorge pela minuciosa visita proporcionada.

Aos engenheiros Arnaldo Rocha Filho e Carlyle pela atenção dispendida.

Aos consultores Edson Douglas Mantedo e Newton Valentini pelas informações, discussões técnicas e visita proporcionada.

Aos colegas engenheiros de minas da FUNDACENTRO, tanto de São Paulo como de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, particularmente Dorival Barreiros, Luis Renato e José Marçal.

Aos técnicos Alacyr e Tônico, e ao geólogo Kawamura pela paciência e atenção durante nossas anuais visitas técnicas com os

alunos.

A Maria Cristina Martinez Bonesio pelo auxílio na pesquisa bibliográfica e na organização das referências.

Ao pessoal administrativo do Departamento de Engenharia de Minas e da Escola Politécnica principalmente pela paciência no processo de reprodução de cópias xerográficas, em especial a Mônica, Bete, Tom, Eneage e Nélida.

SUMARIO

	página
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS E UNIDADES	xviii
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
NOTAS SOBRE A REDAÇÃO	xxii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Revisão bibliográfica	2
1.3. Objetivos do trabalho	3
1.4. Apresentação do trabalho	4
2. ENGENHARIA AMBIENTAL EM MINAS SUBTERRANEAS	5
2.1. Mineração e segurança	5
2.2. Programas de segurança para minas	8
2.3. Higiene do trabalho	10
2.4. Riscos e agentes ambientais	11
3. HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO DE MINAS	13
4. ILUMINAÇÃO, SEGURANÇA E PRODUTIVIDADE	15
4.1. Características do gerenciamento moderno ...	15
4.2. Iluminação e produtividade	16
4.3. Iluminação e acidentes	16
4.4. Iluminação e saúde ocupacional	17
5. A NATUREZA FÍSICA DA LUZ	18

5.1. Energia radiante visível	18
5.2. Geração, propagação e percepção da luz	19
5.3. Incandescência e luminescência	20
5.4. Reflexão, transmissão e absorção	21
5.4.1. Reflexão luminosa	22
5.4.2. Transmissão luminosa	25
5.4.3. Refração	26
5.4.4. Absorção	31
5.5. Curva espectral de eficiência luminosa	31
5.5.1. Cores	31
5.5.2. Brilho	32
6. FOTOMETRIA	34
6.1. Grandezas e unidades fotométricas	34
6.2. Fluxo radiante	36
6.3. Fluxo luminoso	36
6.3.1. Fonte padrão de luz	37
6.3.2. Comparação de fluxos luminosos	37
6.3.3. Eficácia luminosa	37
6.3.4. Eficiência global de uma lâmpada	39
6.4. Intensidade luminosa de fonte puntual	39
6.4.1. Ângulo sólido	40
6.4.2. Intensidade luminosa	42
6.5. Iluminamento de uma superfície	46
6.5.1. Iluminamento médio	46
6.5.2. Iluminamento num ponto	47
6.5.3. Medição do iluminamento	49
6.6. Luminância e percepção de brilho	50

6.7. Refletância	53
6.8. Relação entre as definições de fluxo e intensidade luminosos	58
6.9. Iluminamento, leis do cosseno e a lei do inverso do quadrado da distância	59
6.9.1. Lei do cosseno	59
6.9.2. Lei do inverso do quadrado da distância	61
6.9.3. Lei do cosseno ao cubo	63
6.10. Síntese das grandezas fotométricas	65
7. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA LUZ EMITIDA	68
7.1. Curvas de intensidade luminosa	68
7.2. Curvas de iso-iluminamento	74
7.3. Curvas de intensidade e luminância médias ...	74
7.4. Emissores, transmissores e refletores perfeitamente difusos	76
7.5. Superfícies Lambertianas e as unidades de luminância	78
7.6. Relação entre luminância e refletância	82
8. A VISÃO	85
8.1. O olho humano	85
8.2. O sistema controlador	87
8.2.1. Filtragem	87
8.2.2. Quantidade transmitida	88
8.2.3. Focalização	88
8.3. O sistema interpretador	89
8.3.1. Estrutura neural da retina	90

8.3.2. Visão fotópica e visão escotópica	92
8.3.3. Funcionamento dos bastonetes	95
8.3.4. Funcionamento dos cones	96
8.3.5. Desvio de Purkinje	97
8.4. Adaptação visual	99
8.5. Defeitos e doenças visuais	100
9. CAMPO E AMBIENTE VISUAIS	103
9.1. Campo visual	103
9.1.1. Distribuição de fotoreceptores	103
9.1.2. Limites físicos do campo	103
9.1.3. Movimentação dos olhos e cabeça	104
9.2. Ambiente visual	104
9.2.1. Contraste	105
9.2.2. Dimensão dos objetos	106
9.2.3. Efeitos do tempo	106
9.2.4. Fixação	107
9.2.5. Piscamento	107
9.2.6. Visão noturna	108
9.3. Acuidade	108
9.4. Visibilidade	109
9.5. Ofuscamento	109
9.5.1. Ofuscamento deshabilitante	109
9.5.2. Ofuscamento desconfortante	110
9.5.3. Redução do ofuscamento	110
9.6. Desempenho ocupacional	111
10. SINALIZAÇÃO E CÓDIGO DE CORES	114
10.1. Percepção de cor	114

10.2. Luz monocromática	114
10.3. Cores e identificação de objetos	115
10.4. Visão escotópica	116
10.5. Daltonismo	116
10.6. Visibilidade e refletância	117
10.7. Classificação de cores e segurança ocupacional	118
10.8. Código de cores e segurança	119
10.9. Sinalização	122
11. LAMPADAS E LUMINARIAS	127
11.1. Produção luminosa	127
11.2. Critérios comparativos	127
11.3. Tipos de lâmpadas	129
11.3.1. Lâmpadas com filamento de tungstênio	129
11.3.2. Lâmpadas halógenas de tungstênio ..	132
11.3.3. Lâmpadas fluorescentes a vapor de mercúrio	132
11.3.4. Lâmpadas a vapor de sódio a baixa pressão	133
11.3.5. Lâmpadas a vapor de sódio a alta pressão	134
11.3.6. Lâmpadas a vapor de mercúrio a alta pressão	135
11.3.7. Lâmpadas de haletos metálicos	135
11.3.8. Lâmpadas refletorizadas	135
11.4. Comparação entre as fontes usadas na mineração	136
12. INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EM MINAS	140

12.1. Introdução	140
12.2. Metodologias de manutenção	140
12.3. Vida útil das lâmpadas	141
12.4. Substituição individual e por grupo	142
12.5. Alguns procedimentos práticos recomendados .	144
13. EQUIPAMENTOS DE MEDIDA DE PARAMETROS LUMINOSOS ...	147
13.1. Principais parâmetros medidos em minas	147
13.2. Medidas de iluminamento	148
13.2.1. Método de medida planar direta	148
13.2.2. Método de medidas independentes de luz direta e luz difusa	148
13.2.3. Método da medida do valor máximo ..	149
13.3. Medidas de luminância	149
13.4. Medidas de refletância	150
13.4.1. Importância para projetos	150
13.4.2. Método por comparação incidência-reflexão	152
13.4.3. Método com amostras comparativas ..	152
13.4.4. Método por comparação padrão	153
13.4.5. Refletometria esférica	155
13.5. Valores experimentais	155
13.6. Procedimentos adotados na pesquisa efetuada.	155
14. PROJETO DE ILUMINAÇÃO EM MINAS	158
14.1. Características do projeto mineiro	158
14.2. Dificuldades inerentes ao ambiente mineiro .	158
14.2.1. Dificuldades de instalação	159
14.2.2. Variações de voltagem	159
14.2.3. Padronização imperfeita das	

15.6.6. Lâmpadas portáteis de capacete	184
15.7. Normas estrangeiras	184
15.7.1. África do Sul	185
15.7.2. Alemanha	187
15.7.3. Austrália	187
15.7.4. Bélgica	187
15.7.5. Canadá	188
15.7.6. Estados Unidos	189
15.7.7. Hungria	192
15.7.8. Inglaterra	192
15.7.9. Japão	193
15.7.10. Polônia	193
15.7.11. Tchecoslováquia	196
15.7.12. Outros países	196
15.8. Normalização no Brasil	196
15.8.1. Normas existentes no DNPM	196
15.8.2. Sugestões para normalização	197
16. CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO EM MINAS	
SUBTERRANEAS BRASILEIRAS	198
16.1. Seleção das minas a serem analisadas	198
16.2. Dificuldades de medição	201
16.3. Resultados da pesquisa de campo	202
16.3.1. Nível de conhecimento do tema	202
16.3.2. Valores medidos	203
16.4. Análise dos valores medidos	209
17. CONCLUSÕES	211

lâmpadas	159
14.2.4. Alteração do ângulo de inclinação da luminária	160
14.2.5. Alteração dos fatores de manutenção.	160
14.2.6. Absorção atmosférica	161
14.2.7. Variações da produção luminosa	161
14.3. Método ponto a ponto	161
14.3.1. Teoria básica	161
14.3.2. Efeito da luz direta	163
14.3.3. Contribuição da luz indireta	164
14.4. Método dos lúmens	166
14.4.1. Formulação básica	166
14.4.2. Fator de manutenção	167
14.4.3. Coeficiente de utilização	167
14.5. Alteração de parâmetros de projeto	170
15. NORMAS DE ILUMINAÇÃO PARA MINERAÇÃO	172
15.1. Iluminação a céu aberto e em subsolo	172
15.2. Recomendações gerais de iluminação	173
15.3. A norma brasileira NB-57	175
15.4. A Comissão Internacional de Iluminação-CIE .	176
15.5. Os Comitês Técnicos para iluminação de minas	178
15.6. Recomendações da CIE para a iluminação de minas	180
15.6.1. Tipos de iluminação	180
15.6.2. Parâmetros de projeto	181
15.6.3. Uniformidade	182
15.6.4. Ofuscamento e campo visual	183
15.6.5. Metodologia de iluminação	183

ANEXO A - NORMAS DE ILUMINAÇÃO DA ABNT	215
ANEXO B - NORMAS REGULAMENTARES DE MINERAÇÃO DO DNPM - ILUMINAÇÃO	230
ANEXO C - NORMAS DE ILUMINAÇÃO DO MINISTÉRIO DO TRABALHO	233
ANEXO D - MINA DE TAQUARI-VASSOURAS	235
ANEXO E - MINA DE BALTAR	246
ANEXO F - MINA DE MORRO AGUDO	252
ANEXO G - MINA LEÃO I	258
ANEXO H - MINA LEÃO II	264
ANEXO I - MINAS DO CAMAQUÃ: SÃO LUIZ E URUGUAI ...	267
ANEXO J - MINA SANTA CATARINA	280
ANEXO K - MINA POÇO SÃO PEDRO	290
ANEXO L - MINA ESPERANÇA	294
ANEXO M - MINA SÃO GERALDO	307
ANEXO N - MINA CBCA	310
ANEXO O - MINA MORRO DO OURO	314
ANEXO P - OBTENÇÃO DE CURVA DE INTENSIDADE LUMINOSA A PARTIR DE MEDIDAS DE ILUMINAMENTO	318
ANEXO Q - OBTENÇÃO DE NÍVEIS DE ILUMINAMENTO EM FACE ILUMINADA POR HOLOFOTE SITUADO A 3 METROS DE DISTANCIA	319

ANEXO R - NÍVEIS DE ILUMINAMENTO EM FACE ILUMINADA A DISTANCIAS DE 3, 6 E 12 METROS	321
ANEXO S - OBTENÇÃO DE CURVAS DE ISOILUMINAMENTO A PARTIR DE CURVA DE INTENSIDADE LUMINOSA	323
ANEXO T - PAÍSES MEMBROS DOS COMITÊS TÉCNICOS PARA ILUMINAÇÃO DE MINAS DA CIE	325
ANEXO U - ÁREAS A SEREM ILUMINADAS AO REDOR DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS MÓVEIS SEGUNDO AS NORMAS DOS USA	326
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	333
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	338
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	344

LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 5.1.	Espectro de radiação eletromagnética 19
FIGURA 5.2.	Tipos de reflexão 23
FIGURA 5.3.	Controle da orientação de raios luminosos de luminárias por meio da curvatura do refletor . 24
FIGURA 5.4.	Efeito da inter-reflexão na distribuição da luz transmitida por fonte luminosa dentro de bulbo 25
FIGURA 5.5.	Variação do índice de refração com o comprimento de onda 28
FIGURA 5.6.	Refração da luz na interface de dois meios de índices de refração n e n' 28
FIGURA 5.7.	Dispersão da luz num prisma 29
FIGURA 5.8.	Curva espectral de eficiência luminosa de fluxo radiante monocromático em função do comprimento de onda 32
FIGURA 5.9.	Comparação entre as medidas de energia radiante (instrumentos radiométricos) e de fluxo luminoso (instrumentos fotométricos) ... 33
FIGURA 6.1.	Transformação de potência elétrica em energia radiante 34
FIGURA 6.2.	Uma parte do fluxo radiante ϕ_r compõe o fluxo luminoso ϕ_l , o qual é capaz de sensibilizar o olho e cuja unidade é o lúmen (e não o watt) . 35
FIGURA 6.3.	Da potência elétrica inicial apenas uma parte se transforma em fluxo luminoso; η_e e η_l são os fatores que expressam as eficiências desta transformação 36
FIGURA 6.4.	Fonte de luz padrão internacional 38
FIGURA 6.5.	Em a. temos alguns ângulos sólidos numa esfera de raio R ; em b. temos um ângulo plano num círculo de raio R 41
FIGURA 6.6.	A relação entre ângulo sólido $\Delta\Omega$ e ângulo efetivo do fecho $\Delta\phi$ relaciona esterorradianos com radianos (ou graus) 42
FIGURA 6.7.	Ângulos sólidos Ω_1 e Ω_2 iguais,

	contendo diferentes quantidades de lúmens	44
FIGURA 6.8.	Ângulo sólido para área infinitesimal não esférica	45
FIGURA 6.9.	Ângulo efetivo de feixe luminoso para holofote mineiro	46
FIGURA 6.10.	Fluxo luminoso total atingindo a área ΔS	47
FIGURA 6.11.	Conceito de luminância de uma superfície de área A na direção do observador O	51
FIGURA 6.12.	Tipos básicos de reflexão superficial	55
FIGURA 6.13.	Goniorefletância média das faces de uma mina obtida por Crooks e Peay	58
FIGURA 6.14.	Iluminamentos causados por um mesmo feixe sobre duas superfícies planas inclinadas entre si de ϕ	60
FIGURA 6.15.	Superfícies esféricas A1 e A2 distantes R1 e R2 da fonte puntual F. Ambas subentendem o mesmo ângulo sólido, e são normais aos raios luminosos	62
FIGURA 6.16.	Iluminamento num ponto P distante Rp da fonte F	62
FIGURA 6.17.	Iluminamento numa área A inclinada de um ângulo ϕ com relação a direção dos raios luminosos	63
FIGURA 6.18.	Iluminamento no elemento de área dA inclinado do ângulo ϕ com relação a direção do feixe contido no ângulo sólido	64
FIGURA 6.19.	Galeria com fontes puntuais localizadas ao longo do eixo do teto	64
FIGURA 6.20.	Relação entre intensidades, fluxo, iluminamento e luminância	67
FIGURA 7.1.	Curva de intensidade luminosa para fonte puntual semelhante a lâmpada incandescente comum	68
FIGURA 7.2.	Vista em planta de um holofote para o qual foram efetuadas medidas de iluminamento a 5 m de distância a intervalos angulares de 5 graus	69
FIGURA 7.3.	Curva de intensidade luminosa para plano horizontal contendo a fonte de luz de um	

	holofote	70
FIGURA 7.4.	Vista em planta de um holofote iluminando a face livre de carvão	71
FIGURA 7.5.	Iluminamento na face a várias distâncias do eixo do fecho, para plano horizontal	71
FIGURA 7.6.	Circunferências concêntricas de isoiluminamento na face livre	72
FIGURA 7.7.	Possíveis curvas de isoiluminamento para fonte que não distribui luz simetricamente no espaço	72
FIGURA 7.8.	Distribuições do iluminamento em faces distantes 3, 6 e 12 m da fonte luminosa	73
FIGURA 7.9.	Curvas de isoiluminamento para holofote onde se utiliza coordenadas polares (R, θ)	74
FIGURA 7.10.	Pontos de observação de uma fonte luminosa extensa	76
FIGURA 7.11.	Em a. temos o ponto de observação P; em b. temos a projeção da área A na direção de observação	77
FIGURA 7.12.	Relação entre ângulo de observação θ e intensidade segundo a direção de θ para superfícies perfeitamente difusoras	77
FIGURA 7.13.	Relações geométricas no "intensidoide" associado a superfície difusora perfeita A; dS é uma calota esférica infinitesimal sobre o "intensidoide"	79
FIGURA 7.14.	Ângulo sólido no "intensidoide" definido pela área infinitesimal dS	80
FIGURA 7.15.	Área infinitesimal dS expressa em coordenadas esféricas (r, φ, ψ)	80
FIGURA 7.16.	Casos recomendado (a) e não recomendado (b) de cálculo de luminância através de medida de iluminamento	81
FIGURA 7.17.	Relações entre diversas unidades para iluminamento e luminância	84
FIGURA 8.1.	Em a. temos os principais componentes anatômicos do olho humano; em b. olho com as pálpebras e cílios	86
FIGURA 8.2.	a. Focalização da luz num único ponto da	

	retina de modo que seja possível a percepção de detalhes; b. sem a atuação da córnea e do cristalino não se formaria uma imagem nítida (puntual) na retina e a visão seria borrada ..	88
FIGURA 8.3.	Olho normal relaxado com um foco no infinito e outro na retina	89
FIGURA 8.4.	Olho amétrope míope e hipermétrope	90
FIGURA 8.5.	Em a. temos uma secção da retina com os cones e bastonetes; em b. temos em detalhe os fotoreceptores, as células bipolares, as células ganglionares e as fibras do nervo ótico que se conectam ao cérebro	91
FIGURA 8.6.	Sistema interpretador das sensações visuais ..	92
FIGURA 8.7.	Distribuição não uniforme de cones e bastonetes pela retina	93
FIGURA 8.8.	Pode-se comprovar a existência do ponto cego fechando-se o olho esquerdo e olhando para a cruz com o direito	93
FIGURA 8.9.	Área em face de carvão com refletância de 4% onde se atinge o limite mínimo de 0,2 nit necessário para ativação de todos os fotoreceptores	95
FIGURA 8.10.	Desvio de Purkinje relativo a diferença de máxima sensibilidade para as visões fotópicas (visão central adaptada à luz) e escotópica (visão periférica adaptada à penumbra)	98
FIGURA 8.11.	Manutenção da adaptação à penumbra pelo tapamento de um olho com uma das mãos ao se passar por uma área muito iluminada	101
FIGURA 10.1.	O aviso da esquerda provoca imediata reação no leitor enquanto que o da direita requer um certo tempo de percepção	122
FIGURA 10.2.	Sinalização de perigo	124
FIGURA 10.3.	Sinalização de atenção	124
FIGURA 10.4.	Sinalização de instrução de segurança	124
FIGURA 10.5.	Sinalização de direção	125
FIGURA 10.6.	Sinalização de simples direção	125
FIGURA 10.7.	Símbolos mais usuais	125

FIGURA 10.8.	Simbologia usual para tipos de lâmpadas	126
FIGURA 11.1.	Classificação dos tipos de lâmpadas a partir do tipo de produção luminosa	128
FIGURA 11.2.	Luminância das diversas fontes	137
FIGURA 11.3.	Distribuição espectral para lâmpadas incandescentes e fluorescentes em comparação com a luz solar	139
FIGURA 12.1.	Curvas de mortalidade para lâmpadas usadas na mineração de carvão	143
FIGURA 12.2.	Estratégias de manutenção preventiva	145
FIGURA 13.1.	Medidas de luminância com fotômetro orientado para superfície de carvão	149
FIGURA 13.2.	Geometria de medida de luminância com fotômetro com ângulo de trabalho de 26 graus, operando a uma distância de 1,5 m da superfície	150
FIGURA 13.3.	Metodologia normalizada nos Estados Unidos para fiscalização de nível mínimo de luminância em minas de carvão	151
FIGURA 13.4.	Procedimento prático para determinação da refletância por comparação com amostras padrão	153
FIGURA 13.5.	Disposição geométrica para metodologia por comparação com amostra padrão	154
FIGURA 14.1.	Alteração da distribuição espacial da luz emitida por uma fonte em função da mudança do ângulo de inclinação	160
FIGURA 14.2.	Disposição geométrica de galeria de mina adequada para aplicação da lei do cosseno ao cubo	162
FIGURA 15.1.	Esquema de luminância para iluminação de interiores	178
FIGURA 15.2.	Relações lineares entre as grandezas luminância e iluminamento para diversas faixas de refletância de superfícies encontradas em minas subterrâneas	183

LISTA DE TABELAS

	página
TABELA 2.1. Alguns eventos passados associados a segurança e saúde ocupacional na mineração ...	06
TABELA 3.1. Evolução cronológica da iluminação subterrânea de carvão	13
TABELA 5.1. Temperaturas de algumas fontes incandescentes.	21
TABELA 5.2. Alguns valores de índices de refração	27
TABELA 5.3. Valores do índice de refração para vários comprimentos de onda (λ) e tipos de vidro ...	29
TABELA 6.1. Eficiências luminosas globais para diversas lâmpadas	40
TABELA 6.2. Fontes comuns consideradas em primeira aproximação como puntuais e suas intensidades médias	43
TABELA 6.3. Ordens de grandeza de iluminamentos ocorrentes em algumas situações típicas, com fluxo incidente numa superfície plana	48
TABELA 6.4. Luminâncias médias em candelas por metro quadrado ou nit	52
TABELA 6.5. Refletâncias obtidas em minas de carvão canadenses, próximas a Sidney na Nova Escócia.	56
TABELA 6.6. Faixas de variação para a refletância, medida em 15 minas subterrâneas canadenses ...	56
TABELA 6.7. Principais grandezas fotométricas	66
TABELA 8.1. Elementos que compoem os sistemas controlador e interpretador da luz	87
TABELA 9.1. Exemplos de ofuscamento ocorrentes na mineração	111
TABELA 9.2. Comparação de desempenho visual para diversas faixas etárias	113
TABELA 10.1. Classificação de cores e comprimentos de onda	119
TABELA 11.1. Comparação entre diversas fontes luminosas usadas na mineração	137

TABELA 11.2.	Características de distribuição espectral, influência na cor percebida dos objetos e aplicações	138
TABELA 13.1.	Resultados experimentais obtidos com amostras analisadas em laboratório	156
TABELA 13.2.	Valores de refletância difusa para as superfícies internas de vias mineiras	157
TABELA 14.1.	Valores do fluxo luminoso devido a múltiplas reflexões em função da refletância	165
TABELA 14.2.	Fatores de manutenção (FM) para minas subterrâneas	168
TABELA 14.3.	Índices de área I(área) e coeficientes de utilização (CUT) para três tipos de luminária.	169
TABELA 14.4.	Valores de refletância de superfícies mineiras antes da calação e após dois anos ...	170
TABELA 15.1.	Níveis de iluminação normalmente recomendados na literatura	174
TABELA 15.2.	Valores mínimos de iluminação recomendados pela IES americana	175
TABELA 15.3.	Alguns valores constantes na Norma Brasileira NB - 57 da ABNT	176
TABELA 15.4.	Luminâncias recomendadas e iluminamentos horizontais correspondentes	177
TABELA 15.5.	Classes de mina para fins de iluminação	194
TABELA 15.6.	Níveis de iluminação em áreas de transporte.	194
TABELA 15.7.	Iluminamentos para áreas de trabalho	195
TABELA 15.8.	Iluminamentos para faces de produção	195
TABELA 16.1.	Valores de iluminação (iluminância) para os diversos locais pesquisados	204
TABELA 16.2.	Valores de refletância expressos em porcentagem	209

LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS E UNIDADES

Letras latinas

- a - absorvância, adimensional
- A - área, m²
- c - velocidade da luz num meio, km/s
- C - contraste luminoso, adimensional
- CUT - coeficiente de utilização, adimensional
- e - eficiência, adimensional
- E - iluminamento (ou iluminância), lx
- f - frequência, Hz ou fator de luminosidade, adimensional
- FA - fator de absorção atmosférica, adimensional
- FM - fator de manutenção, adimensional
- h - altura, m
- H - altura, m
- I - intensidade luminosa, cd
- l - comprimento, m
- L - luminância, nit
- L' - luminância, lx
- n, n_λ - índice de refração, adimensional ou número de luminárias
- P - produtividade
- Pel - potência elétrica, W
- r - refletância, adimensional
- R - distância radial, m
- S - área, m²
- t - transmitância, adimensional
- tu - transmissividade (transmitância unitária), 1/km
- T - período, s

- v - velocidade, km/s ou m/s
V - visibilidade, adimensional
x - distância, m
X - distância, m
y - distância, m
Y - distância, m

Letras gregas

- λ - comprimento de onda, nm
 ϕ_l - fluxo luminoso, lm
 ϕ_r - fluxo radiante, W
 η - rendimento, adimensional
 η_o - eficácia (rendimento global), adimensional
 $\Omega, \Delta\Omega$ - ângulo sólido, sr
 $\theta, \Delta\theta$ - ângulo plano, rad ou graus
 ρ, φ - coordenadas esféricas, rad ou graus

NOTAS SOBRE A REDAÇÃO

Esta tese foi iniciada em 1989 com o esboço inicial dos capítulos a serem escritos e também com a primeira visita de campo à mina de potássio de Taquari-Vassouras em Sergipe.

O processador de textos usado foi o Wordstar versão 3.45 em inglês, com recursos fáceis de utilizar mas um tanto limitado. Quando da elaboração dos capítulos envolvendo fotometria o grande número de fórmulas nos forçaram a estudar a mudança de processador de texto. A primeira opção analisada foi o Chi Writer mas este não apresentava opções para figuras e gráficos, além de não aceitar a parte já escrita por outro processador.

Em 1990 tentamos passar para o processador do Windows versão 1.0, denominado Write. Apesar de se poder introduzir figuras no texto através da opção Paste e se poder escrever melhor fórmulas, não se conseguiu usar o texto já escrito em Wordstar pois todas as transformações implicavam em se ter muito "lixo". Em 1991 analisamos a possibilidade de aprender um novo processador como o Word ou o Wordperfect mas a cada aprimoramento destes processadores o próprio Wordstar também se aprimorava. Em 1992 surgiu a versão 6.0 do Wordstar para Windows 3.1 mas já tínhamos escrito quase todo o texto e as figuras já estavam feitas a mão. Além disso o "hardware" necessário seria no mínimo um 386 com 4 Mb de memória RAM, equipamento que não disp'unhamos. Deste modo todo o texto foi escrito com a mesma versão do Wordstar 3.45 mas não cremos que isto tenha afetado qualquer conteúdo desta tese. Acreditamos todavia que a transformação desta tese num livro ou numa apostila deverá ser feita por um processador muito mais potente, usando-se inclusive "mouse" e "scanner".

A impressão foi feita numa impressora Mônica da Elebra a qual apesar de não ter grandes recursos é robusta e satisfaz as nossas necessidades básicas.

Esta impressora não era totalmente compatível com a versão usada do Wordstar porque certos comandos não eram aceitos, tendo-se problemas com a escrita de fórmulas. Tentamos a impressão numa Emília mas surgiu muito "lixo" relativo a acentuação. Assim as letras gregas foram colocadas com caligrafia manual.

Quanto às características gerais de impressão adotou-se as sugestões normalizadas contidas na publicação do Serviço de Bibliotecas da EPUSP denominada de "Diretrizes para apresentação de dissertações e teses", publicada em 1991. Apenas não se utilizou espaço duplo devido a grande extensão do texto.

Tanto as figuras como as tabelas tem sua numeração em função do capítulo a que pertencem (primeiro número) e da ordem dentro do capítulo (segundo número). Algumas figuras tem parte elaborada pela versão 1.0 do Windows mas o monitor CGA e a impressora usados não permitiram uma boa qualidade e precisão de curvas.

RESUMO

Este trabalho apresenta um levantamento sobre as condições de iluminação em minas subterrâneas brasileiras.

Numa primeira parte são definidos os objetivos da pesquisa efetuada e se faz uma revisão bibliográfica dos principais textos existentes sobre o tema iluminação na mineração.

Numa segunda parte a iluminação é introduzida num contexto de higiene do trabalho dentro do campo da engenharia ambiental aplicada à mineração. São discutidas suas relações com a saúde ocupacional, com a ocorrência de acidentes e com a produtividade.

Numa terceira parte são introduzidos todos os conceitos fotométricos necessários para o desenvolvimento de adequados projetos de iluminação de minas.

Numa quarta parte são discutidos alguns tipos de lâmpadas usadas na mineração e também algumas metodologias de manutenção dos sistemas de iluminação.

Numa quinta parte são apresentados os principais parâmetros luminosos considerados num projeto, sendo resumidas as metodologias ponto a ponto e dos lúmens.

Numa sexta parte são apresentadas as normas existentes para diversos países sugerindo-se algumas diretrizes para uma padronização a ser implantada no Brasil.

Finalmente são analisadas as condições de iluminação encontradas nas diversas minas subterrâneas visitadas, e a partir destas são sugeridas uma série de ações futuras que poderão auxiliar na melhoria das condições de iluminação em subsolo.

ABSTRACT

This work presents the results of a mine illumination survey undertaken in Brazilian underground mines.

In the first part the objectives of the research and a review of the main texts on the subject are presented.

In a second part mine illumination is introduced as pertaining to the field of environmental engineering applied to mining, and its relationships with health, accidents and productivity are discussed.

In a third part all necessary photometric parameters are introduced and in a fourth part some of the most used type of lamps are presented. Also a brief outline of some maintenance strategies is introduced.

In a fifth part project methodologies are discussed along with the importance of some of the basic photometric parameters.

In a sixth part laws and threshold values existing in many countries are presented and some guidelines for Brazilian normalization are suggested.

Finally the underground illumination conditions observed in many Brazilian mines are presented and discussed. Several actions that could improve the encountered conditions are suggested.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os trabalhos em minas subterrâneas apresentam fundamentalmente dois grandes aspectos de segurança. O primeiro se refere a SEGURANÇA ESTRUTURAL das aberturas, envolvendo tetos, pisos, paredes e pilares. O segundo se refere a SEGURANÇA AMBIENTAL, ou seja, a criação e manutenção de um ambiente de trabalho confortável e adequado a execução das tarefas pertinentes ao empreendimento.

A análise dos problemas de estabilidade das aberturas subterrâneas pertence ao campo da Engenharia de Maciços Rochosos ("Rock Engineering"), enquanto que o controle da qualidade ambiental do local de trabalho pertence ao campo hoje denominado de Engenharia Ambiental em Minas ("Environmental Engineering in Mines") [1,2,3,22].

A mineração subterrânea sempre requereu iluminação artificial devido ao fato do ambiente de trabalho ser totalmente escuro. Na história dos sistemas de iluminação verifica-se que eles foram responsáveis por muitas fatalidades associadas a incêndios e explosões ocorridas em atmosferas contendo gases como o metano, e pó como o de carvão. Estes problemas só foram controlados com o desenvolvimento de lâmpadas de segurança (a chama, de carbeto de calcio, etc). Portanto o primeiro e mais importante aspecto da iluminação em subsolo se refere a segurança humana.

A hipótese de que uma melhor iluminação conduziria a operações mais seguras e eficientes, motivou o desenvolvimento e a aplicação de fontes artificiais de luz em ambientes de trabalho industriais. Partindo-se da lâmpada incandescente de Edison chegou-se hoje a complexos sistemas que utilizam múltiplos tipos de fontes luminosas como incandescentes, fluorescentes, a vapor de mercúrio, de sódio sob alta pressão, de sais metálicos, etc.

Pesquisas qualitativas e quantitativas demonstraram que realmente a melhoria da iluminação produz um aumento da segurança, do conforto e da produtividade. Todavia o rápido avanço tecnológico na área de iluminação industrial não foi acompanhado pela mineração subterrânea, principalmente pela lavra de carvão. Este atraso teve várias causas dentre as quais pode-se destacar as seguintes:

- a. no início as lâmpadas de mineração tinham curta vida útil devido a sua fragilidade mecânica;
- b. também no início a produção luminosa era baixa, oferecendo pouca melhoria com relação às lâmpadas de chama já em uso;
- c. a introdução de equipamentos elétricos em minas é sempre problemática devido ao perigo potencial de explosões e incêndios;
- d. na lavra de carvão os sistemas de iluminação teriam que ser móveis, acompanhando a evolução das frentes;
- e. o ambiente em subsolo é agressivo exigindo o desenvolvimento de equipamentos especiais e caros; o pequeno mercado não era um incentivo a este desenvolvimento, o que só veio a ocorrer quando a iluminação subterrânea passou a ser regulamentada por lei.

O caso dos Estados Unidos foi típico. Em 1969 o congresso americano aprovou o "Federal Coal Mine Health and Safety Act", autorizando a criação e a promulgação de normas referentes às condições de iluminação em todos os locais de minas subterrâneas em que pessoas estivessem trabalhando. O "Bureau of Mines" começou então a pesquisar níveis de iluminação e equipamentos que satisfizessem as normas que viessem a ser promulgadas. Em 1976 foram apresentadas para discussão as normas federais sobre iluminação subterrânea de carvão, as quais foram promulgadas em 1978. Estas especificam os requisitos de iluminação em todos os locais em que pessoas estiverem trabalhando ou equipamentos auto-propelidos estejam sendo operados. Muitos outros países tem hoje normas específicas para a mineração mas não existe ainda uma padronização definitiva quanto a parâmetros de projeto, pois as especificações se apresentam tanto em níveis de iluminamento como em termos de níveis de luminância superficial.

Uma mina subterrânea é um local escuro e muitos acidentes podem ser ocasionados pela falta de apropriada visibilidade. Portanto na iluminação em subsolo uma das preocupações básicas é a visualização das situações de risco. Na vida cotidiana em superfície liga-se a luz das casas ou do carro de modo rotineiro, sem uma atenção específica aos problemas derivados de uma iluminação inadequada. Numa mina os problemas são muito maiores e mais graves, além de se depender totalmente das luzes artificiais.

A iluminação de minas é uma área de rápida expansão tecnológica e crescente interesse sob os pontos de vista da segurança ocupacional, higiene do trabalho e produtividade. A mineração tem tantas características peculiares que a iluminação de uma mina subterrânea parece ser melhor executada por engenheiros com experiência em mineração e pouco conhecimento de iluminação, do que por especialistas em iluminação com pouco conhecimento de mineração [4].

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura sobre iluminação de minas não é muito vasta e os textos existentes podem ser agrupados em 4 categorias:

- a. livros especificamente orientados ao tema;
- b. livros sobre engenharia ambiental em minas ou sobre mineração subterrânea, que entre outros tópicos abordam a iluminação;
- c. artigos técnicos publicados em periódicos, anais ou separatas;
- d. normas técnicas sugeridas ou exigidas pelos diversos países.

Poucos são os livros especificamente orientados a iluminação de minas. Trotter [4] apresenta de modo claro e conciso os principais tópicos relativos ao tema, apresentando consistentes argumentos relacionando nível de iluminação, taxa de acidentes e produtividade. Fornece sólidos subsídios a favor de adequados projetos de iluminação e apresenta exemplo das metodologias disponíveis. Resume também as normas adotadas em diversos países o que permite se verificar as dificuldades para uma normalização internacional. Todavia o texto dedica pouca atenção a construção de curvas de iso-intensidade luminosa (isocandela) e de iso-iluminamento superficial (isolux). Apesar de utilizar o sistema

internacional de unidades e apresentar uma tabela de conversão em apêndice específico, não é explicada adequadamente a presença do fator adimensional l para a relação de unidades de luminância válida para superfícies Lambertianas.

Roberts [8] aborda com certo detalhe a distribuição espacial do fluxo luminoso, principalmente o conceito de intensidade luminosa média. Aborda de modo específico a iluminação de vias subterrâneas horizontais (galerias e túneis), de vias verticais (poços e chaminés) e das faces de extração nos realces. Apesar do nome do livro se referir explicitamente a iluminação em subsolo é apresentado um capítulo sobre iluminação em minas em superfície, e também um capítulo interessante sobre iluminação em atmosferas explosivas. Uma característica não favorável é a utilização por todo o texto de unidades não pertencentes ao sistema internacional.

A publicação da "National Mine Health and Safety Academy" [5] é um texto introdutório e quantitativamente superficial, que prima pela didática simples e com muitas ilustrações, mas que não chega a ser uma referência importante para a elaboração de projetos de iluminação em minas subterrâneas.

O texto preparado pelo "United States Bureau of Mines" [6] é bastante completo, principalmente nos aspectos da percepção visual, equipamentos de medida e instrumentos disponíveis no mercado americano. É orientado à lavra de carvão e apresenta as normas americanas que são as mais rígidas do mundo, mormente ao que se refere a equipamentos móveis (mineradores contínuos, carregadoras e transportadores). Todavia apresenta confusão quanto a unidades de luminância para refletores perfeitamente difusos, mas procura usar as unidades do sistema internacional.

Trotter [7] elaborou também um texto para o governo canadense voltado a análise da iluminação em minas subterrâneas da província de Ontário. Não se fornece metodologias de projeto mas dados obtidos pela pesquisa efetuada, principalmente quanto a níveis de iluminamento e condições visuais.

Diversos livros texto abordam o tema iluminação de minas em capítulo específico, enfocando resumidamente o assunto [1,2,3,9,10,11,12,13]. De modo geral enfatizam a necessidade da boa iluminação e discutem algumas normas, mas não apresentam adequadamente metodologias de projeto.

Quanto às normas elas refletem a disparidade de padrões existentes entre os países, acreditando-se que a tendência seja aquela indicada pela CIE - "Commission Internationale d'Éclairage". Ou seja, que as normas tenderão a utilizar cada vez mais o parâmetro luminância superficial (como já ocorre com a lavra de carvão nos USA).

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Neste trabalho se objetiva analisar a situação de várias minas subterrâneas brasileiras quanto ao fator iluminação. Deverão ser considerados aspectos relativos aos níveis de iluminação, estado de conservação dos sistemas de rede e de iluminação individual, tipo de lâmpadas e luminárias utilizadas, características de refletância dos minerais de minério e de estéril nas superfícies

internas das minas, e custos envolvidos na instalação e manutenção.

Deverão ser visitadas minas com características distintas e que poderão representar as diversas situações extremas encontradas no Brasil tal como as indicadas pelas seguintes minas:

- a. de sal - mina de Taquarí-Vassouras, Sergipe;
Suas principais características são a alta refletividade dos sais (halita, silvinita, carnalita e taquidrita), a alta higroscopia da taquidrita, a presença de metano (que é explosivo) e a extração por meio de mineradores contínuos.
- b. de zinco e chumbo - mina de Morro Agudo, Minas Gerais;
Suas principais características estão relacionadas ao método de lavra, com problemas de estabilidade do maciço e pilares.
- c. de calcáreo - mina do Baltar, São Paulo;
Suas características principais são a alta mecanização, a interação entre a lavra subterrânea e céu aberto, e o acesso por rampas inclinadas de 12,5%.
- d. de fluorita - minas da região do Morro da Fumaça, Santa Catarina;
Minas onde os alguns aspectos de segurança são enfatizados, e os níveis de iluminação são melhorados por meio da pintura das paredes com tinta branca.
- e. de carvão - minas de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul.
As minas de carvão são dos piores locais para se ter uma iluminação adequada e cada mina tem seus problemas particulares. Assim a mina do Verdinho é pequena, tem vias subterrâneas de dimensões reduzidas o que gera problemas de mobilidade de equipamentos e colocação apropriada das fontes de luz, sendo uma mina "escura e úmida". Já a mina de Charqueadas é ampla, seca, sem enxofre e iluminada nas suas principais áreas.
- f. de cobre - mina São Luiz, Rio Grande do Sul.

As minas escolhidas tem portanto características bem distintas quanto a tipo de minério, método de lavra, forma de extração, condições de segurança, conforto termo-corporal e iluminação.

1.4. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho apresenta uma parte introdutória representada pelos capítulos 1 a 4, onde são abordados aspectos históricos e as justificativas para a atenção que o tema merece no contexto na engenharia de minas. Os parâmetros físicos envolvidos bem como os instrumentos de medida são abordados nos capítulos 5 a 10.

Normas para projeto, tipos de lâmpadas e tópicos correlacionados são discutidos nos capítulos 11 a 15. No capítulo 16 são analisadas as condições de iluminação em diversas minas brasileiras, e no capítulo 17 são apresentadas as principais conclusões e recomendações derivadas desta pesquisa.

2. ENGENHARIA AMBIENTAL EM MINAS SUBTERRÂNEAS

2.1. MINERAÇÃO E SEGURANÇA

Desde milênios o homem cavou a terra para as mais diversas finalidades como enterrar os mortos, pegar inimigos de surpresa, transportar água e pessoas, extrair minerais e metais, etc.

No início os maiores perigos estavam associados a dupla fogo e água, mas com a evolução das escavações e aumento da profundidade surgiram problemas relativos a oxigênio, a altas temperaturas, a grandes tensões provocadoras de explosões de rocha, a locomoção e transporte,

A mineração talvez seja a mais antiga das indústrias e além de antiga algumas vezes ela é uma atividade de longuíssima duração, como comprovam as minas de mercúrio de Almaden (Espanha), de estanho de Cornwall (Inglaterra) e de zinco na Silésia (Polônia), todas lavradas a séculos.

As principais características associadas ao ambiente de trabalho mineiro em subsolo são:

- a. contínua mudança: cada tonelada retirada de material altera as condições das frentes, dos tetos, das paredes e das circunvizinhanças. Esta contínua variabilidade tem peculiaridades muito diferentes com relação a uma fábrica onde o ambiente é mais ou menos constante e permite a gradual introdução de melhorias.
- b. atmosfera não usual: principalmente em subsolo onde se tem gases e poeiras gerados continuamente, além de condições especiais de temperatura e umidade.
- c. contínua atenção: existe uma preocupação constante com relação a estabilidade das estruturas (queda de blocos, colapso de pilares, explosões de rocha ou gás, etc). Numa indústria comum a preocupação maior não é com o desabamento do telhado ou com o estouro de uma janela!!

Devido a estas características tem-se observado ao longo dos anos que de modo geral o nível de acidentes fatais na mineração é maior que na indústria, na construção civil e na construção de estradas. Todavia os princípios de segurança mineira são semelhantes aos princípios de segurança em outras atividades, envolvendo procedimentos, treinamento, observação e inspeções antes dos acidentes e investigações após.

A preocupação com segurança e saúde ocupacional é antiga existindo desde antes da era cristã, e a tabela 2.1. apresenta alguns eventos associados a este tópico.

O advento da Revolução Industrial (século 19) teve um alto impacto na mineração, com expansão das atividades de lavra (principalmente de carvão) e aumento das profundidades. O aumento brutal do número de mortes era causado também pela mão de obra não treinada ou especializada, e pelos projetos de novos equipamentos que não levavam em consideração aspectos de segurança do operador.

Observamos dos exemplos do passado que a legislação de segurança tem evoluído de modo reativo, ou seja, cada avanço significativo tem como mola básica o clamor público após desastres de grandes proporções. Há até um ditado que diz que

"mineiro morto é o que tem a maior influência para garantir a aprovação de leis".

Tabela 2.1. Alguns eventos passados associados a segurança e saúde ocupacional na mineração [4,14].

data	evento
50 AC	Plínio escreveu 5 livros sobre terra, metais, pedras e gemas, e recomendava o uso de um véu solto sobre o rosto para a proteção contra poeira.
	Hipócrates no seu trabalho "Epidemias" cita as dificuldades respiratórias dos mineiros de minas metálicas
1 556	Agrícola (George Bauer) publica "De Re Metallica" com informações sobre saúde, doenças ocupacionais e ventilação de minas
1740/1786	Frederico, O Grande, impôs certo controle governamental sobre as minas prussianas, inclusive com inspeções
1 781	Luis XVI cria na França a primeira inspetoria de minas
1 762	primeiro Departamento de Minas na Universidade de Carlos, em Praga.
1 783	Fundada na França a Escola de Minas
1 810	Decreto de Napoleão obriga as operações mineiras a serem administradas pelos Prefeitos
1 813	Decretado na França o primeiro código de segurança de minas com 32 artigos
1 815	primeira lâmpada de segurança
1 842	proibido o trabalho de mulheres e crianças nas minas subterrâneas inglesas

Da análise do passado se conclui que apesar de sempre terem existido minas exemplares o aprimoramento das normas legais para mineração em grande parte se deveu às falhas generalizadas de auto-regulamentação das próprias empresas mineradoras [16].

A auto-regulação de uma indústria é viável e um exemplo típico é a atuação do "Chamber of Mines" (Câmara de Minas) sul-

africano. Em 1913 ele criou o Comitê de Prevenção de Acidentes que hoje se transformou na sua Divisão de Segurança de Minas, a qual ajuda as minas em treinamento e programas de segurança. Ela opera também o "International Mine Safety Rating" (Classificação Internacional de Segurança Mineira) e promove junto com a Cruz Vermelha cursos de primeiros socorros que mais de três milhões de mineiros já fizeram. Anualmente cerca de vinte mil pessoas participam de competições de segurança em minas por ele promovidas.

Hoje em dia existem técnicas gerenciais para identificação e correção de deficiências antes que os acidentes ocorram, e cada vez mais surgem requerimentos de treinamento e certificação de operários e gerentes. Duas áreas tem recebido gradual aumento de atenção: saúde ocupacional e acidentes individuais.

A ênfase em saúde ocupacional decorre da constatação de fatos como de que gases e fumos são tão perigosos quanto explosões, ou que a pneumoconiose invalida mais mineiros que a queda de blocos. A atenção a acidentes pessoais decorre de constatação de que é muito maior o número total de acidentados individuais que o de grandes grupos.

A preocupação com a relação entre produtividade, qualidade e lucratividade é antiga na indústria mineira. Já em 1849 a Casa dos Lordes inglesa criou um comitê para estudar os meios de prevenir a ocorrência de acidentes perigosos em minas de carvão, o qual entre outras coisas concluiu que: "do ponto de vista econômico uma mina segura e saudável é em última instância mais lucrativa para o proprietário". Em 1979 o então presidente da Associação dos Engenheiros de Minas (AIME) dos Estados Unidos declarou: "a mina mais segura é a mais produtiva e vice-versa; ninguém é altamente produtivo quando a preocupação principal é com a vida". Dentre as muitas razões que ele tinha para pensar assim se inclui com certeza o fato de ter sofrido lesões permanentes nas costas devido a queda de blocos. Dentre os fatores que deverão continuar a ter influência na mineração nas próximas décadas podemos citar: a atuação das associações de classe, as atitudes das cortes judiciais, o progresso científico e tecnológico, o aprimoramento legislativo, as exigências de mercado e os estudos sobre causas e consequências de acidentes.

Ferramentas comuns hoje em dia em termos de controle de perdas tais como regras escritas de segurança, procedimentos de trabalho, inspeções e investigações supervisionadas, não existiam no início do século e nunca tinham sido ouvidas pelos empregadores nesta época. Apesar disso a lavra subterrânea de carvão ainda é a atividade mais perigosa nos Estados Unidos. No início da década de oitenta ela causava duas vezes mais mortes que na indústria e três vezes mais que a céu aberto.

Tem-se observado um gradual aumento de preocupação dos empregadores com o potencial de dano para a saúde ocupacional, havendo mais discussões a nível gerencial de problemas associados a ruído, iluminação, vibrações, poeiras, vapores, fumos e gases. Nos últimos 25 anos ocorreram grandes avanços em equipamentos e tecnologia. Estes avanços incorporaram sensível melhorias em termos de segurança e condições de trabalho dos operadores.

Nos países realmente preocupados com saúde e segurança na

mineração a legislação tem aumentado consideravelmente. Dentre as leis mais minuciosas citamos:

- a. " Mining Act " e " Silicosis Act " - Canadá - 1970
- b. " Safety and Health at Work Act " - Inglaterra - 1974
- c. " Mine Safety and Health Act " - Estados Unidos - 1977

2.2. PROGRAMAS DE SEGURANÇA PARA MINAS

A contínua análise das causas e consequências globais de acidentes tem levado ao aperfeiçoamento de conceitos e de parâmetros de medida. Alguns destes conceitos envolvem se dar maior atenção a taxas de lesões sérias que a taxas de lesões incapacitantes, bem como mais atenção aos danos de propriedade. Admite-se ser mais representativo fazer-se avaliações usando-se um índice de lesões sérias do que um índice de apenas lesões incapacitantes, já que um índice de lesões sérias engloba hospitalização, fraturas, perda de consciência, tratamento médico para os olhos, e outras ocorrências que imponham mudanças de função ou restrições no trabalho. Grandes companhias tem conseguido índices de 1 a 4 por cada milhão de homens-hora trabalhadas usando o índice de lesão séria, o que representa um valor atualmente muito bom.

Dados indicam também que os custos de danos a propriedade excedem em muito os custos dos danos causados por acidentes a pessoas físicas, numa ordem de grandeza de cinco vezes [16]. Os progressos nos programas de segurança e saúde diminuíram muito as taxas de acidentes fatais, havendo hoje uma gama de preocupações que englobam prevenção de incêndios, controle do dano a propriedade, saúde ocupacional, poluição ambiental, seguros, etc.

Metodologias antigas prescreviam gerenciamentos orientados à indenização, concentrando a atenção nas pessoas durante o serviço e portanto tendo como objetivo a prevenção da lesão de trabalho.

O conceituado dicionário Webster definia segurança como a "inexistência de risco para o homem". Metodologias mais recentes são globais e definem segurança como " a imunidade a interações entre pessoas, equipamentos, materiais e ambiente que possam causar danos a pessoas ou ao sistema, perdas de tempo ou qualquer desvirtuamento dos objetivos do empreendimento".

A organização moderna se torna cada vez menos reativa e mais preditiva, avaliando o desempenho das gerências antes que danos e perdas ocorram e verificando o seu nível de ajuste aos padrões estabelecidos de segurança.

Há mais de meio século os pesquisadores estudam a relação entre segurança e produtividade, e o consenso atual parece ser o de que ambas podem ser influenciadas por um grupo de fatores comuns tais como: método de lavra; envolvimento da gerência; idade, seleção, treinamento e colocação dos empregados; condições físicas; procedimentos de manutenção; programas de inspeções; etc.

Frederic Taylor considerava que uma das verdades na indústria era de que " a chave da produtividade não é um trabalho mais árduo mas um trabalho mais inteligente, ou seja, a compreensão e a análise sistemática do trabalho "[17].

A produtividade é uma medida de eficiência relacionando

entradas e saídas, onde as entradas normalmente são trabalho, tempo, potência, materiais, equipamentos ou uma combinação destes. Um modo de se visualizar a relação entre segurança e produtividade é através do quociente:

$$P = S / E \quad (1.1)$$

Se a saída S for constante mas a entrada E diminuir, a produtividade P aumentará. A diminuição da entrada pode ser obtida com a diminuição das perdas por acidentes (com ou sem lesão) e doenças profissionais. Algumas gerências não visualizam quão grande pode ser a contribuição da segurança para a produtividade e o lucro.

Um interessante programa de segurança para minas foi desenvolvido por Schaffer e Peay para o U.S Bureau of Mines em 1981 e se baseia em duas premissas principais [17]:

- a. um trabalho mais inteligente é a chave para uma melhor segurança e saúde;
- b. praticamente todas as medidas efetivas contra acidentes e doenças ocupacionais também melhoram a produtividade e o lucro.

As características procuradas para este programa no início dos estudos eram de que ele fôsse geral, flexível, denso, simples, viável e de reconhecido valor. Deveria ser geral para poder ser aplicável a todas as minas; flexível para poder ser adaptado as operações mineiras de qualquer escala; denso para incorporar apenas as características essenciais dos vários modelos existentes sem ser apenas uma justaposição destes modelos; simples para poder ser implantado e administrado sem dificuldade; viável no sentido de gerar reduções de perdas maiores que seu próprio custo; e de mérito aceito por todos desde as gerências de minas até as associações de classe.

O programa tem seis linhas mestras que são a integração da segurança em todos os procedimentos, comprometimento dos níveis mais altos, treinamento na análise dos custos associados, gerenciamento alerta para condições inseguras, metodologia de avaliação das medidas corretivas e sistema eficiente de retro-análise.

A administração deve compreender que procedimentos corretos, com treinamento e supervisão adequados, diminuem o risco de acidentes em ambientes de trabalho inseguros porém não eliminam as causas básicas do perigo. Uma atitude comum é a de se assumir como seguro um local ou procedimento onde até o momento ninguém tenha sofrido lesão, esperando-se que a evidência de um relatório de acidente chame a atenção para uma situação insegura.

Minas são locais em essência inseguros e não se pode se prender a mitos como a relação de Heinrich, dada por 88:10:2, e que classifica as causas de acidentes em devidas a atos inseguros, a condições inseguras e situações imprevisíveis [16].

Condições inseguras incluem local de trabalho, máquinas e equipamentos, materiais e ferramentas, e muitas vezes é uma combinação de atos e condições que leva a um acidente. Finalmente deve-se frisar que um operário não pode ser acusado de ato inseguro se estava seguindo procedimentos recomendados ou se não havia procedimento recomendado algum.

2.3. HIGIENE DO TRABALHO

Um programa de controle de perdas e danos deve incluir tanto aspectos de segurança como de saúde ocupacional. Estas duas áreas estão relacionadas entre si através de objetivos comuns que são a saúde e bem estar do trabalhador e conseqüentemente a sua máxima produtividade.

A Higiene do Trabalho, denominada Higiene Industrial nos Estados Unidos, é a ciência que objetiva o reconhecimento, a avaliação e o controle dos fatores ambientais existentes nos locais de trabalho e que podem provocar doenças, prejuízos a saúde e ao bem estar, desconforto significativo e ineficiência nos trabalhadores. É uma ciência estruturalmente prevencionista e preocupada com a saúde do trabalhador durante toda a sua vida útil.

Uma das importantes áreas dentro da Higiene do Trabalho é a de levantamento das condições ambientais objetivando-se estabelecer as relações entre o ambiente de trabalho e os possíveis danos a saúde dos trabalhadores deste mesmo ambiente. Este levantamento permite que se defina as medidas que controlarão as condições inadequadas e é parte essencial de um Programa de Saúde Ocupacional.

Um programa de saúde ocupacional engloba três etapas: reconhecimento, avaliação e controle.

A. Reconhecimento

É uma fase inicial qualitativa de coleta de dados para posterior definição das diretrizes que nortearão um levantamento quantitativo. É feito através de inspeção técnica local e engloba o conhecimento de:

- a. diferentes formas em que se apresentam os agentes ambientais;
- b. propriedades tóxicas dos materiais utilizados;
- c. processos industriais envolvidos.

Os dados coletados devem incluir planta, fluxograma operacional, horários de trabalho, número de trabalhadores, materias primas e produtos finais, equipamentos e ferramentas, existência de equipamentos de controle como ventilação local, estado de iluminação e das luminárias, presença de poeiras, névoas e fumos, uso de equipamentos de proteção individual, etc.

Pode parecer desnecessário enfatizar a fase de reconhecimento mas para quem não estiver treinado, os riscos industriais não são tão evidentes quanto os riscos mecânicos ou físicos.

Desníveis, pontas sobressalientes e fios decapados são exemplos de riscos físicos bem conhecidos da maioria dos operários porque são treinados para vê-los. Todavia em geral não se está treinado para "ver" riscos como poeiras, fumos, gases, temperatura excessivas, iluminação deficiente ou ruídos extremos. Um risco não aparente pode ser mais perigoso que um que pode ser visto ou ouvido.

B. Avaliação

É uma fase quantitativa de determinação da intensidade dos agentes ambientais utilizando-se uma metodologia padronizada. Esta metodologia engloba fatores como aparelhagem e técnica de medida, locais de medição, duração e número de medidas, etc. Deve

se ter uma amostragem representativa da exposição real do trabalhador e das características completas dos agentes.

C. Controle

As medidas a serem tomadas podem ser relativas ao ambiente de trabalho ou ao trabalhador. As primeiras são prioritárias pois são mais eficazes e não causam inconvenientes aos trabalhadores, enquanto que as segundas servem de complementação caso as primeiras não satisfaçam plenamente. Após a implantação das medidas de controle deve ser feita nova avaliação para verificação da eficácia das ações tomadas.

2.4. RISCOS E AGENTES AMBIENTAIS

Agentes ambientais são os fatores desencadeantes das doenças do trabalho e a existência de um agente implica na existência de risco. A transformação do risco em doença ocupacional envolve a consideração de fatores tais como:

- a. características do agente: cada agente tem seu potencial de agressividade específico e quanto maior sua intensidade maior a probabilidade de ocorrerem prejuízos ao trabalhador. Agentes químicos normalmente tem sua intensidade expressa por meio da concentração de alguma substância.
- b. características da atividade: o tipo de serviço e de movimentação do trabalhador, bem como os períodos de descanso influem no tempo real de exposição. Quanto maior este tempo maior a probabilidade de ocorrer dano a saúde.
- c. características do indivíduo: cada organismo reage de modo próprio face a um dado agente ambiental.

Na análise do risco real associado a certas condições ambientais os três fatores acima devem ser considerados em conjunto. Um programa de saúde ocupacional se fundamenta num processo de conscientização e por isso é importante a familiarização com os principais riscos a saúde ocupacional.

Os agentes ambientais podem ser classificados de várias maneiras e a mais comum os agrupa em químicos, físicos, biológicos e ergonômicos [16,18].

A. Agentes químicos

Na maioria dos processos pelos quais o homem altera as características dos materiais naturais, ocorre a dispersão no ambiente de trabalho de substâncias que podem acarretar danos a saúde. Os agentes químicos se apresentam na forma de compostos sólidos, líquidos ou gasosos ou na forma de misturas de duas fases tais como fumos, fumaças, névoas, neblinas e poeiras.

B. Agentes físicos

Estão associados a fenômenos físicos como ruídos, vibrações, extremos de temperatura, pressão e umidade, iluminação, radiações ionizantes ou não, etc.

C. Agentes biológicos

Os micro-organismos causadores de doenças tais como vírus, bactérias, fungos, bacilos, insetos e parasitas.

D. Agentes ergonômicos

A ergonomia é a ciência que se ocupa das características fisiológicas inerentes a execução das atividades profissionais tais como posição corporal, ritmo e pressão de trabalho, movimentação repetitiva, fadiga, monotonia, preocupação, alteração dos ritmos corporais, etc.

3. HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO DE MINAS

A mineração subterrânea sempre requereu iluminação artificial devido ao fato do ambiente de trabalho ser totalmente escuro. A tabela 3.1 apresenta um resumo da evolução cronológica da iluminação usada em minas subterrâneas de carvão.

Tabela 3.1. Evolução cronológica da iluminação subterrânea de carvão [4].

tipo de lâmpada	fonte	período
chama aberta em forma de prato	lascas de madeira e gravetos embebidos em óleo	10 000 AC até séc. 16
chama aberta suspensa	pavio imerso em óleo ou graxa	1500 a 1900
candelabros	velas de pavio	1800 a 1900
moinho de Carlisle	faíscas de sílex pirômáco em contato com disco giratório de aço	1750 a 1813
lâmpada em tubo	pavio imerso em óleo	1850 a 1920
lâmpada de segurança a chama	pavio imerso em óleo, nafta ou gasolina	1796 até hoje (a)
lâmpada de carbeto	carbeto de cálcio e água	1910/1920 (b)
lâmpada a arco	eletrodos de carvão e corrente elétrica	1878
lâmpada a arco	eletrodos de carvão metalizado	1905
lâmpada de tungstênio trefilado	filamento incandescente	1911
peçoais portáteis	filamento incandescente	1920-1955
de capacete	" "	1925- hoje
de iluminação de frentes	incandesc., fluorescente, de sódio a alta pressão, de mercúrio, de haletos metálicos, etc.	1975- hoje

(a) ainda usada para checar a presença de metano

(b) ainda usada em países sub-desenvolvidos e minas de 1 ou 2 pessoas

Os sistemas de iluminação foram responsáveis por muitas mortes associadas a incêndios e explosões em atmosferas contendo gases como o metano. Estes problemas só foram controlados com o desenvolvimento de lâmpadas de segurança (a chama, de carbeto de cálcio, etc).

Em 1879 Edison patenteou a primeira lâmpada incandescente realmente prática, mas as tentativas iniciais de se usar lâmpadas elétricas incandescentes em minas subterrâneas só vieram a ocorrer na Europa por volta de 1902, e o seu uso generalizado em frentes de extração só aconteceu cerca de 25 anos mais tarde [4].

Na década de 1920 foi desenvolvida a lâmpada individual a bateria, a qual requeria que o mineiro carregasse uma pesada e desconfortável bateria que às vezes deixava vaziar ácido. Com o desenvolvimento de baterias menores e mais leves foi criada a lâmpada portátil de capacete, a qual já em 1935 era de uso comum.

4. ILUMINAÇÃO, SEGURANÇA E PRODUTIVIDADE

4.1. CARACTERÍSTICAS DO GERENCIAMENTO MODERNO

A Engenharia Ambiental aplicada a mineração subterrânea tem tido cada vez mais importância não só nos aspectos ligados a segurança e saúde ocupacional mas também nas análises de custos e produtividade. É hoje importante componente de qualquer projeto de mineração, tanto no aspecto de planejamento como de gerenciamento, e sob esta ótica se insere num amplo programa gerencial de controle de perdas e danos (atualmente já aplicado em algumas minas subterrâneas brasileiras).

De acordo com a literatura mais recente a engenharia ambiental em minas engloba uma variada gama de tópicos que podem ser didaticamente agrupados em agentes e medidas de controle. Dentre os agentes temos os físicos, os químicos, os biológicos e os ergonômicos. Dentre as técnicas de controle e mitigação destacam-se os equipamentos de proteção individual (EPI) e a ventilação forçada (geral diluidora ou local exaustora).

Dentre os agentes físicos a iluminação é de capital importância nas minas subterrâneas, principalmente nos aspectos de segurança operacional. Além disso recentes pesquisas tem demonstrado sua relação direta com frequência e gravidade de acidentes bem como com a eficiência e a produtividade.

Apesar da relação entre nível de iluminação, segurança do ambiente de trabalho e produtividade ser intuitiva, a demonstração de que a boa iluminação favorece os outros dois aspectos não é simples. Estudos realizados em diversas indústrias demonstraram que a melhoria da iluminação proporciona aumento da produtividade e da qualidade do trabalho, já existindo na literatura material demonstrativo desta correlação para testes laboratoriais controlados e para ambientes industriais onde se possa manter constantes as demais variáveis exceto a iluminação.

Estudos quantitativos conclusivos sobre as relações iluminação-produtividade e iluminação-segurança em mineração são difíceis, porque é necessário efetuar estudos similares aos feitos para escolas, escritórios, estradas e indústrias. Todavia no ambiente mineiro existem muitos fatores inter-relacionados, como as condições geológicas, as espessuras das camadas e a emissão de gases, que variam continuamente e que são virtualmente impossíveis de isolar ou controlar. No caso específico de minas subterrâneas muitas dificuldades complicam a execução de testes e a análise dos resultados, podendo-se citar:

- a. a impraticabilidade de instalações permanentes, devido a evolução da lavra, aos contínuos desmontes e aos custos de instalação e manutenção;
- b. a ausência de uma definição legal exata do que seja uma boa iluminação mineira;
- c. a agressividade do ambiente mineiro, com baixa refletância das superfícies e diminuição da transmissão devido a poeiras e fumaças.

Fica assim muito difícil avaliar o efeito isolado de um único fator como o nível de iluminamento, e quantificar os ganhos em

têrmos de prevenção de acidentes ou fatalidades. Contudo as análises consistentemente indicam um aumento da segurança e ou da produtividade nas secções melhor iluminadas da mina, e o corpo de evidências diretas e indiretas cada vez justifica mais a melhoria da iluminação em subsolo de modo a se ter fontes de rede além das individuais de capacete e dos faróis dos veículos [4].

4.2. ILUMINAÇÃO E PRODUTIVIDADE

Engenheiros civis e arquitetos tem uma vasta literatura disponível sobre os níveis ótimos de iluminação em escritórios e indústrias, o que não ocorre com os engenheiros de minas. Todavia estudos em minas demonstraram um claro aumento da produtividade nos realces e secções iluminados em comparação com os não iluminados.

Para minas de carvão na Hungria estudos efetuados durante 2 meses por Halmos mostraram que as secções que continham iluminação geral de rede (além daquela dos capacetes) apresentaram produtividade de 5 a 26% maior com relação às secções não iluminadas [4,6]. Num estudo anual efetuado numa mina americana de carvão constatou-se que um realce-teste com iluminação geral apresentara um nível de produção (toneladas por homem-turno) 17% superior com relação ao realce com o segundo nível de produção.

Levantamentos efetuados em 1979 por um comitê formado pela "United Mine Workers of America" (UMWA), pela "Betuminous Coal Operators Association" (BCOA) e pela "Mining Safety and Health Administration" (MSHA) forneceram respostas favoráveis dos trabalhadores de minas lavradas por câmaras e pilares com relação às novas normas de iluminação. Observações restritivas foram feitas para camadas com espessuras inferiores a 107 cm devido a problemas de ofuscamento visual [6]. Portanto a satisfação dos trabalhadores com a iluminação em subsolo é uma das componentes que favorecem o aumento da produtividade.

O aspecto melhoria da produtividade é importante para que as empresas percebam os benefícios da boa iluminação, a qual aumenta também a disponibilidade e desempenho dos equipamentos.

4.3. ILUMINAÇÃO E ACIDENTES

Para situações como trabalho em fábricas e tráfego em estradas existem muitas evidências diretas documentadas demonstrando que o aumento da visibilidade diminui o número de acidentes. Na mineração as evidências são menos diretas e precisas porque a iluminação é apenas um dos fatores que contribui para a situação de risco e para a ocorrência do acidente. Minas são locais de trabalho de alto risco devido a uma série de fatores e a iluminação é apenas um dos componentes da situação de risco.

Estudo do "National Safety Council" dos Estados Unidos revelou que a iluminação insuficiente era a causa de 5% dos acidentes nas indústrias, e que em 20% dos casos a pouca iluminação e a fadiga visual eram componentes da situação de risco potencial [4]. Em minas, onde se tem um dos mais perigosos ambientes de trabalho, é

de se esperar que estas porcentagens sejam até maiores. Estudos conduzidos por Halmos em minas húngaras de linhito demonstraram uma diminuição de 60% dos acidentes para secções com iluminação de rede, enquanto que o aumento do nível de iluminamento de 20 para 250 lux diminuiu o número de acidentes em 42% [6]. Mishrat e Dixit concluíram que 35% de todos os acidentes menores ocorridos em minas de carvão indianas podiam ser atribuídos a má iluminação [6]. Estudos efetuados durante 2 anos numa mina de carvão de West Virginia indicaram não ter ocorrido nenhum acidente grave em uma secção iluminada, enquanto tinham ocorrido 10 acidentes em 5 secções sem iluminação geral [6].

Minas são ambientes de alto risco e onde há pouca luz para destacar todas as informações, o cérebro não interpreta corretamente os sinais visuais, demora para processar imagens e para reagir face a situações de perigo. Estas características são ainda mais importantes quando estão associadas a locais onde se tem equipamentos móveis tais como jumbos de perfuração, pás carregadoras, caminhões, correias transportadoras e vagonetas.

4.4. ILUMINAÇÃO E SAÚDE OCUPACIONAL

Estima-se que na virada do século a temida e incurável doença visual nistagmus atingia cerca de 70% dos carvoeiros da Europa e Reino Unido, mas ela desapareceu com a utilização sistemática das lâmpadas de capacete e de novos métodos de lavra.

Atualmente as pesquisas se direcionam para a relação entre níveis de iluminação e a ausência (ou excesso) de alguma faixa espectral, como por exemplo a radiação ultra-violeta em lâmpadas fluorescentes, e também para as relações entre quantidade de luz e ritmos corporais. Análises tem sido feitas correlacionando ausência de luz, baixa moral e depressão psíquica ("mid-winter blues"), enfocando-se o papel da glândula pineal cujas secreções controlam os órgãos hormonais e a qual é afetada pela qualidade e quantidade de luz [4].

A relação entre luminosidade e ritmos corporais está associada ao ritmo térmico do corpo, o qual se repete a cada 24 horas e tende a ter o pico de temperatura coincidente com os momentos de máxima luminosidade. Alterando-se o período de máxima luminosidade o corpo gradualmente altera seu ritmo termal para que os picos de luz e de temperatura coincidam. Este aspecto é importante para o trabalho em minas porque o pico térmico ocorre para o momento de máxima ativação e desempenho do corpo, sendo prejudicial a alternância de turno diurno e noturno para as equipes de trabalho. É preferível que as equipes trabalhem continuamente num mesmo horário sem a alternância a cada semana pois esta é mais ou menos o período que o corpo leva para se adaptar a mudança de horário.

5. A NATUREZA FÍSICA DA LUZ

5.1. ENERGIA RADIANTE VISÍVEL

A energia pode se apresentar de muitas formas, como elétrica, magnética, química, atômica, térmica e mecânica (cinética e potencial). Quando ela tem componentes elétricas e magnéticas ela é chamada de energia eletromagnética.

Quando uma forma de energia tem um caráter cíclico, se propagando no espaço em todas as direções a partir de um ponto origem chamado fonte, então ela é dita radiante. Uma boa imagem para este conceito é aquela de ondas se propagando como circunferências concêntricas a partir do ponto de queda de uma pedra na água. A luz é uma forma de energia eletromagnética radiante que nos permite "ver". ϕ

Por ser constituída de ondas a energia radiante é caracterizada pelos parâmetros fundamentais comprimento de onda (λ) e frequência (f):

- comprimento de onda é a distância percorrida espacialmente enquanto um ciclo se repete;
- frequência é quantos ciclos ocorrem na unidade de tempo, por exemplo num segundo. O inverso da frequência é o período (T) ou seja, o tempo para que um ciclo se repita. O período pode também ser definido como a "distância" $\phi\phi$ percorrida temporalmente enquanto um ciclo se repete.

Como λ é a distância percorrida pela onda durante a execução de um ciclo, e f é o número de ciclos por segundo, então o produto λf representa a distância percorrida pela onda num segundo. Ou seja a velocidade de propagação da onda é dada por:

$$v = \lambda f \quad (5.1)$$

Para a energia eletromagnética se propagando no vácuo a velocidade é uma constante de valor aproximadamente 300 000 km/s. No ar esta velocidade é um pouco menor, sendo característica do meio de propagação. O produto (λf) é constante e pode ser obtido por infinitos pares de valores de λ e de f , os quais definem então o chamado espectro de energia eletromagnética radiante ou espectro de radiação eletromagnética. Este espectro é mostrado na figura 5.1. Nesta figura a frequência tem um domínio que vai de $10 \exp(24)$ Hz para os raios cósmicos até cerca de 1 Hz para as transmissões de potências elétricas. O comprimento de onda pode ser expresso em várias unidades e usaremos preferencialmente a unidade do nanometro. Apesar da geração, dos usos e dos efeitos associados às diversas faixas do espectro serem diferentes, temos sempre energia eletromagnética radiante. O que varia é o comprimento de onda e a frequência.

A luz visível é composta da pequena faixa do espectro com comprimentos de onda variando entre 380 e 780 nm (pois ondas fora desta região estimulam muito pouco o olho humano). O nome espectro se originou dos trabalhos de J.C. Maxwell e seus limites tendem a ser continuamente expandidos pela ciência.

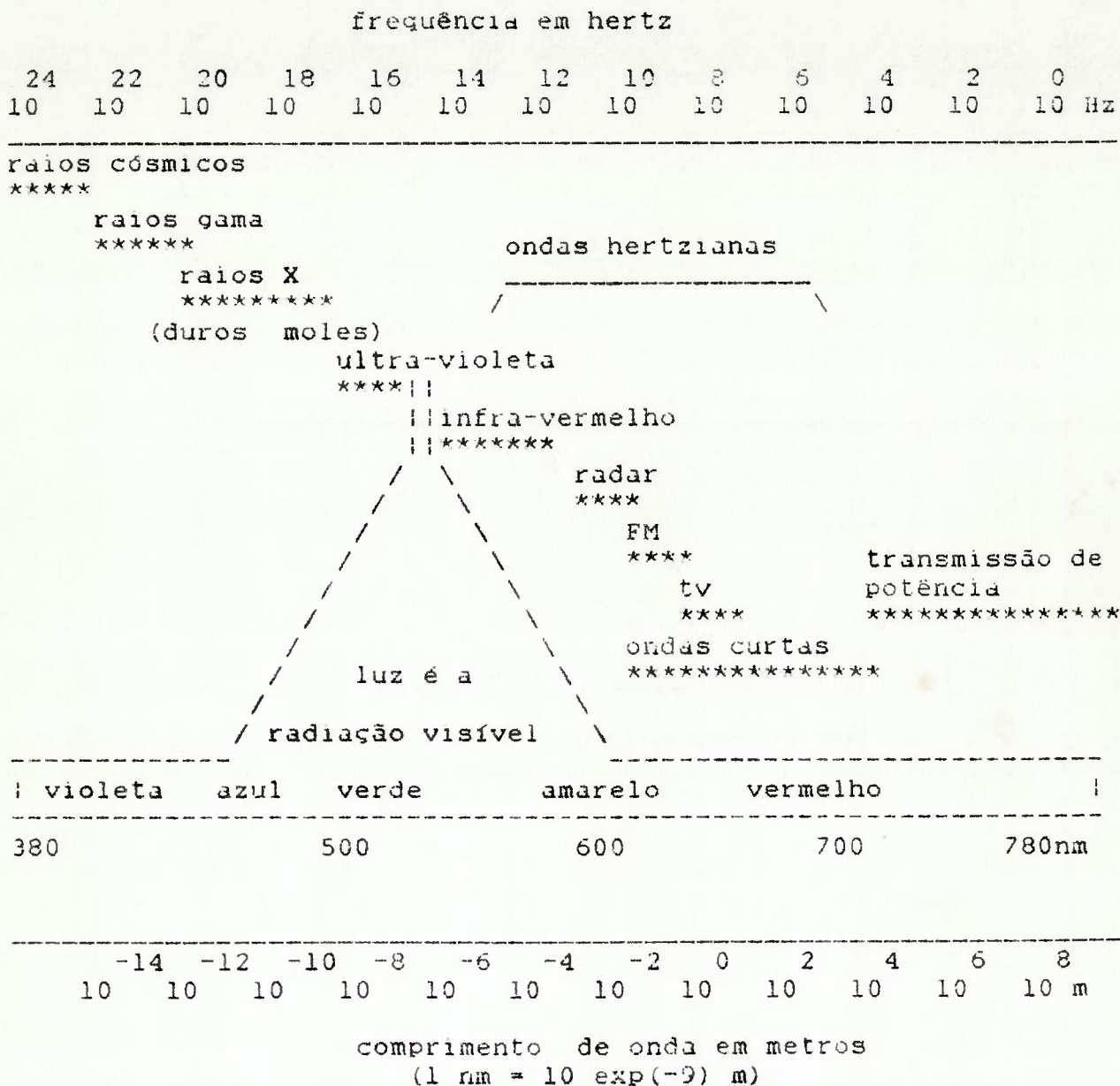


Figura 5.1. Espectro de radiação eletromagnética. Eixo horizontal superior com coordenadas da frequência em Hz; eixo horizontal inferior com coordenadas do comprimento de onda em metros.

5.2. GERAÇÃO, PROPAGAÇÃO E PERCEPÇÃO DA LUZ

A radiação eletromagnética surge como subproduto de qualquer processo onde uma carga elétrica é acelerada, e alguns destes processos ocorrentes na escala atômico-molecular dão origem a radiação visível. Todo corpo visível é fonte primária ou secundária de luz; no primeiro caso a luz é gerada por um processo físico-químico ou nuclear e no segundo caso o corpo iluminado reflete parte da luz incidente.

Durante a propagação da luz da fonte até o olho humano, ela pode ser alterada de muitos modos. Quando uma radiação eletromagnética (visível ou não) encontra um objeto ela pode ser refletida, transmitida ou absorvida.

Luz transmitida é a luz que passa através de um objeto, penetrando por uma superfície e saindo por outra. Luz refletida é aquela que não penetra no objeto, voltando a partir da superfície externa do mesmo. Luz absorvida é a luz que não é nem transmitida nem refletida por um corpo, sendo sua energia transformada em outra forma como calor.

Da luz incidente num objeto uma parte é refletida, outra parte é transmitida e uma outra é absorvida. A divisão de cada uma destas partes pela quantidade de luz incidente define três quocientes chamados de refletância (r), transmitância (t) e absorvância (a).

Da própria definição temos:

$$r + t + a = 1 \quad (5.2)$$

Alguns objetos tem transmitância nula mas nenhum objeto real tem qualquer um dos quocientes unitários, e a absorvância sempre atua no sentido de diminuir a quantidade de energia luminosa que sai da superfície.

Quando a luz atinge o olho humano a percepção visual desencadeada pode ser interpretada com base em duas características ondulatórias da luz: comprimento de onda e nível energético. A composição de vários comprimentos de onda é interpretada como cor, enquanto que a combinação de comprimentos de onda e nível energético é interpretada como "brilho".

5.3. INCANDESCENCIA E LUMINESCENCIA

A emissão primária de luz pode se dar por incandescência ou luminescência. A incandescência está associada à radiação térmica de um corpo quente. Todo corpo acima de zero Kelvin emite radiações, e para sólidos e líquidos até cerca de 300 C a energia irradiada está quase toda na região do infra-vermelho de modo que a pequeníssima radiação visível não causa sensação visual. Sólidos e líquidos acima de cerca de 300 C apresentam o fenômeno da incandescência, surgindo um espectro contínuo de emissão que apresenta uma sucessão infinita de radiações monocromáticas de comprimento de onda se iniciando em zero.

A tabela 5.1. apresenta algumas temperaturas médias associadas a fontes incandescentes.

A luminescência é a emissão de luz por um processo que não seja a irradiação térmica de um corpo quente. Por exemplo, certos gases e vapores podem emitir radiação visível a temperaturas normais quando excitados de modo apropriado. A excitação pode ser causada por raios X, raios gama, raios ultra-violeta, atrito superficial, partículas eletrizadas, ou com a colocação de um sal volátil numa chama. Neste caso o espectro apresenta apenas certos comprimentos de onda, com linhas paralelas chamadas raias, onde os comprimentos de onda das raias são característicos do elemento que emite a luz. Por exemplo o hidrogênio sempre fornece

o mesmo conjunto de raias nas mesmas posições. As vezes as raias se acumulam num pequeno intervalo obtendo-se então um espectro de faixas ou bandas.

Tabela 5.1. Temperaturas de algumas fontes incandescentes [20].

fonte	temperatura (C)
Sol	~ 5 700
arco voltáico sob pressão	~ 5 000
lâmpadas de filamento:	
tungstênio	~ 3 000
carvão	~ 1 800

Existem várias formas de luminescência como:

- fotoluminescência:** a excitação é causada por raios X ou raios gama;
- bioluminescência:** no caso de vagalumes, certos cogumelos e seres do mar, temos a oxidação da luciferina em presença da enzima luciferase; ou a existência de milhões de microorganismos nas ondas do mar, que secretam uma substância que se oxida por choque mecânico, causando uma sensação de faiscamento da água;
- triboluminescência:** a excitação está associada ao atrito, como na formação de clarões azuis ao se partir um cristal de açúcar ou ainda na clivagem de micas;
- quimioluminescência:** causada por reação química, como a oxidação de fósforo ao ar livre;
- cátodoluminescência:** causada pelo choque de partículas alfa ou elétrons, como nos oscilógrafos ou tubos de televisão.

A luminescência é subdividida em fluorescência e fosforescência. No primeiro caso a luz cessa logo ao cessar o agente, e no segundo caso a emissão luminosa se prolonga por um certo tempo após cessar a causa. Exemplos típicos são os mostradores de relógio e certas tomadas elétricas que fosforecem no escuro.

5.4. REFLEXÃO, TRANSMISSÃO E ABSORÇÃO

A luz é analisada como um fenômeno de caráter dual, ou seja, algumas vezes é mais conveniente se usar a teoria ondulatória e outras vezes é mais conveniente se usar a teoria "corpuscular". Newton favorecia a teoria corpuscular da luz por, entre outras coisas, observar a formação de sombras com contornos delineados pela propagação retilínea dos raios luminosos.

Huygens, Fresnel, Maxwell e Hertz desenvolveram a teoria ondulatória da luz, pois certos fenômenos como a difração (curvatura de uma onda luminosa em torno da borda de um objeto) ou a interferência luminosas só só podiam ser explicados por meio de um caráter ondulatório.

Mais tarde se retornou a aspectos da teoria corpuscular

porque a teoria eletromagnética clássica não explicava fenômenos como o efeito foto-elétrico ou o efeito Compton. O efeito foto-elétrico (emissão de elétrons por um condutor quando nêle incide luz) foi explicado por Einstein em 1905 ao desenvolver uma idéia de Planck. Ele postulou que a energia de um feixe luminoso não era distribuída espacialmente nos campos eletromagnéticos da onda, mas era concentrada em "corpúsculos" chamados fótons. Também o efeito Compton favorece a teoria corpuscular porque no choque de um elétron e um fóton eles se comportam como corpos materiais, conservando-se energia cinética e momento linear.

Em resumo fenômenos de propagação são mais bem explicados pela teoria ondulatória, enquanto que a interação luz-matéria é mais bem entendida usando-se conceitos corpusculares.

As propriedades ondulatórias são mais facilmente identificáveis quanto mais "compridas" as ondas; quanto mais além do vermelho visível estivermos mais notável se torna o aspecto ondulatório. Por outro lado quanto mais nos deslocamos do ultravioleta para os raios cósmicos mais notáveis são os aspectos corpusculares das radiações.

Certos fenômenos como a reflexão ou transmissão podem ser estudados supondo-se que a luz se propague em linha reta em um meio homogêneo. Tem-se em realidade um problema de geometria e daí o nome ótica geométrica, que estuda por exemplo a posição e amplificação de imagens por lentes ou a reflexão em espelhos.

Fenômenos como difração e interferência não conseguem ser analisados apenas com o princípios da ótica geométrica, exigindo conceitos como amplitude e diferença de fase. Nestes casos fala-se em ótica física.

5.4.1. REFLEXÃO LUMINOSA

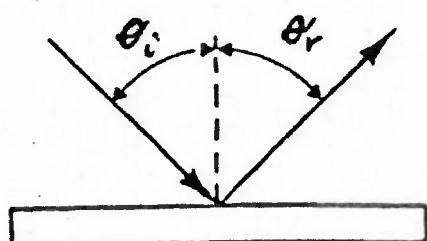
Objetos iluminados podem distribuir a luz refletida de vários modos, dependendo de fatores como a textura da superfície ou das camadas do objeto próximas à superfície.

A figura 5.2 ilustra algumas das possibilidades de distribuição. Em 5.2.a. temos o caso mais simples, ou seja a de uma superfície perfeitamente lisa como a de um espelho. Para um refletor deste tipo a direção do raio refletido é definida pela direção do raio incidente, tendo-se a igualdade entre ângulo de incidência θ_i e ângulo de reflexão θ_r . Um refletor deste tipo é chamado de especular.

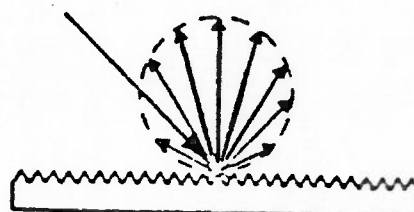
Em 5.2.b. temos uma reflexão difusa onde a luz incidente é espalhada em todas as direções pelas asperezas da superfície. Uma superfície deste tipo tende a parecer igualmente brilhante de qualquer ângulo de observação, tal qual uma parede pintada com tinta lisa. Em 5.2.c. temos reflexão com espalhamento parcial preferencial, e em 5.2.d. temos uma combinação de reflexão especular e difusa. A superfície do carvão é em essência um refletor difuso, porque reflete a luz incidente de modo uniforme numa ampla faixa de direções. Todavia tem-se um acréscimo da energia luminosa refletida no ângulo de reflexão especular.

No controle da emissão luminosa de lâmpadas e luminárias se utilizam os princípios da reflexão especular. A curvatura do refletor controla a distribuição da luz emitida pela fonte,

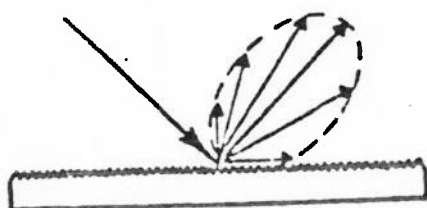
podendo-se ter formas elípticas, circulares ou parabólicas. A orientação obtida para os raios luminosos é mostrada nas figuras 5.3.



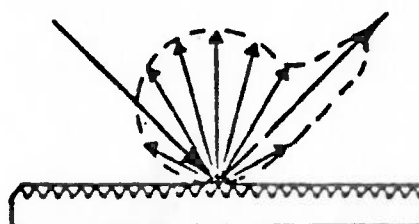
a. especular



b. difusa

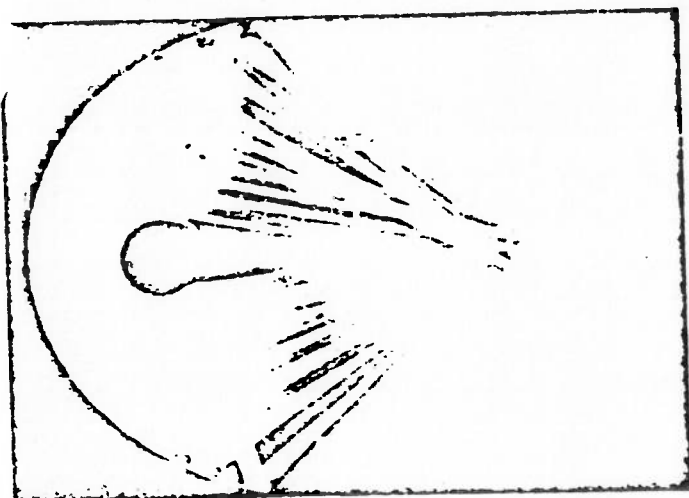


c. espalhamento preferencial

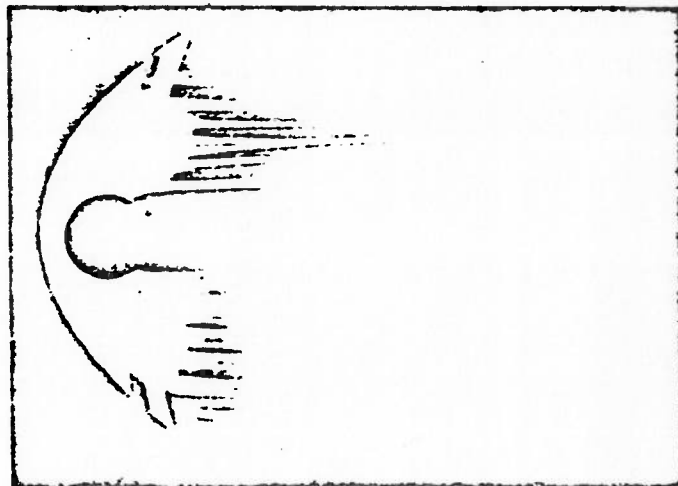


d. misto difuso-especular

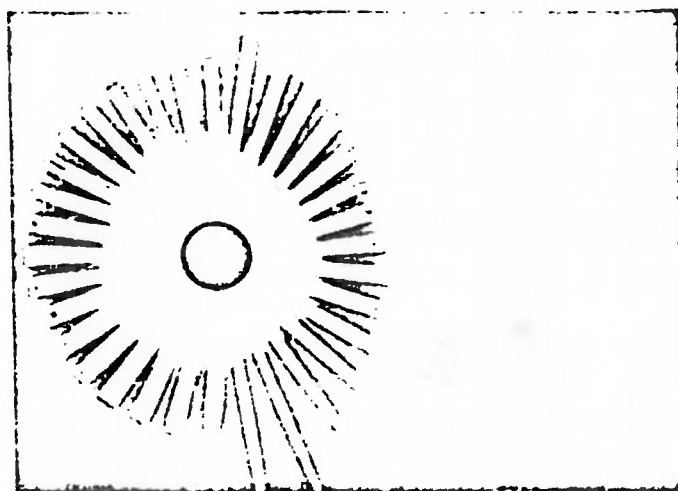
Figura 5.2. Tipos de reflexão. O tipo de refletor, o ângulo de observação e o ângulo de incidência afetam a percepção do brilho de um objeto bem como a medição da energia luminosa refletida. Estes fatores afetam as medidas de refletância e o dimensionamento de refletores mistos.



a. superfície elíptica com convergência dos raios para um ponto devido as propriedades da elipse.



b. superfície parabólica com emissão de raios paralelos conforme propriedade da parábola.



c. superfície circular gerando uma distribuição radial.

Figura 5.3. Controle da orientação de raios luminosos de luminárias por meio da curvatura do refletor.

5.4.2. TRANSMISSÃO LUMINOSA

A transmissão da luz através de um meio é afetada por diversas propriedades deste meio as quais dão origem a diversos fenômenos. Dentre estes citamos a transparência e a translucidez, a difusão, a transmissão seletiva, o espalhamento retroativo, a refração, a dispersão e a absorção.

A. Transparência e translucidez

Um material transparente transmite a luz sem espalhamento, de modo que se pode observar em detalhe os pormenores de objetos locados em qualquer lado do material. Um material translúcido transmite luz com um certo grau de espalhamento, de modo que não se observa nitidamente os contornos de objetos, os quais aparecem "borrados" e com contornos imprecisos.

B. Difusão

O fluxo luminoso pode ser controlado utilizando-se materiais com propriedades de gerar um certo grau de espalhamento. Esta difusão luminosa pode ser obtida por um tratamento do objeto transmissor como riscamento superficial, incorporação no material de partículas causadoras de espalhamento, aplicação de um revestimento superficial, etc.

O objetivo da difusão é fazer com que a fonte luminosa pareça maior e menos brilhante, sendo uma técnica importante para a redução do ofuscamento e conseqüente melhoria do conforto visual. Para duas lâmpadas incandescentes comuns, uma de bulbo de vidro limpo e outra de vidro fosco, a de bulbo fosco faz com que a fonte luminosa pareça maior, reduzindo portanto a percepção do brilho por unidade de área. O bulbo limpo tem um brilho por área cerca de sete vezes maior que o bulbo fosco.

A difusão sempre implica numa redução da energia transmitida, e portanto numa diminuição da eficiência da instalação luminosa. Técnicas de projeto de luminárias permitem minimizar esta redução da eficiência através do fenômeno da inter-reflexão, como ilustrado na figura 5.4.

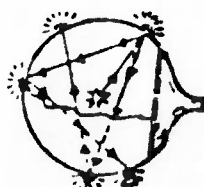


Figura 5.4. Efeito da inter-reflexão na distribuição da luz transmitida por fonte luminosa dentro de bulbo.

C. Transmissão seletiva

Muitos meios transmitem certos comprimentos de onda enquanto refletem ou absorvem outros. Esta propriedade pode ser usada para se remover certos comprimentos de onda, obtendo-se uma composição desejada do feixe luminoso. Estes materiais mudam a cor da luz alterando muito pouco a sua distribuição.

A transmissividade seletiva é utilizada em certos faróis que usam o chamado refletor dicróico, que transmite para frente o feixe luminoso enquanto transmite para trás comprimentos do infra-vermelho. Isto minimiza o efeito de aquecimento causado por estes comprimentos de onda em pessoas e objetos.

D. Espalhamento retroativo

Este é um fator importante quando se trabalha em condições atmosféricas com poeira ou neblina. O fenômeno ocorre quando partículas no ar refletem a luz de volta ao observador, diminuindo a visibilidade. Por isso é que se recomenda dirigir com faróis baixos quando se tem neblina forte, e com a utilização de luz de composição majoritariamente amarela.

5.4.3. REFRAÇÃO

A velocidade da luz no vácuo é uma constante e independe do comprimento de onda considerado. Em qualquer outro meio a velocidade de propagação é diferente da velocidade no vácuo e varia com o comprimento de onda considerado. Assim em qualquer meio que não o vácuo, raios monocromáticos vermelhos e violetas terão velocidades distintas, fenômeno este conhecido como dispersão. O quociente entre as velocidades da luz no vácuo (c) e num meio qualquer (v), para um dado comprimento de onda (λ), é chamado de índice de refração do meio (n_λ):

$$n_\lambda = c / v \quad (5.3)$$

Se não houver especificação o índice de refração se refere a luz amarela de sódio com comprimento de onda de 589 nm. A tabela 5.2. apresenta alguns valores do índice de refração relativos ao vácuo e para o comprimento de onda de 589,3 nm.

Para um mesmo meio, luzes monocromáticas de diferentes comprimentos de onda terão velocidades de propagação diferentes, ou seja, terão diferentes índices de refração. É esta variação do índice de refração que causa a dispersão da luz não monocromática ao atravessar um prisma. A figura 5.5. mostra esta variação para diversos materiais.

Quando uma luz monocromática atinge a interface de dois meios que tem índices de refração distintos, uma parte é refletida e outra parte é refratada, ou seja penetra no segundo meio. A figura 5.6. mostra para um raio luminoso monocromático incidente, um raio refletido e um raio refratado. Para a reflexão tínhamos a igualdade entre ângulo de incidência e ângulo de reflexão. Para a refração a lei de Snell fornece:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad (5.4)$$

Como: $n = c/v$ e $n' = c/v'$ podemos também escrever:

$$v/v' = \frac{\sin \theta}{\sin \theta'} \quad (5.5)$$

Tabela 5.2. Alguns valores de índices de refração [19,20].

Sólidos	
vidro crown (*)	1,5171
quartzo	1,5442
vidro de bário	1,5681
crown de bário	1,5741
vidro flint leve	1,5803
" " denso	1,6555
rutílio (**)	2,7
calcita	1,6584
diamante	2,423
gelo (-8 C)	1,31
fluorita	1,4339
silvita	1,4904
sal (NaCl)	1,544
crystal de rocha	1,5443
bissulfeto de carbono	1,629

(*) composição principal de alguns vidros (%):

	SiO ₂	Na ₂ O	PbO	BaO
crown	67	12	0	10,6
flint leve	54	1	35,2	0
" denso	39	3	49	0
" bário	54	1,7	16	14
crown "	48	2	0	29,5

(**) rutílio: dióxido de titânio cristalino sintético

Líquidos	
CO ₂ (-15 C)	1,195
N ₂ (-190 C)	1,205
O ₂ (-181 C)	1,221
água: 80 C	1,3230
40 C	1,3307
20 C	1,3330
0 C	1,3338
olho humano:	
humor aquoso	1,330
humor vítreo	1,337
álcool (20 C)	1,329

Gases (pressão de 1 atm)	
H ₂ (0 C)	1,320
vapor de água (0 C)	2,500
ar seco (15 C)	2,765

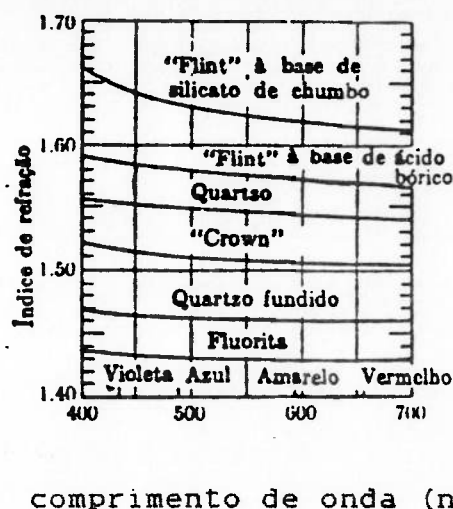


Figura 5.5. Variação do índice de refração com o comprimento de onda [20].

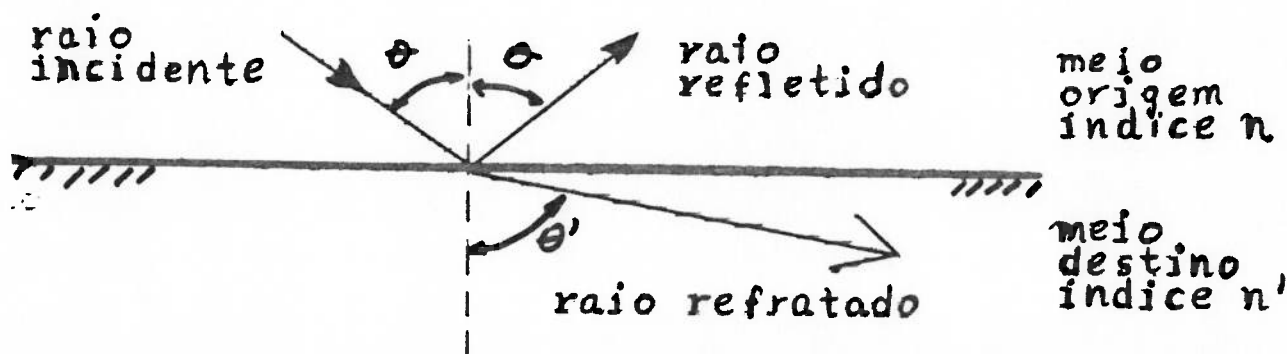


Figura 5.6. Refração da luz na interface de dois meios de índices de refração n e n' .

Muitos feixes luminosos são constituídos de ondas cujos comprimentos de onda se estendem por todo o espectro visível. Quando um raio de luz branca (mistura de todos os comprimentos de onda visíveis) incide em um prisma de quartzo como ilustrado na figura 5.7., ocorre a dispersão da luz. Como o desvio causado pelo prisma aumenta com o índice de refração, a luz violeta é a mais

desviada e a luz vermelha a menos, ocupando as outras cores posições intermediárias.

Ao sair do prisma a luz branca se espalha num leque, e dizemos que ela se dispersou num espectro. A dispersão da luz branca num espectro colorido pode ser quantificada por dois parâmetros: dispersão angular e desvio. Uma medida simples da dispersão angular é dada pela separação angular dos raios vermelho e violeta; já o desvio médio de todo o feixe com relação a direção de incidência é avaliado pelo ângulo de desvio da luz amarela (por estar a meio caminho entre a vermelha e a violeta). Assim o desvio do espectro é controlado pelo índice de refração da luz amarela, enquanto que a dispersão depende da diferença entre os índices de refração das luzes vermelha e violeta.

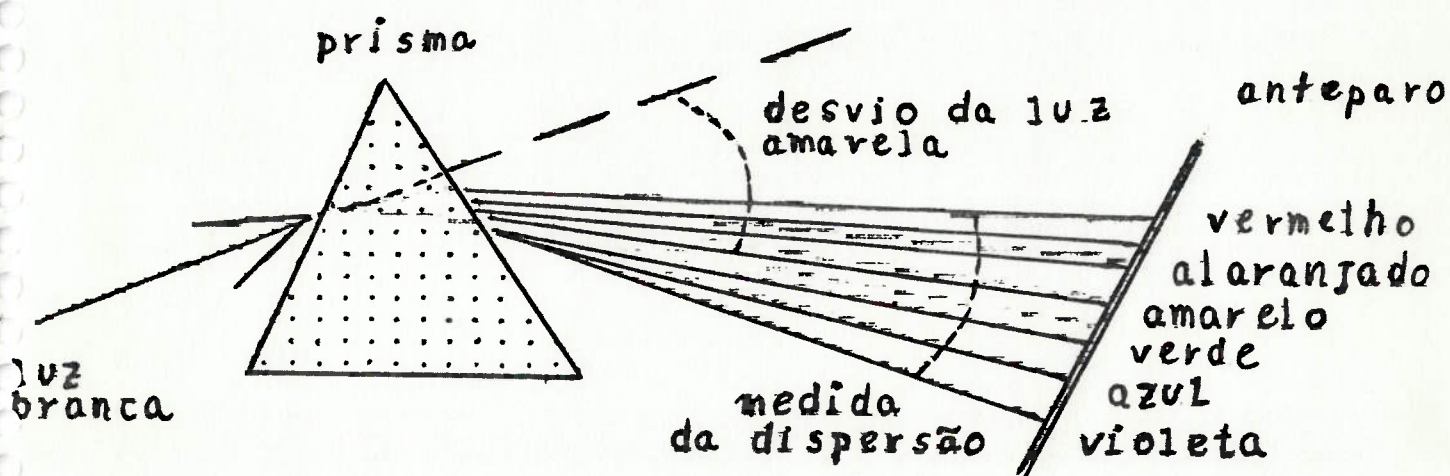


Figura 5.7. Dispersão da luz num prisma [20].

A tabela 5.3. apresenta a variação do índice de refração com o comprimento de onda para diversos tipos de vidro.

Tabela 5.3. Valores do índice de refração para vários comprimentos de onda (λ) e tipos de vidro [19].

cor	λ (nm)	"crown" leve	"flint" médio	"crown" de boro (*)	"flint" denso	dissul- fito de carbono
vermelho	656,3	1,5146	1,6224	1,5219	1,6500	1,6182
amarelo	589,3	1,5171	1,6272	1,5243	1,6555	1,6276
azul	486,1	1,5233	1,6385	1,5297	1,6691	1,6523
violeta	396,9	1,5325	1,6625	1,6592	1,6940	1,6994

(*) borossilicato contendo: SiO₂, K₂O, B₂O₃, BaO e Na₂O

Os parâmetros desvio e dispersão são importantes no estudo de certas propriedades como o brilho e a "luminosidade" de certas gemas e cristais. O brilho do diamante é em parte devido a grande dispersão que ele produz, o que ocorre também com os famosos cristais de Murano. O vidro "flint" apresenta também razoáveis desvio e dispersão ao contrário da fluorita.

A fluorita tem um índice de refração para a luz amarela pequeno, e também uma pequena diferença entre os índices de refração para o vermelho e o violeta. Apresenta portanto um pequeno desvio e uma pequena dispersão.

A velocidade da luz em um gás é aproximadamente igual a sua velocidade no vácuo e a dispersão é muito pequena. Para o ar em condições normais temos:

luz violeta ($\lambda = 436 \text{ nm}$) ----- $n = 1,000\ 295\ 7$

luz vermelha ($\lambda = 656 \text{ nm}$) ----- $n = 1,000\ 291\ 4$

Portanto na maioria das aplicações consideramos o índice de refração do ar como unitário para todos os comprimentos de onda.

O princípio da refração está associado ao problema de iluminação de dois modos básicos:

- a. lentes podem ser projetadas para controlar a distribuição da luz gerada por uma fonte sendo a distribuição controlada pela curvatura das lentes.
- b. o olho humano obtém uma imagem em foco na retina através do princípio da refração.

A transmissão da luz através da atmosfera nunca se faz com transmitância (t) igual a um, mesmo nas melhores condições de claridade e "visibilidade". A transmitância é sempre inferior a unidade (equação 5.2), e este fato deve ser considerado nos casos de neblina, "fog" ou poeira em suspensão, principalmente se as distâncias de transmissão forem grandes. Nestes casos utiliza-se o conceito de transmissividade, a qual é dada pelo quociente entre transmitância e distância:

$$t_u = t / d \quad (5.6)$$

onde: d = distância considerada
 t_u = transmissividade (transmitância por unidade de distância)

Numa atmosfera limpa a transmissividade da luz é de cerca de 0,96/km, ou seja, apenas 96% da luz atinge um observador locado a um quilômetro de distância. Para um observador locado a 2 km, apenas 92,2% da luz o atinge ($0,96 \times 0,96$).

Nos casos de neblina ou "fog", mesmos leves, a transmissividade se reduz drasticamente, caindo para valores da ordem de 0,4/km. Ou seja, um observador locado a 1 km recebe 40% da energia luminosa, a 2 km recebe-se 16% e a 3 km apenas 6% da luz.

O conceito de transmissividade é pouco utilizado em minas subterrâneas, sendo basicamente usado apenas nas análises de transmissão de sinais, como no selecionamento de dispositivos visuais de aviso de funcionamento de ventiladores de mina.

5.4.4. ABSORÇÃO

Quando um objeto absorve certos comprimentos de onda, permitindo que outros sejam refletidos ou transmitidos, dizemos que ele tem propriedades absorventes seletivas. A absorção seletiva altera a composição de comprimentos de onda da luz refletida (ou transmitida), e esta alteração é percebida como cor. Um objeto visto como vermelho quando iluminado por luz branca contém moléculas (pigmentos) que absorvem comprimentos de onda da faixa verde-azul do espectro, ao mesmo tempo em que refletem a luz vermelha. Por sua vez objetos azuis tem pigmentos que absorvem comprimentos de onda da porção verde-vermelha do espectro.

Se um objeto que quase só reflete luz com comprimento de onda da região vermelha do espectro for iluminado por uma luz contendo comprimentos de onda azuis e verdes, ele surgirá "sem cor" e muito escuro. Isto demonstra que o olho só consegue ver cores que já existam na luz incidente.

É importante se observar que a percepção da cor é um processo subtrativo, ou seja, a mistura de comprimentos de onda na luz refletida é sempre um sub-conjunto da mistura de comprimentos de onda da luz incidente no objeto. Todavia a energia total da luz refletida e transmitida em uma dada região de comprimentos de onda, não pode exceder a energia luminosa da região de comprimentos de onda que constitui a luz incidente.

As propriedades de absorção são úteis na seleção de fontes de luz onde a discriminação de cores é importante, como nos códigos de sinalização para fiações e tubulações, e zonas especiais de tráfego.

5.5. CURVA ESPECTRAL DE EFICIENCIA LUMINOSA

O olho humano não vê luz se propagando no espaço, mas tão somente a fonte luminosa e objetos que refletem a luz. É por isso que a noite o céu é escuro apesar da luz do sol estar indo até a lua, a qual é vista porque reflete a luz incidente.

O olho "sente" a luz que o penetra, a processa e a interpreta com relação ao objeto sendo visto. Estes processos se baseiam na focalização da imagem do objeto na retina, ocorrendo uma decodificação das informações trazidas pela luz refletida e obtendo-se informações sobre coloração, brilho e relações espaciais. Portanto é a luz refletida que tem influência no que é visto, e projetistas tem de avaliar o ambiente para saber quanta luz é refletida e como esta é distribuída.

5.5.1. CORES

Cores são nomes especiais dados a vários comprimentos de onda ou a várias combinações de comprimentos de onda.

Observando-se a figura 5.1. percebe-se que comprimentos de onda entre 380 e 400 nm caracterizam a cor violeta, enquanto que comprimentos de onda ao redor de 600 nm caracterizam a cor amarela. Quando se tem uma mistura de comprimentos de onda de

todo o espectro visível a luz aparece como branca, enquanto que o preto não é uma cor mas a ausência total de luz (refletida ou emitida). O sol e certas lâmpadas produzem misturas mais ou menos "balanceadas" de todo o espectro visível, e portanto emitem luz "natural". Outras proporções relativas de comprimento de onda produzem diversos tipos de luz denominadas de "brancas".

Convém observar que certas combinações de comprimentos de onda podem "parecer" como sendo um dado comprimento de onda individual. Assim a mistura de amarelo e azul parece verde, ou seja, é percebida pelo olho como sendo a cor verde.

5.5.2. BRILHO

A percepção do brilho de um objeto depende de duas características da luz, ou seja, da energia luminosa e da mistura de comprimentos de onda. Para um dado comprimento de onda quanto maior a energia atingindo o olho maior a sensação de brilho.

Todavia o olho humano não responde igualmente a todos os comprimentos de onda do espectro visível, e a figura 5.8. ilustra isso. Ela representa a resposta do olho ao brilho relativo de vários comprimentos de onda, referenciados porcentualmente ao comprimento de onda de 555 nm (para o qual o olho é mais sensível). Esta curva é chamada de curva espectral de eficiência luminosa e é uma curva média, obtida a partir das curvas individuais para muitas pessoas.

A curva espectral de eficiência luminosa deve ser considerada quando se projeta a energia luminosa envolvida num ambiente, e os aparelhos de medidas possuem sistemas de filtros que selecionam comprimentos de onda de acordo com esta curva. Além disso ela surge em todas as definições de sistemas de unidades luminosas.

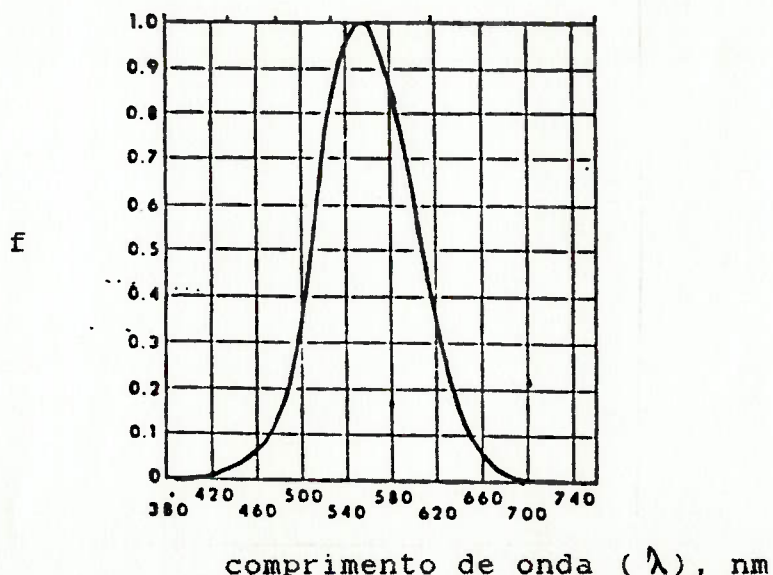


Figura 5.8. Curva espectral de eficiência luminosa de fluxo radiante monocromático em função do comprimento de onda [6].

Consideremos dois raios monocromáticos de comprimentos de onda 650 e 550 nm, e que transportem a mesma energia radiante (medida por exemplo em watts). De acordo com a figura 5.8. o raio luminoso de 650 nm fornecerá um brilho cerca de dez vezes menor, e o olho perceberá esta diferença relativa de brilho.

A curva espectral é utilizada na construção de instrumentos fotométricos, ou seja, instrumentos que consideram o "brilho" de uma superfície iluminada pois eles procuram imitar a percepção do olho humano. Por outro lado aparelhos que medem apenas a energia radiante são ditos radiométricos e fornecem resultados em watts ou unidades equivalentes. A figura 5.9. ilustra a diferença essencial entre instrumentos fotométricos e radiométricos.

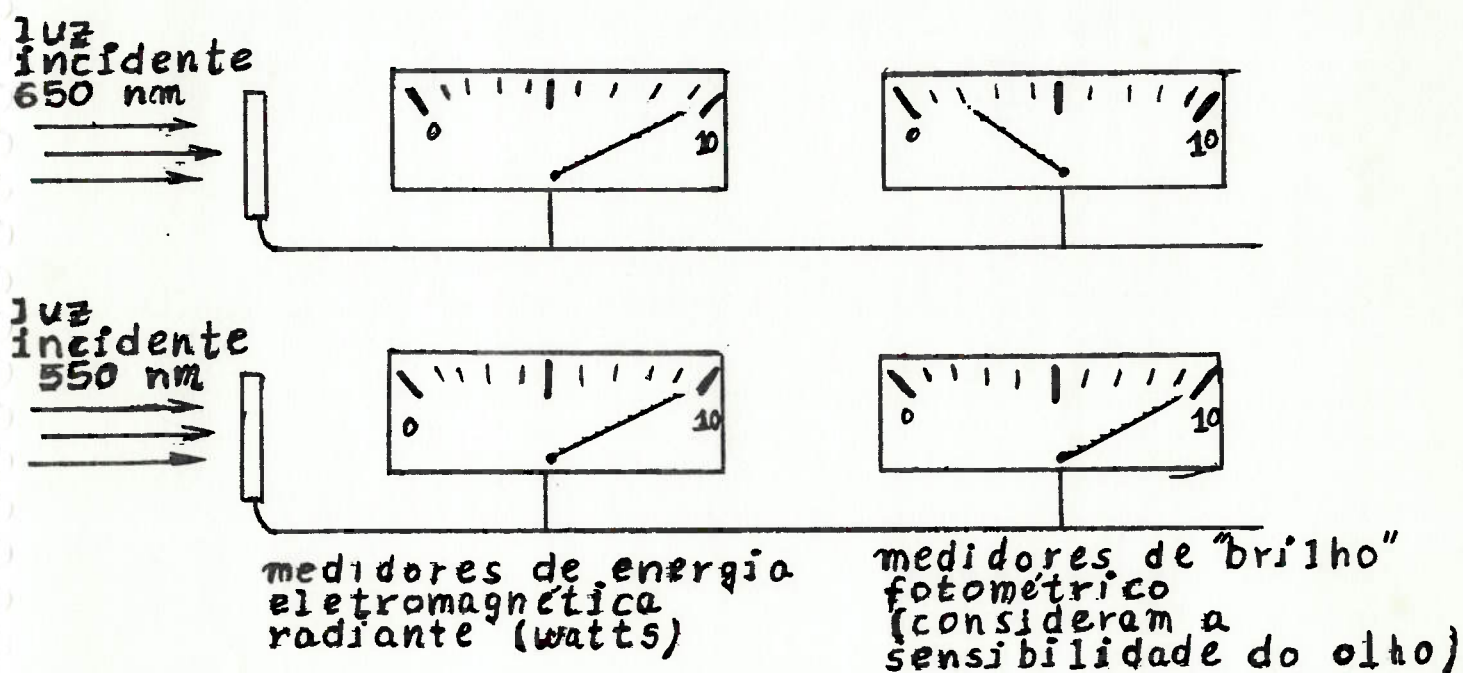


Figura 5.9. Comparação entre as medidas de energia radiante (instrumentos radiométricos) e de fluxo luminoso (instrumentos fotométricos). Os fotométricos levam em consideração a curva espectral de eficiência luminosa, e portanto a luz de comprimento de onda de 550 nm origina uma medida fotométrica de intensidade 10 vezes maior, apesar de ambos os feixes luminosos transportarem a mesma energia eletromagnética (energia radiante).

6. FOTOMETRIA

6.1. GRANDEZAS E UNIDADES FOTOMÉTRICAS

Fontes luminosas comuns se caracterizam por transformar a energia elétrica recebida em energia eletromagnética radiante. A emissão da energia radiante depende da temperatura e da natureza da superfície emitente, e se observa que apenas uma parte da potência elétrica recebida (P_{el}) se transforma em fluxo eletromagnético radiante (ϕ_r), como ilustra a figura 6.1.

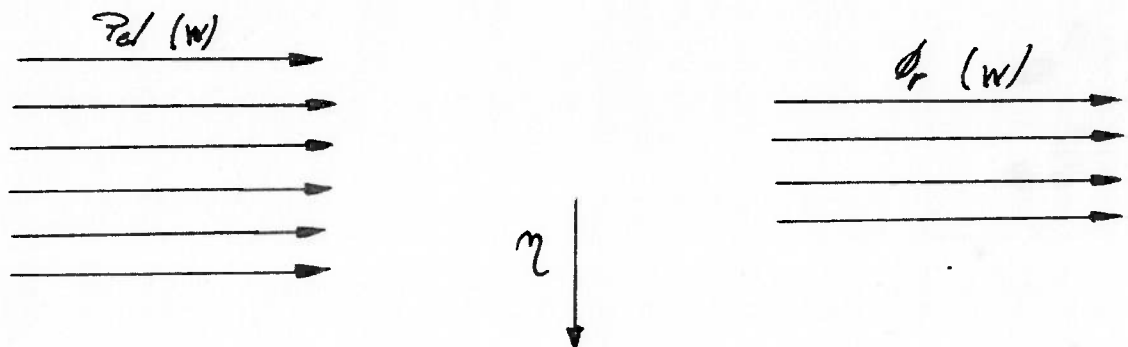


Figura 6.1. Transformação de potência elétrica em energia radiante. As perdas incluem calor por convecção e radiação, absorção, etc. O rendimento é dado por: $\eta = \phi_r / P_{el}$.

Verifica-se também experimentalmente que apenas uma parte do fluxo radiante (ϕ_r) sensibiliza o olho humano, mais precisamente a estreita faixa de comprimentos de onda entre 380 e 780 nm. Esta faixa define o fluxo luminoso (ϕ_l), composto da radiação visível e ilustrado na figura 6.2.

Unidades como o watt são usadas quando se quer quantificar a energia associada às grandezas potência elétrica ou fluxo radiante, tendo-se então as "intensidades" das fontes como emissoras de radiação eletromagnética. Como o que interessa comparar são as "intensidades relativas" das fontes como emissoras de luz visível, em projetos de iluminação esta-se mais interessado em comparar fluxos luminosos do que fluxos radiantes.

A experiência mostra que quantidades iguais de fluxos radiantes de diversos comprimentos de onda não produzem iguais percepções de brilho visual. Além disso, quantidades iguais de fluxos luminosos monocromáticos de cores distintas também não produzem a mesma percepção visual de brilho. Estas observações são sintetizadas na curva espectral de eficiência luminosa (figura 5.8), a qual reflete o fato de que para um grande número de pessoas a vista é mais sensível à luz verde de comprimento de onda de 555 nm. Os limites desta curva experimental é que definem a faixa de comprimentos de onda que sensibilizam o olho humano, estimada entre 380 e 780 nm. Estes

limites do espectro visível não são rígidos, e com iluminação reduzida a vista se torna mais sensível a comprimentos de onda mais curtos; nestes casos a percepção do maior brilho se situa na faixa de 500 a 550 nm.

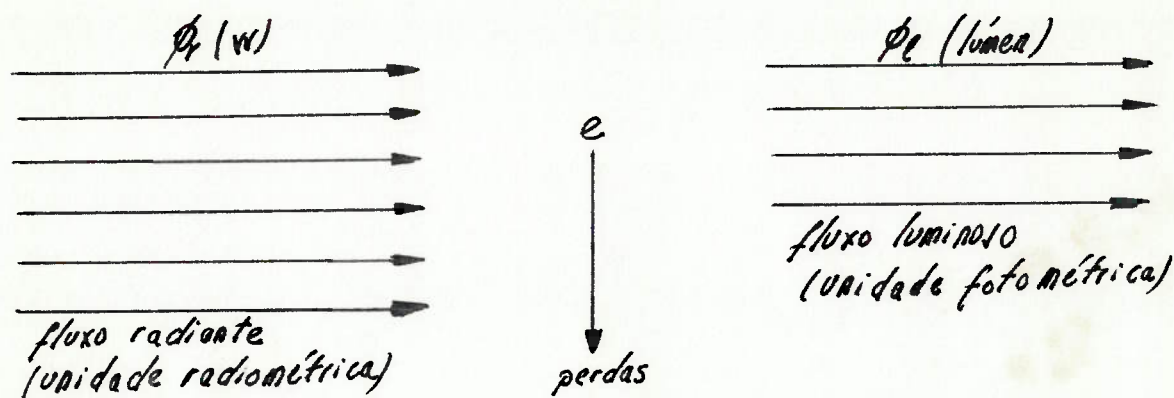


Figura 6.2. Uma parte do fluxo radiante ϕ_r compõe o fluxo luminoso ϕ_l , o qual é capaz de sensibilizar o olho e cuja unidade é o lúmen (e não o watt).

O decaimento da percepção do brilho para cores diferentes do verde é rápido, e a 610 nm o brilho relativo é de apenas 50%. Isto é, se olharmos uma superfície onde incidem fluxos iguais de energia radiante, medidos em watts, e de comprimentos de onda de 555 e 610 nm, para o segundo parecerá que se tem apenas metade do brilho do primeiro.

Para um mesmo observador uma lâmpada emitindo um milésimo de watt de luz verde parece brilhante, ao passo que uma emitindo um milésimo de watt de luz azul parece pálida. A relação na curva espectral é da ordem de 1 para 0,05 ou seja, a luz azul parece vinte vezes menos brilhante. Lâmpadas que emitem apenas radiações com comprimentos de onda menores que 380 nm ou maiores que 780 nm não apresentam "brilho" e parecem negras.

Dos exemplos acima percebe-se que o watt não é adequado para quantificar fluxo luminoso, e o que se precisa é de uma unidade que exprima a capacidade da radiação provocar sensações visuais subjetivas de brilho. O instrumento básico de medida é o olho humano e a ciência que compara quantidades de luz e seus efeitos na iluminação de objetos, tendo por base as sensações visuais, chama-se fotometria.

Os sistemas de unidades fotométricas são muito particulares, porque aplicam uma função de ponderação humana às medidas físicas de energia. Ou seja, eles ponderam as energias medidas com a curva espectral de eficiência luminosa. Esta é uma diferença essencial entre unidades radiométricas e fotométricas; as primeiras são usadas para radiações não visíveis e não incluem esta ponderação humana.

As principais grandezas que nos interessam em projetos de iluminação mineira são: potência elétrica (P_{el}), fluxo radiante

(ϕ_r), fluxo luminoso (ϕ_l), eficácia luminosa (e), intensidade luminosa (I), iluminamento (E), luminância (L) e refletância (r). As figuras 6.1. e 6.2. são sintetizadas na figura 6.3. onde se visualiza as quatro primeiras grandezas acima citadas.

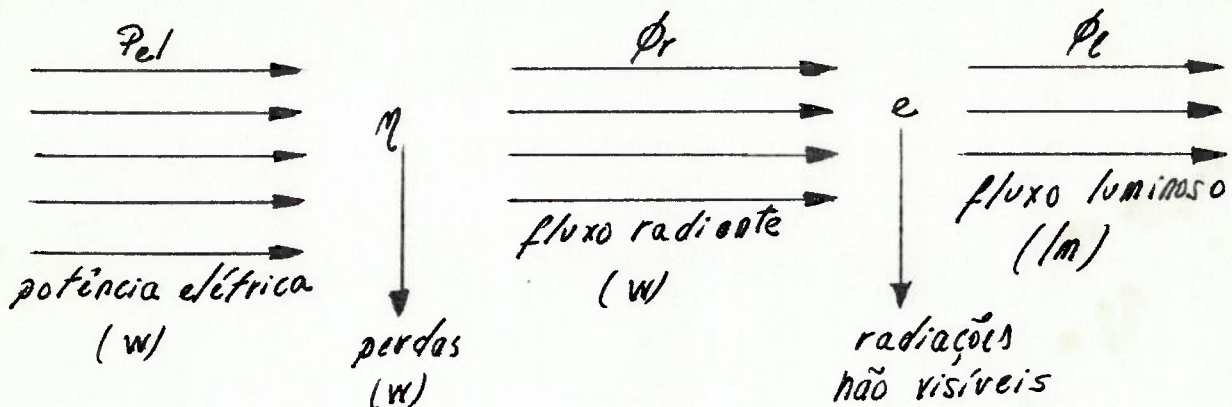


Figura 6.3. Da potência elétrica inicial apenas uma parte se transforma em fluxo luminoso; η e e são os fatores que expressam as eficiências desta transformação.

6.2. FLUXO RADIANTE

É a potência transportada por todas as radiações de um feixe eletromagnético independentemente de efeitos visuais. Ou seja é a energia transportada na unidade de tempo por todos os comprimentos de onda do feixe. Sua unidade é o watt.

Assim para uma lâmpada incandescente que gera um fluxo radiante de 150 watts e tenha um globo leitoso que absorve 16% desta radiação, sai do globo para o meio externo o fluxo radiante de:

$$\phi_r = (0,84) (150) = 126 \text{ W}$$

Este fluxo contém radiações visíveis e não visíveis.

6.3. FLUXO LUMINOSO

É a potência transportada medida conforme a sensação visual que pode produzir. Sua unidade no sistema internacional é o lúmen, símbolo lm, que representa energia na unidade de tempo tanto quanto outras unidades como o watt, o cavalo-vapor, a caloria por segundo, etc.

Definido o lúmen e utilizando-se considerações geométricas é possível se definir as demais unidades que quantificam a distribuição da luz no espaço e sobre objetos.

6.3.1. FONTE DE LUZ PADRÃO

A fonte de luz padrão internacional é composta de um tubo cilíndrico de material refratário circundado por platina pura, como ilustra a figura 6.4. Quando a platina está no seu ponto de fusão, a luz emitida pela extremidade se constitui numa boa aproximação da emissão do radiador perfeito (corpo negro). O fluxo luminoso emitido por esta fonte depende da área da abertura e do tamanho do cone de radiação (isto é, do ângulo sólido).

Por definição "um lúmen é o fluxo luminoso emitido por uma abertura de (1/60) cm² feita numa fonte padrão, e incluído num ângulo sólido de um esterorradiano".

Se considerarmos uma área de (2/60) cm², ou um cone de dois esterorradianos, teremos um fluxo de dois lúmens.

6.3.2. COMPARAÇÃO DE FLUXOS LUMINOSOS

Com um instrumento como um fotômetro de cintilação, pode-se comparar a sensação subjetiva de brilho causada pela fonte padrão com a sensação provocada pela luz de qualquer cor. Se o olho fosse igualmente sensível a todo o espectro eletromagnético, então o fluxo luminoso ϕ_l seria igual ao fluxo radiante ϕ_r e ambos seriam medidos em watts. Mas o olho só é sensível a uma pequena faixa de radiações (entre 380 e 780 nm), e mesmo dentro desta faixa a sensibilidade varia como indicado pela curva espectral de eficiência luminosa.

No pico da curva espectral (luz verde com $\lambda = 555$ nm) obtém-se que 1 watt de fluxo radiante monocromático corresponde a 685 lúmens de fluxo luminoso. Para fluxos radiantes monocromáticos de outras cores (portanto não mais no pico da curva espectral), 1 watt de fluxo radiante corresponde a menos que 685 lúmens de fluxo luminoso.

6.3.3. EFICÁCIA LUMINOSA

A partir da curva espectral de eficiência luminosa define-se a noção de eficácia luminosa (e), dada pelo quociente:

$$e = \phi_l / \phi_r \quad (6.1)$$

Como ϕ_l é dado em lúmens e ϕ_r em watts, a eficácia é dada em lúmens por watt. A máxima eficácia de 685 lm/W ocorre para a luz verde de comprimento de onda de 555 nm; para qualquer outra cor a eficácia é menor que 685 lm/W. Para radiações monocromáticas fora do pico da curva espectral a eficácia luminosa é obtida através do fator de luminosidade f. Este fator corresponde a ordenada da curva espectral mostrada na figura 5.8.

Portanto:

$$e = f \times 685 \text{ lm/W} \quad (0 < f < 1) \quad (6.2)$$

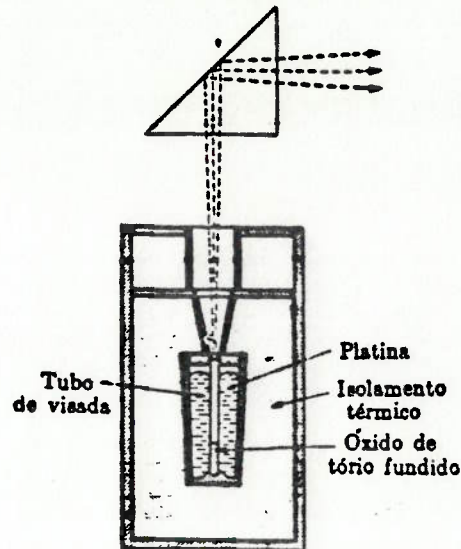


Figura 6.4. Fonte de luz padrão internacional. O material refratário é o óxido de tório fundido (ThO_2), que possui elevada temperatura de fusão. A platina pura não se oxida, não se corroi e não se combina com o óxido de tório [20].

Assim para a luz de vapor de sódio com comprimento de onda de 589 nm, temos para f o valor de 0,765. Logo a eficácia luminosa desta luz amarela será de:

$$e = (0,765)(685) = 524 \text{ lm/W}$$

Ou seja, cada watt de potência radiante desta luz conterà 524 lúmens de energia luminosa. Já para a radiação amarela de comprimento de onda de 600 nm um feixe de 5 watts desta luz conterà os seguintes lúmens:

da curva espectral: $f = 0,5$

como: $e = f \times 685$ ----- $e = 341,5 \text{ lm/W}$

mas: $e = \phi_l / \phi_r$ ----- $\phi_l = 341,5 \times \phi_r$

para: $\phi_r = 5\text{W}$ --- $\phi_l = 341,5 \times 5 = 1707,5 \text{ lm}$

Através da curva espectral de eficiência luminosa pode-se comparar potências radiantes para luzes de diferentes comprimentos de onda. Assim para um lúmem de luz verde (555 nm) e de luz amarela (600 nm) são necessárias as seguintes quantidades

de watts:

como: $e = f \times 685 = \phi_l / \phi_r$

luz verde: $f = 1 \quad \phi_l = 685\phi_r \quad \phi_r = (1/685) W$

luz amarela: $f = 0,5 \quad \phi_l = 0,5 \times 685 \times \phi_r \quad \phi_r = (2/685) W$

6.3.4. EFICIÊNCIA GLOBAL DE UMA LÂMPADA

A figura 6.3. apresenta a eficiência de transformação da potência elétrica em potência radiante, simbolizada por η , e a eficiência do fluxo radiante em produzir sensação visual, expressa pela eficácia e.

Tem-se as relações:

$$\eta = \phi_r / P_{el} \quad (6.3)$$

$$e = \phi_l / \phi_r \quad (6.1)$$

A eficácia luminosa exprime uma propriedade de um fluxo radiante, e podemos definir a eficiência global de uma fonte luminosa (como uma lâmpada) por:

$$\eta_g = \phi_l / P_{el} \quad (6.4)$$

Portanto:

$$\eta_g = (e\phi_r) / P_{el} = (f \times 685 \times \phi_r) / P_{el}$$

$$\eta_g = f \times 685 \times (\eta P_{el}) / P_{el}$$

Finalmente:

$$\eta_g = f \times \eta \times 685 \text{ lm/W} \quad (6.5)$$

Devido as perdas por calor (expressas por η) e a produção de radiações não visíveis (expressas por e), a eficiência luminosa global das lâmpadas é bem inferior a 685 lm/W. Para lâmpadas fluorescentes brancas η_g é da ordem de 50 lm/W, e para incandescentes brancas é da ordem de 20 lm/W.

A tabela 6.1. apresenta alguns valores de eficiências globais, onde se pode notar que uma lâmpada fluorescente de 40 W fornece 5 vezes "mais luz" que sua correspondente incandescente.

6.4. INTENSIDADE LUMINOSA DE FONTE PUNTUAL

A intensidade luminosa é uma grandeza usada para se descrever como o fluxo luminoso, emitido por uma fonte puntual, se distribui no espaço que a rodeia. A definição formal é: a

intensidade luminosa de uma fonte pontual, numa dada direção, é a quantidade de fluxo luminoso que ela irradia por unidade de ângulo sólido na direção considerada. Esta definição envolve o conceito de ângulo sólido que apresentamos a seguir.

6.4.1. ANGULO SÓLIDO

Um ângulo sólido é um ângulo tridimensional, definido pelo centro de uma esfera e por uma área de forma qualquer na superfície da esfera. A figura 6.5. apresenta algumas áreas na superfície da esfera de raio R; quando a área for uma calota esférica o ângulo sólido define um cone.

O ângulo plano $\Delta\varphi$ é medido em radianos, cujo valor é dado pelo quociente entre o comprimento do arco subentendido e o raio da circunferência:

$$\Delta\varphi = \Delta l / R \quad (6.6)$$

O ângulo plano de 1 radiano é aquele cujo arco tem o comprimento do raio, e vale cerca de 57,29 graus. A volta completa da circunferência (com comprimento de $2\pi R$) define o ângulo de 2π radianos (vide figura 6.5.b).

Tabela 6.1. Eficiências luminosas globais para diversas lâmpadas [20,21].

lâmpadas de tungstênio(*)			lâmpadas fluorescentes		
Pel (W)	ϕl (lm)	η_g (lm/W)	Pel (W)	ϕl (lm)	η_g (lm/W)
10	78	7,8	4	73	18,2
25	260	10,4	6	210	35,0
40	465	11,7	8	330	41,2
60	835	13,9	14	490	35,0
100	1 630	16,3	20	960	48,0
200	3 650	18,3	30	1 500	50,0
500	9 950	19,9	40	2320	58,0
1 000	21 500	21,	100	4 400	44,0

(*) Outros tipos de lâmpadas como mista, vapor de mercúrio e vapor de sódio apresentam η_g nas faixas respectivas de 17-25, 44-62 e 70-120 lm/W.

O ângulo sólido $\Delta\Omega$ é medido em esterorradianos, dados pelo

quociente entre a área ΔS e o raio da esfera ao quadrado:

$$\Delta \Omega = \Delta S / R^2 \quad (6.7)$$

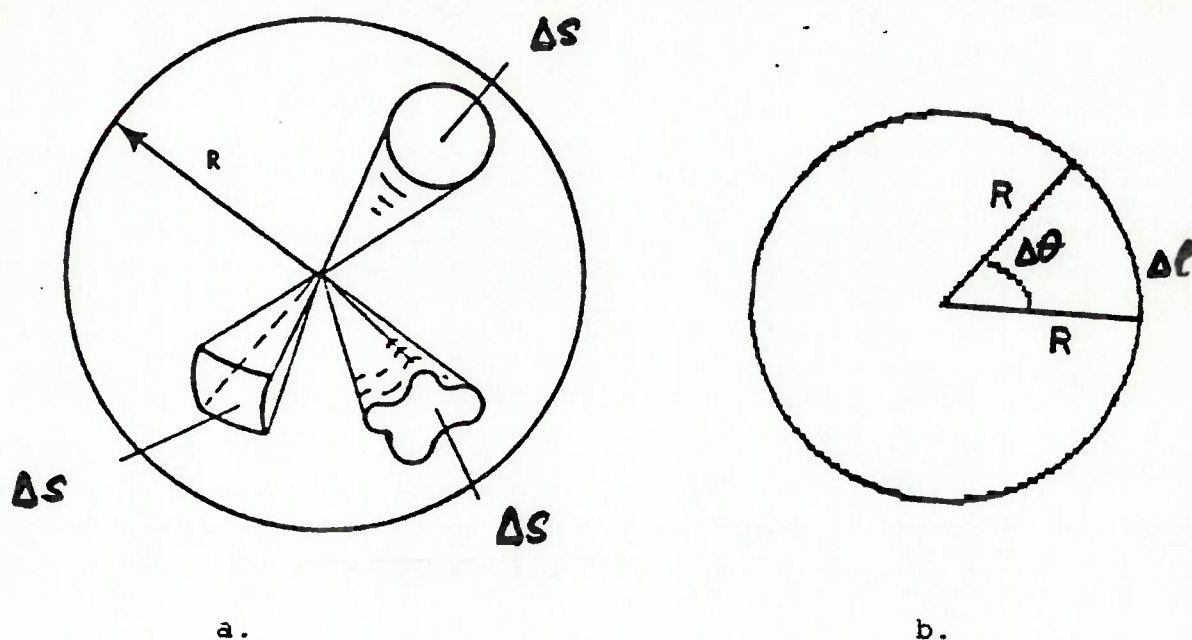


Figura 6.5. Em a. temos alguns ângulos sólidos numa esfera de raio R; em b. temos um ângulo plano num círculo de raio R.

Portanto o ângulo sólido de 1 esterorradiano é aquele cuja área na superfície da esfera é igual ao raio ao quadrado. Como a superfície da esfera é de 4π vezes o raio ao quadrado, o espaço todo ao redor do centro contém um ângulo sólido de 4π esterorradianos.

Notemos que a área subentendida por um dado ângulo sólido varia com o quadrado do raio; um ângulo sólido de 1 esterorradiano subentende 1 m² numa esfera de 1 m de raio, 100 m² numa esfera de 10 m de raio e 10 000 m² numa esfera de 100 m de raio.

O conceito de ângulo sólido é muito importante na fotometria e sua relação com o conceito de ângulo efetivo de fecho é importante nas análises de fontes de luz em subsolo. Consideremos uma lanterna de capacete mineiro com um ângulo efetivo de fecho de 20 graus conforme ilustrado na figura 6.6. Pode-se desejar determinar a quantos metros de distância ela ilumina uma área esférica de 10 m², tendo-se:

$$\Delta \Omega = 2\pi (1 - \cos \theta) = 2\pi (1 - \cos 20^\circ) = 0,379 \text{ sr}$$

Como:

$$\Delta \Omega = \Delta S / R^2 = 10 / 0,379$$

Obtemos:

$$R = 5,13 \text{ m}$$

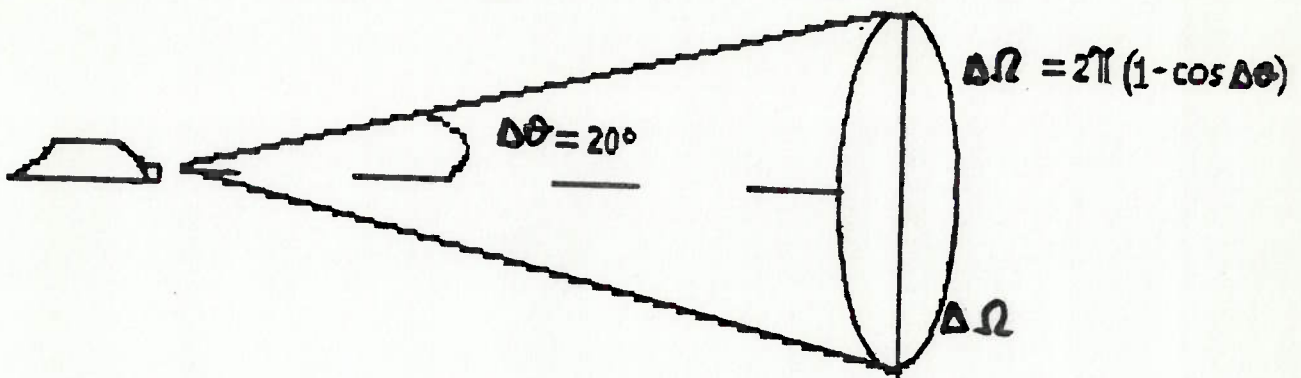


Figura 6.6. A relação entre ângulo sólido $\Delta \Omega$ e ângulo efetivo do feixe $\Delta \theta$ relaciona esterorradianos com radianos (ou graus).

6.4.2. INTENSIDADE LUMINOSA

Matematicamente a intensidade luminosa de uma fonte pontual é dada pelo quociente:

$$I = d\phi_l / d\Omega \quad (6.8)$$

onde:

$d\phi_l$ = fluxo luminoso em lúmens

$d\Omega$ = ângulo sólido em esterorradianos

I = intensidade luminosa em lúmens por esterorradianos (ou candelas) na direção do ângulo sólido considerado.

Se considerarmos um fluxo finito num ângulo sólido finito então temos a intensidade média I_m dada por:

$$I_m = \Delta \phi_l / \Delta \Omega \quad (6.9)$$

Portanto no limite obtemos:

$$I = \lim_{\substack{\Delta S \rightarrow 0 \\ \Delta \Omega \rightarrow 0}} (\Delta \phi_l / \Delta \Omega) = d\phi_l / d\Omega$$

Como não existem na realidade fontes puntuais, uma fonte real pode ser tratada como puntual quando sua maior secção transversal for igual ou inferior a $1/20$ da distância da qual ela é observada. Aproximações mais grosseiras são feitas para a relação $1/10$. Assim uma chama de vela de 2 cm é considerada puntual a mais de 40 cm. Para fontes não puntuais extensas existe o conceito de luminância que será visto mais adiante.

A tabela 6.2. apresenta as intensidades associadas a alguns tipos de fontes mais comuns.

Tabela 6.2. Fontes comuns consideradas em primeira aproximação como puntuais e suas intensidades médias [19,11].

fonte	intensidade
fósforo aceso	0,3 cd
vela	0.8 cd
fósforo ao riscar	3 cd
bico de gás comum	10 a 18 cd
lâmpada incandescente	25 a 120 cd
lâmpada inc. de 100 W	120 cd
arco elétrico	1 0000 a 2 0000 cd

A maioria das fontes não emite quantidades iguais de fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido em todas as direções do espaço. Por exemplo uma lâmpada incandescente não emite fluxo na direção da sua base. Assim para uma fonte luminosa puntual de intensidade I candelas para todas as direções, o fluxo luminoso que ela emite para o espaço que a rodeia é expresso por:

Como:
$$I = d\phi_l / d\Omega$$

O fluxo total será:

$$\phi_l = \int d\phi_l = \int_0^{4\pi} I d\Omega = 4\pi I \text{ A candelas}$$

O fluxo luminoso total emitido pelo sol é de cerca de 43×10^{27} lm. Se for considerado como fonte puntual a sua intensidade luminosa será:

Temos:
$$I(\text{sol}) = \phi_l / \Delta\Omega = \phi_l / 4\pi = 3,4 \times 10^{27} \text{ candelas}$$

O fluxo luminoso dado em lumens representa a quantidade de energia luminosa transportada na unidade de tempo, e pode ser visualizado através de linhas de fluxo luminoso. A figura 6.7. ilustra dois ângulos sólidos iguais Ω_1 e Ω_2 , estando a fonte puntual locada no centro da esfera. A densidade de fluxo luminoso é representada geometricamente pela concentração de linhas de fluxo, tendo-se portanto mais fluxo luminoso no ângulo Ω_2 .

Como a intensidade é dada por:

$$I = \phi_l / \Omega$$

obtémos que $I_2 > I_1$, ou seja, a intensidade luminosa é maior na direção de Ω_2 do que na direção de Ω_1 .

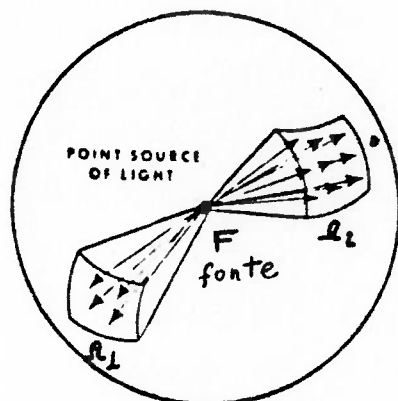


Figura 6.7. Ângulos sólidos Ω_1 e Ω_2 iguais, contendo diferentes quantidades de lúmens.

Uma interessante analogia entre a intensidade de um feixe luminoso e o jato de água de uma mangueira com bocal ajustável pode ser feita. Para uma vazão constante de água, o bocal pode ser ajustado para se ter um jato intenso num ângulo fechado ou um jato pouco intenso num ângulo grande. A intensidade do jato se refere ao número de gotas de água no ângulo sólido enquanto que a intensidade luminosa se refere ao número de lúmens num ângulo sólido.

Do exposto fica claro que a intensidade luminosa de uma fonte pontual é uma grandeza direcional, com a direção sendo definida pelo "eixo" do ângulo sólido. A intensidade calculada pela expressão:

$$\bar{I} = \phi_l / \Delta \Omega$$

é uma intensidade média para todo o ângulo sólido e uma área sobre uma esfera centrada na fonte pontual. A medida que o ângulo sólido é subdividido em ângulos menores a variação da intensidade com a direção pode ser melhor avaliada. No limite:

$$I = d\phi_l / d\Omega \quad (6.10)$$

Para áreas infinitesimais dA que não estejam sobre a superfície de uma esfera, ou seja para áreas infinitesimais cujas

normais não contenham o vértice do ângulo sólido, temos a seguinte expressão para o ângulo sólido:

$$d\Omega = dA_{\text{proj}} / R^2 \quad (6.11)$$

onde dA_{proj} representa a projeção de dA na direção normal ao raio como mostra a figura 6.8.

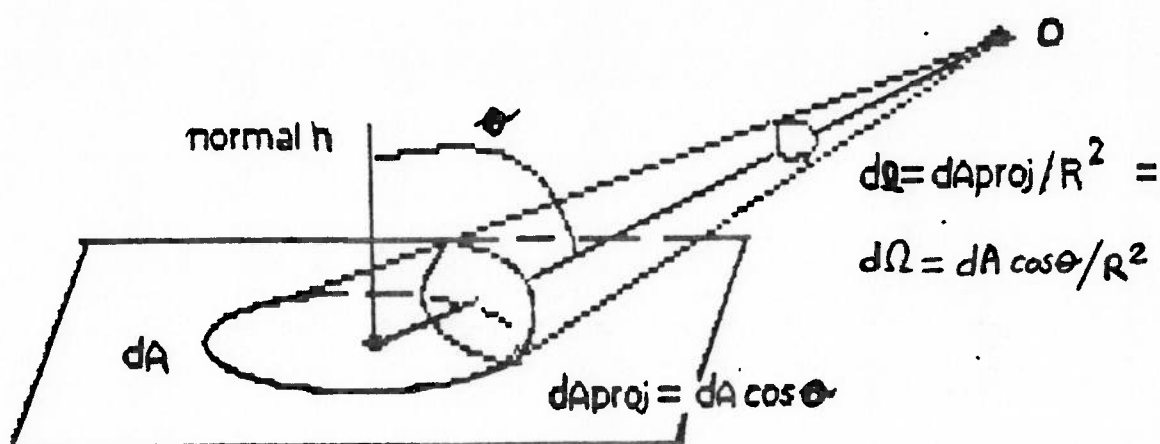


Figura 6.8. Ângulo sólido para área infinitesimal não esférica.

Os conceitos de ângulo sólido e intensidade luminosa tem aplicação direta nos problemas de iluminação mineira quando se considera questões como níveis mínimos de iluminação em subsolo. Consideremos o holofote de veículo mineiro cujo fabricante afirma que ele emite luz a taxa de 2 000 lm. Estimemos qual seria a intensidade média de seu fecho se seu ângulo efetivo for de 25 graus como mostra a figura 6.9. A relação entre ângulo efetivo (θ em graus) e ângulo sólido (Ω em esterorradianos) é dada por:

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta)$$

Temos:
$$\Omega = 2\pi (1 - \cos 25) = 0,5885 \text{ sr}$$

A intensidade média do fecho neste ângulo sólido será:

$$I = \phi / \Omega = 2\,000 / 0,5885 = 3\,401 \text{ candelas}$$

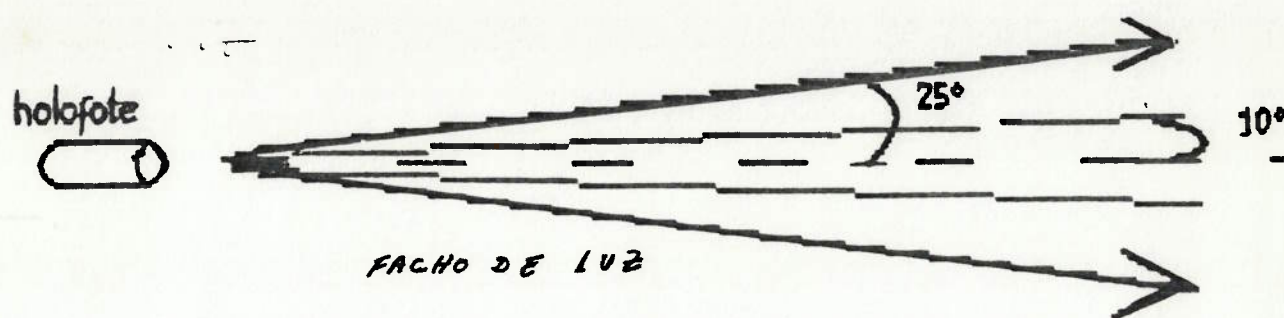


Figura 6.3. Ângulo efetivo de feixe luminoso para holofote mineiro.

Suponhamos que para este holofote a energia luminosa varie no interior do feixe como abaixo indicado:

porção do feixe	quantidade de lumens
0 - 10 graus	55%
10 - 25 graus	45%

Para estimar quais seriam as intensidades médias nestas porções do feixe precisamos calcular os ângulos sólidos associados a cada região. Temos portanto:

$$\Omega(0-10) = 2\pi (1 - \cos 10) = 0,095 \text{ sr}$$

$$\Omega(10-25) = \Omega(0-25) - \Omega(0-10) = 0,508 - 0,095 = 0,493 \text{ sr}$$

Os fluxos luminosos em cada porção são:

$$\phi(0-10) = 0,55 \times 2\,000 = 1\,100 \text{ lm}$$

$$\phi(10-25) = 0,45 \times 2\,000 = 900 \text{ lm}$$

As intensidades luminosas serão então:

$$\bar{I}(0-10) = 1\,100 / 0,095 = 11\,578,9 \text{ candelas}$$

$$\bar{I}(10-25) = 900 / 0,493 = 1\,825,6 \text{ candelas}$$

Estes valores dão uma melhor quantificação da distribuição de intensidades no feixe que o valor médio para todo o feixe obtido pelo cálculo anterior simplificado.

6.5. ILUMINAMENTO DE UMA SUPERFÍCIE

6.5.1. ILUMINAMENTO MÉDIO

Quando um fluxo luminoso incide numa superfície dizemos que ela está iluminada. O quanto ela está iluminada é dado pelo conceito de iluminamento, que é a quantidade de fluxo luminoso que atinge a superfície. Matematicamente temos:

$$\bar{E} = \Delta \phi_1 / \Delta S \quad (6.12)$$

onde:

\bar{E} = iluminamento médio na superfície ΔS , dado em lm/m^2 ou lux, símbolo lx.

$\Delta \phi_1$ = fluxo luminoso total incidindo na superfície.

A figura 6.10. ilustra um fluxo luminoso atingindo uma superfície, e notamos que neste conceito não há nada que distinga os raios luminosos quanto a origem ou direção. Além disso o fluxo total pode ser de mais de uma fonte, valendo o princípio da superposição.



Figura 6.10. Fluxo luminoso total atingindo a área ΔS .

O conceito de iluminamento independe do comprimento de onda da luz incidente e da sua direção. Assim um fluxo de 5 lm de luz verde ($\lambda = 550 \text{ nm}$) e um fluxo de 15 lm de luz vermelha ($\lambda = 700 \text{ nm}$), ambos incidindo com ângulos diferentes numa área de 10 m^2 , produzem um iluminamento médio nesta área de:

$$\bar{E} = \Delta \phi_1 / \Delta S = (5 + 15) / 10 = 2 \text{ lm}/\text{m}^2 = 2 \text{ lux}$$

6.5.2. ILUMINAMENTO NUM PONTO

O iluminamento num ponto (P) é obtido tomando-se uma pequena área ao redor do ponto considerado e levando-se a expressão 6.12. ao limite:

$$E_p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \bar{E} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} (\Delta \phi_1 / \Delta S) = d\phi_1 / dS \quad (6.13)$$

Se todos os pontos de uma área forem igualmente iluminados, a

área é dita sob iluminação uniforme e escrevemos:

$$\bar{E} = E_p = E \quad (6.14)$$

A tabela 6.3. apresenta alguns valores típicos de iluminação.

Tabela 6.3. Ordens de grandeza de iluminamentos ocorrentes em algumas situações típicas, com fluxo incidente numa superfície plana [11,19,20].

fonte ou modo de iluminação	E (lux = lm/m ²)
sol, num dia claro, no ponto de máximo iluminamento	~ 100 000 - 150 000
sol num dia nublado, sombrio	~ 10 000 - 50 000
interior próximo a janela	~ 1 000
mínimo recomendado para trabalho de certa precisão com luz artificial	~ 100
lunar de lua cheia	~ 0,2 - 0,3
luz das estrelas	~ 0,000 3

Desde que o fluxo luminoso seja caracterizado em lúmens o iluminamento independe do comprimento de onda da luz incidente. Todavia se o feixe luminoso for caracterizado pela sua energia radiante, então a inclusão do fator de luminosidade implica numa diferenciação de iluminamento originada da curva espectral de eficiência luminosa. Consideremos uma parede branca na qual incide a luz de dois faróis com luzes de cores distintas, cada um colocando na superfície uma densidade uniforme de fluxo radiante de 50 W/m². Os faróis iluminam regiões diferentes da parede com as cores amarelo (fator de luminosidade 0,765 6) e vermelho (fator de luminosidade 0,077 2). Os iluminamentos produzidos por cada cor seriam distintos e teriam os valores:

Temos: $E = \Delta\phi_l / \Delta S$ mas $\Delta\phi_l = e \Delta\phi_r = f \times 685 \times \Delta\phi_r$

Logo:

$$E(\text{amarela}) = 0,765\ 6 \times (685\ \text{lm/W}) \times (50\ \text{W/m}^2) = 26\ 221,8\ \text{lm/m}^2 = 26\ 222\ \text{lux}$$

$$E(\text{vermelha}) = 0,077\ 2 \times (685\ \text{lm/W}) \times (50\ \text{W/m}^2) = 2\ 644,1\ \text{lm/m}^2 = 2\ 644\ \text{lux}$$

Ou seja, a região iluminada pelo feixe amarelo tem iluminamento

cerca de dez vezes maior. Se os dois faróis incidissem simultaneamente na mesma região teríamos:

$$E(\text{total}) = 26\ 222 + 2\ 644 = 28\ 866 \text{ lux.}$$

O iluminamento se refere portanto a uma densidade superficial de fluxo luminoso, distinguindo-se de uma densidade superficial de fluxo radiante por meio do fator de luminosidade. Para uma lâmpada incandescente de 150 W com um globo leitoso que absorve 20% da energia que o atravessa, se admitirmos ser ela de luz amarela ($\lambda = 620 \text{ nm}$), as densidades superficiais de fluxos radiante e luminoso a uma distância de 2 m seriam as seguintes:

para uma esfera de raio 2 m em torno da lâmpada:

$$\text{área de esfera} = \Delta S = 4\pi R^2 = 4\pi \times 4 = 50,3 \text{ m}^2$$

densidade superficial de fluxo radiante:

$$\begin{aligned} &= 0,8 (\Delta\phi_r / \Delta S) = \\ &= 0,8 \times 150 / 50,3 = 2,38 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

densidade superficial de fluxo luminoso (= iluminamento = E):

$$E = \Delta\phi_l / \Delta S = e \times \Delta\phi_r / \Delta S = f \times 685 \times \Delta\phi_r / \Delta S$$

$$E = 0,35 \times 685 \times 0,8 \times 150 / 50,3 = 572 \text{ lux}$$

6.5.3. MEDIÇÃO DO ILUMINAMENTO

O iluminamento médio é uma grandeza de fácil medição e isto é um fato interessante por várias razões:

- o iluminamento pode ser convertido para outras grandezas mais difíceis de serem medidas diretamente, como a intensidade luminosa;
- muitas normas são especificadas em termos de níveis de iluminamento, o que permite uma boa descrição da distribuição da luz, facilita os cálculos de projeto e permite fácil checagem no local. É por isso que muitos países adotam este parâmetro nas suas normas de iluminação de minas.

Todavia especificações em termos de níveis de iluminamento, feitas em função da utilização de objetos e ambientes, não consideram como as superfícies refletem a luz e é a luz refletida que determina o que é visto.

Ao se fotografar minas subterrâneas com a mesma câmera fotográfica e flash, e portanto tendo-se aproximadamente os mesmos iluminamentos, os resultados podem ser muito distintos em função da refletância das superfícies. Três resultados bem diferentes ocorreriam numa mina de sal (como a da Petromisa em Sergipe), numa mina de calcáreo (como a mina do Baltar em Sorocaba) e numa mina de carvão (como a de Urussanga em Santa Catarina).

A medida do iluminamento é feita por instrumentos contendo células fotrônicas ou foto-elétricas, as quais contém materiais sensíveis a luz e que transformam a energia luminosa incidente em energia elétrica. Quando o fluxo radiante incide na superfície da célula ela produz uma corrente, porém a relação entre correntes produzidas por fluxos radiantes de diversos comprimentos de onda não é, infelizmente, a mesma que a relação das sensações subjetivas de brilho causadas no olho humano.

A maioria das células fotrônicas respondem ao fluxo infravermelho, gerando uma corrente que obviamente não é proporcional ao fluxo luminoso (pois este não existe nesta faixa do espectro). Todavia colocando-se à frente da célula filtros que absorvam adequadamente os diferentes comprimentos de onda, pode-se fazer com que a curva de resposta da célula concorde razoavelmente com a curva do olho humano. Neste caso a corrente gerada pode ser tomada como uma medida do fluxo luminoso que nela incide, e se a célula for uniformemente iluminada, a corrente gerada é proporcional ao fluxo luminoso incidente por unidade de área.

6.6. LUMINANCIA E PERCEPÇÃO DE BRILHO

Uma fonte puntiforme é caracterizada por sua intensidade luminosa (I), e para a maioria dos projetos pode-se considerar como aproximadamente puntiformes as velas, os lampiões e as lâmpadas incandescentes. Com o advento de bulbos foscos, de quebra-luzes difusores, de lâmpadas fluorescentes e de iluminação indireta, a maioria das fontes deixou de poder ser considerada puntiforme. O conceito de intensidade luminosa de uma fonte puntual é então estendido para o conceito de luminância de uma superfície.

A luminância média de uma superfície, simbolizada por \bar{L} , é definida como o quociente entre a intensidade luminosa e a área projetada da superfície de onde vem a luz como mostra a figura 6.11.

$$\bar{L} = I / A_{proj} = I / A \cos \theta \quad (6.15)$$

A partir dos parâmetros geométricos associados a definição de luminância podemos concluir que:

- a. a luminância é uma grandeza direcional; variando-se o ponto de observação a luminância varia tanto em função do ângulo θ como também porque a superfície pode emitir mais luz em certas direções.
- b. a luminância independe do motivo pelo qual a luz sai da superfície; pode-se ter uma área emitente como a superfície de uma lâmpada, uma área refletora como um talude ou mesmo áreas transmissoras como as superfícies de lentes e luminárias.
- c. quanto maior a área mais se aplica o conceito de luminância média; quanto menor a área mais se tende para o valor da luminância pontual.
- d. no sistema internacional de unidades a luminância é expressa em candelas por metro quadrado (cd/m²) ou nit (nt).

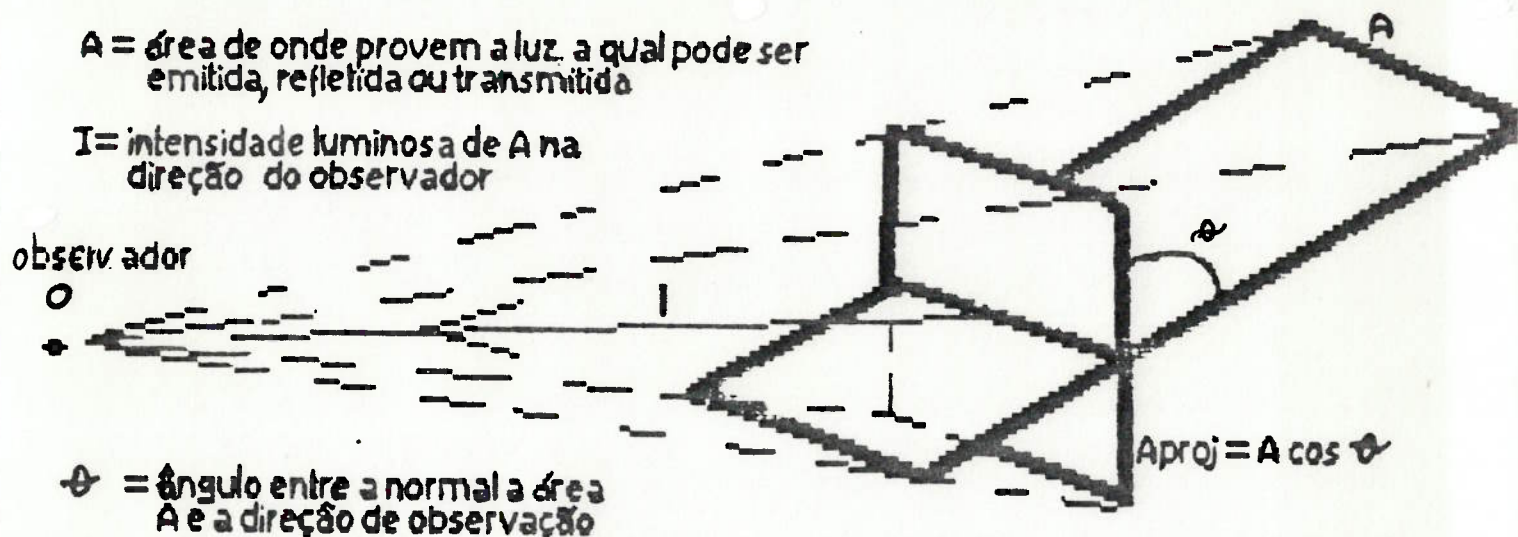


Figura 6.11. Conceito de luminância de uma superfície de área A na direção do observador O .

As fontes extensas são caracterizadas por sua luminância, sejam elas fontes primárias ou secundárias de luz. Ao ser lida, esta página se encontra praticamente sob iluminação uniforme, e como as letras impressas refletem menos luz elas parecem menos brilhantes que o papel branco. Portanto apesar do iluminamento ser uniforme a luminância desta página não o é. A tabela 6.4. apresenta alguns valores médios relativos a algumas fontes extensas comuns.

Em geral a luminância de uma superfície depende da direção da qual é observada, existindo superfícies perfeitamente difusas para as quais a luminância é a mesma de qualquer ponto que se a observe. Para estas superfícies, denominadas de difusores perfeitos ou superfícies Lambertianas, a luminância pode ser expressa em outra unidade que não cd/m^2 . Este aspecto será discutido pormenorizadamente no item 7.5.

São ótimas superfícies difusoras a neve nova e muito fofa, uma parede pintada com tinta branca e o óxido de magnésio. Para elas podemos fazer a aproximação de difusor perfeito, pois sua luminância é praticamente a mesma qualquer que seja a direção de observação.

O conceito de luminância é importante em projetos de iluminação porque é uma grandeza física que se correlaciona com a percepção subjetiva de "brilho".

Tabela 6.4. Luminâncias médias em candelas por metro quadrado ou nit [4,8,11,20].

superfícies	luminância (nt)
disco do Sol	1,65 a $2 \times 10 \exp(9)$
cratera de um arco	$150 \times 10 \exp(6)$
filamento de tungstênio a 2 700 K	$10 \times 10 \exp(6)$
filamento de lâmpada elétrica	$5 \times 10 \exp(6)$

FONTE PADRÃO (solidificação da platina a 2 042 K)	600 000

papel branco sob luz solar	25 000
lâmpada fluorescente	6 000
chama de vela	5 000
disco da Lua cheia	2 900 a 5 000
céu azul claro	3 200 a 4 000
papel branco sob iluminação normal para leitura	20
papel branco ao luar	0,03

A simplicidade da equação 6.15. encobre uma série de considerações importantes que podem não serem percebidas, e vamos analisa-la com maior detalhe variando isoladamente os seguintes fatores: a intensidade I , a área A , a distância de observação e a direção de observação.

A. Variação apenas da intensidade luminosa

Seja uma lâmpada incandescente para a qual se tenha um controlador da sua intensidade luminosa; a medida que se diminui a intensidade diminui também a sensação de brilho que se percebe nas superfícies pela equação 6.15. também diminui a luminância.

B. Variação apenas da área

Sejam dez velas iguais, distribuídas em $10 \times 10 \text{ cm}^2$ numa situação e distribuídas em outra situação em uma área de 1 m^2 . Se as observarmos de uma distância fixa (como 30 m), em ambos os casos temos a mesma intensidade porque a quantidade total de lumens emitidos é aproximadamente igual. Todavia a sensação de brilho é maior para a área menor e pela equação 6.15 o mesmo ocorre com a luminância (devido ao denominador da equação).

C. Variação apenas da distância de observação

Observemos uma parede de 6 m² às distâncias de 5 e 10 m; ao nos afastarmos da parede ela parecerá menor mas não sua luminância pois a percepção de brilho permanece inalterada. Isto é expresso na equação 6.15. pela independência da distância.

D. Variação apenas da direção de observação

Nem sempre as superfícies emissoras (ou refletoras ou transmissoras) distribuem seu fluxo uniformemente pelo espaço, de modo que a intensidade pode variar com a direção de observação. Além disso, a área projetada varia com o ângulo de observação. Por causa desta dupla influência não se pode tirar conclusões gerais, podendo-se apenas afirmar que a direção de observação é um parâmetro influente que deve ser estudado em cada caso particular.

Das considerações anteriores pode-se perceber que existe uma correlação entre luminância e percepção de brilho, mas que esta correlação não é absoluta. Ela é válida apenas quando se tem as mesmas condições de observação visual, o que pode ser ilustrado do seguinte modo. Se olharmos para vários objetos sob um mesmo nível de iluminação de fundo, poderemos ordená-los segundo nossa percepção de brilho. Esta ordenação coincidiria com aquela que seria obtida se medíssemos experimentalmente as luminâncias. Por outro lado, se observarmos uma lanterna de capacete mineiro numa galeria sem iluminação de rede e em um dia claro, ela não parecerá tão brilhante na superfície mas sua luminância é a mesma nos dois locais. O que acontece é que os estados de adaptação do olho humano aos níveis de iluminação em subsolo e a céu aberto são distintos, ocorrendo portanto uma alteração da correlação entre percepção de brilho e luminância.

6.7. REFLETÂNCIA

A refletância é uma medida da eficiência de uma superfície em devolver a luz incidente; se for nula toda a luz é absorvida e se for unitária toda luz é refletida.

Um espelho praticamente reflete toda a luz incidente e sua refletância pode ser considerada para fins práticos como unitária. O chamado corpo negro perfeito (radiador integral) absorve toda a radiação que nele incide e tem então uma refletância nula. Uma boa aproximação deste corpo negro pode ser obtida com um orifício numa caixa pintada de preto por dentro, pois praticamente toda luz que entra pelo orifício não sai mais.

O conceito astrofísico de "buraco negro" tem também associado uma "refletância" nula, pois toda matéria e energia que nele penetram não saem mais devido ao altíssimo campo gravitacional. Portanto nos não "veríamos" um buraco negro apenas reconheceríamos seu contorno.

Bons projetos de iluminação mineira requerem o conhecimento da refletância do ambiente porque nós vemos é através da luz refletida, e em geral nas minas a maior parte da luz incidente é absorvida. A quantificação da luz refletida torna possível que se compense as perdas por absorção, e esta compensação pode ser efetuada pelo sistema de iluminação ou pela alteração da

superfície refletora.

Didaticamente podemos classificar a reflexão superficial em seis tipos principais: especular, especular com difusão preferencial, especular com espalhamento, difusão perfeita, difusão com componente especular e difusão com espalhamento. Esta nomenclatura é ilustrada na figura 6.12. onde se apresenta também os correspondentes termos em inglês apesar de não existir uma terminologia rigidamente definida a respeito.

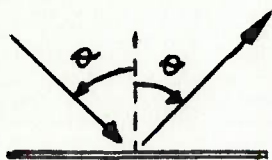
Os diagramas da figura 6.12. são muito simplificados pois ilustram apenas um raio incidente, enquanto que na realidade poderíamos ter um cone de luz incidente ou ela poderia provir de todas as direções. Além disso poderíamos estar medindo toda a luz refletida, ou uma parte dela numa dada direção ou ainda apenas um feixe de raios.

Na literatura não há concordância absoluta quanto aos tipos de reflexão encontradas em minas subterrâneas. Trotter [4,7] afirma que na maioria das minas secas as superfícies são difusoras com componente especular, enquanto que para superfícies poeirentas e pulverulentas a reflexão se aproximaria da difusão perfeita. Já Crooks e Peay [15] afirmam que a maioria das rochas e minerais quando secos são difusores perfeitos; quando úmidos a maior parte se tornaria difusora com espalhamento e uma pequena parte se tornaria difuso-especular. Esta última seria potencialmente a mais provável causadora de ofuscamento, e portanto a umidade é um fator gerador de ofuscamento principalmente se as superfícies estiverem bem úmidas e intensamente iluminadas.

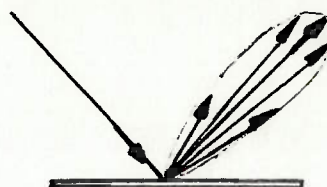
As tabelas 6.5. e 6.6. contém dados de refletância levantados por Trotter [4,31], podendo-se observar que a refletância do carvão é bem baixa estando em geral na faixa de 3 a 6%.

Pela tabela 6.6. conclui-se imediatamente ser mais fácil iluminar uma face numa mina de magnesita do que numa mina de carvão, mas na realidade não existe um parâmetro único que caracterize completamente a refletância de uma superfície. Para as situações onde se tenha disposições geométricas padrões é normalmente aceitável que um único número defina a reflexão de paredes e carpetes. Mas em minas subterrâneas a situação é muito mais complexa e nem sempre um só número descreve razoavelmente a distribuição espacial da luz. Esta distribuição espacial é denominada de goniorefletância e para rochas e minerais ela depende do ângulo de incidência, do ângulo de observação, da presença de pó e de água, e de características da superfície e da luz incidente.

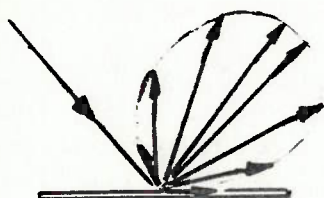
A figura 6.13. mostra alguns dados de goniorefletância obtidos por Crooks e Peay para dolomito seco e úmido e esfalerita [15]. Enquanto que para o dolomito a faixa de variação é pequena (relação 2:1), para outras rochas como xisto pode-se alcançar relações da ordem de 10:1. Eles afirmam também que a água causa uma diminuição da goniorefletância de 25 a 50% para a maioria dos ângulos de observação.



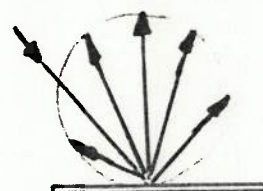
a. especular; obtida por espelho ou superfície metálica bem polida.



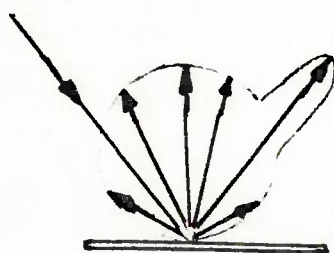
b. especular com difusão preferencial; é especular com pequena componente de difusão. Exemplo são tintas "brilhantes" e "semi-brilhantes".



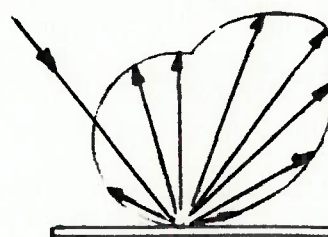
c. especular com espalhamento ("specular and spread").



d. difusão perfeita ("matte diffuse"); exemplos são cal, gunita, tintas foscas e a neve fofa.



e. difusão com componente especular; por exemplo a superfície polida de carvão.



f. difusão com espalhamento ("diffuse-spread").

Figura 6.12. Tipos básicos de reflexão superficial. As superfícies difusoras não são lisas mas sim "ásperas", e podem ser usadas para melhorar visualmente o ambiente quanto ao problema de oruscamento. Notemos que no caso de difusão perfeita temos em realidade uma esfera, aqui representada por uma circunferência no plano do papel. Fatores como textura da superfície e comprimento de onda também influenciam a refletância [6].

Tabela 6.5. Refletâncias obtidas em minas de carvão canadenses, próximas a Sydney na Nova Escócia [31].

mina	método de lavra	refletância	d.p.*	condições gerais
Prince, parede 1-E	frente ampla e frente curta, em reco	0,058	0,005	superfície seca, limpa, áspera, acabamento não visível
# 26	frente ampla em avanço	0,042	0,011	superfície seca, limpa, lisa, acabamento bem visível e defi- nido
Lingam	frente ampla em avanço	0,035	0,011	superfície seca ou úmida, limpa, muito ou pouco pó
Prince parede 2-E	frente ampla e curta, em reco	0,043	0,009	superfície úmida e empoeirada, áspera, acama- mento não visível

* d.p. representa o desvio-padrão

Tabela 6.6. Faixas de variação para a refletância, medida em 15 minas subterrâneas canadenses [31].

refletância (%)									
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
***** cortiça									
***** borracha									
***** cimento velho									
***** cimento limpo									
***** concreto projetado limpo									
***** madeira serrada									
***** cal branca desbotada									
***** plástico									
***** cal branca virgem									

Tabela 6.6. Continuação

refletancia (%)										
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
fita refletora *****										
+++++++ quartzo-diorito										
+++++++ clorita-xisto										
+++++++ biotita-xisto										
+++++++ ardósia										
+++++++ xisto										
+++++++ serpentina										
+++++++ calcáreo										
+++++++ arenito calcáreo										
##### carvão										
##### esfalerita										
##### calco-pirita oxidada										
##### pentlantita-pirrotita oxidada										
##### pirita										
##### talco cinza										
##### gipsum										
##### calco-pirita fresca										
##### pentlantita-pirrotita fresca										
##### talco branco										
##### magnesita										

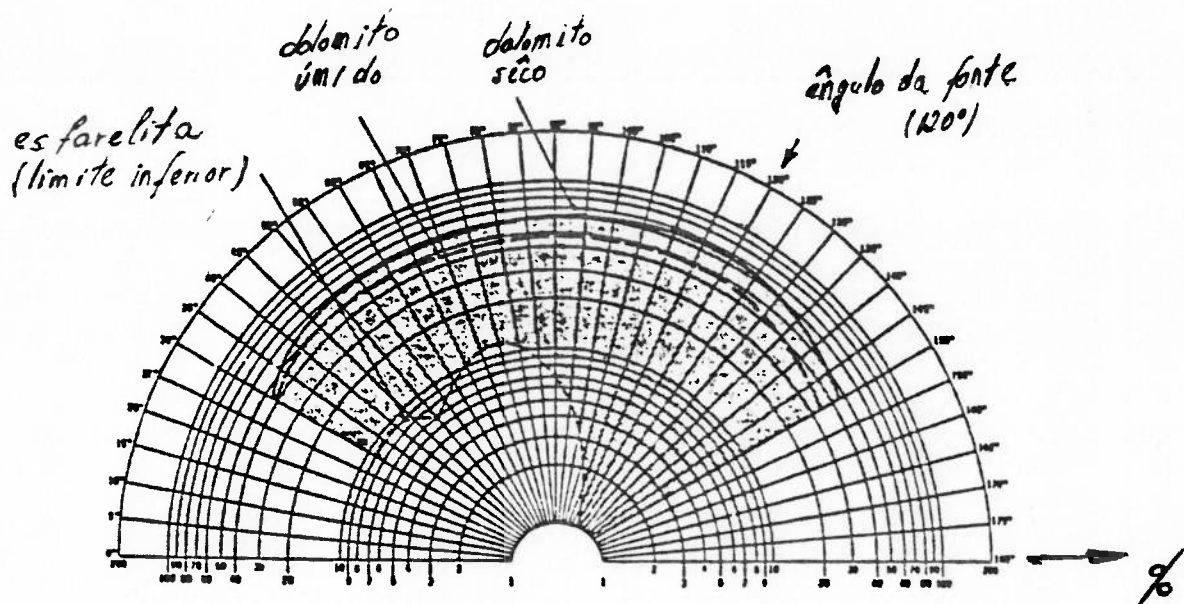


Figura 6.13. Goniorefletância média das faces de uma mina obtida por Crooks e Peay [15].

6.8. RELAÇÃO ENTRE AS DEFINIÇÕES DE FLUXO E INTENSIDADE LUMINOSOS

As grandezas fluxo luminoso (Φ) e intensidade luminosa (I) são interdependentes, podendo-se admitir qualquer uma delas como fundamental e obter a outra como grandeza derivada. Por relações geométricas pode-se então obter as demais grandezas fotométricas.

Seja a fonte padrão ilustrada na figura 6.4, onde o fluxo luminoso emitido é uma boa aproximação da radiação do corpo negro, e depende da área da abertura e do tamanho do cone (ou seja do ângulo sólido). Por definição "um lúmen é o fluxo luminoso emitido por uma área de $(1/60)$ do cm^2 , feita numa fonte padrão, e contido no interior de um ângulo sólido de 1 esterorradiano". O conceito de lúmen é portanto análogo ao conceito de watt, sendo uma unidade de potência específica para energia luminosa.

Definido o lúmen, a unidade de intensidade luminosa denominada candela fica definida como: "uma candela é a intensidade luminosa de uma fonte puntual que emite um fluxo luminoso de um lúmen no interior de um ângulo sólido de 1 esterorradiano". A intensidade está associada a noção de direção através do ângulo sólido e matematicamente temos:

$$I = d\Phi / d\Omega$$

(6.3)

Alternativamente pode-se considerar a intensidade luminosa como grandeza fundamental, e a partir dela derivar as demais unidades. Neste caso por definição "uma candela é a intensidade luminosa de uma área de (1/60) do cm² de um radiador perfeito (fonte padrão), o qual esteja operando a temperatura de solidificação da platina". Definida a candela, o lúmen fica sendo "o fluxo emitido no interior de um ângulo sólido por uma fonte puntual de intensidade 1 candela".

O lúmen poderia ser definido também a partir da curva espectral de eficiência luminosa. Neste caso como 1 watt de luz verde de comprimento de onda de 555 nm produz um fluxo luminoso de 685 lúmens, o lúmen seria a potência de (1/685) watt do fluxo radiante de comprimento de onda 555 nm. Ou seja, o lúmen é a potência de um fluxo radiante de 0,00146 W e de comprimento de onda de 555 nm. Desta última definição fica claro que o lúmen é uma unidade de potência, isto é, é a quantidade de energia luminosa transportada na unidade de tempo.

6.9. ILUMINAMENTO, LEIS DO COSSENO E A LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTANCIA

Com os conceitos já vistos vamos apresentar duas "leis" muito úteis em projetos de iluminação; a primeira é a lei do cosseno (associada a iluminação) e a segunda é a lei do inverso do quadrado da distância (associada a iluminação e intensidade luminosa).

6.9.1. LEI DO COSSENO

Seja a figura 6.14.a. onde um feixe de raios paralelos atinge perpendicularmente a superfície A₁. O iluminamento médio sobre A₁ é:

$$E(A_1) = \phi_1 / A_1$$

Seja agora a figura 6.14.b. onde o mesmo feixe luminoso atinge a área A₂, maior que A₁ e inclinada de um ângulo θ com relação a esta. O iluminamento médio sobre A₂ é:

$$E(A_2) = \phi_1 / A_2$$

As áreas A₁ e A₂ não iguais mas são relacionadas entre si por:

$$A_1 = A_2 \cos\theta$$

Logo:

$$E(A_2) = \phi_1/A_2 = \phi_1/(A_1/\cos\theta) = (\phi_1/A_1) \cos\theta = E(A_1) \cos\theta$$

Finalmente a expressão matemática da lei do cosseno é:

$$E(A_2) = E(A_1) \cos\theta \quad (6.16)$$

Se $\theta = 0^\circ$	então	$E(A_2) = E(A_1)$
Se $\theta = 45^\circ$	então	$E(A_2) = 0,707 E(A_1)$
Se $\theta = 90^\circ$	então	$E(A_2) = 0$

A lei do cosseno mostra que para um mesmo feixe incidente, o iluminamento da superfície varia cossenoidalmente com o ângulo entre o raio incidente e a normal a superfície. Ela reflete um aumento da área iluminada pela mesma quantidade de fluxo. Apesar da dedução da lei do cosseno ter sido feita para iluminamento médio ela é igualmente válida para iluminamento puntual. Ou seja:

$$E(P_2) = E(P_1) \cos\theta \quad (6.17)$$

onde: $E(P_2) = (d\phi/dA_2)$, $E(P_1) = (d\phi/dA_1)$

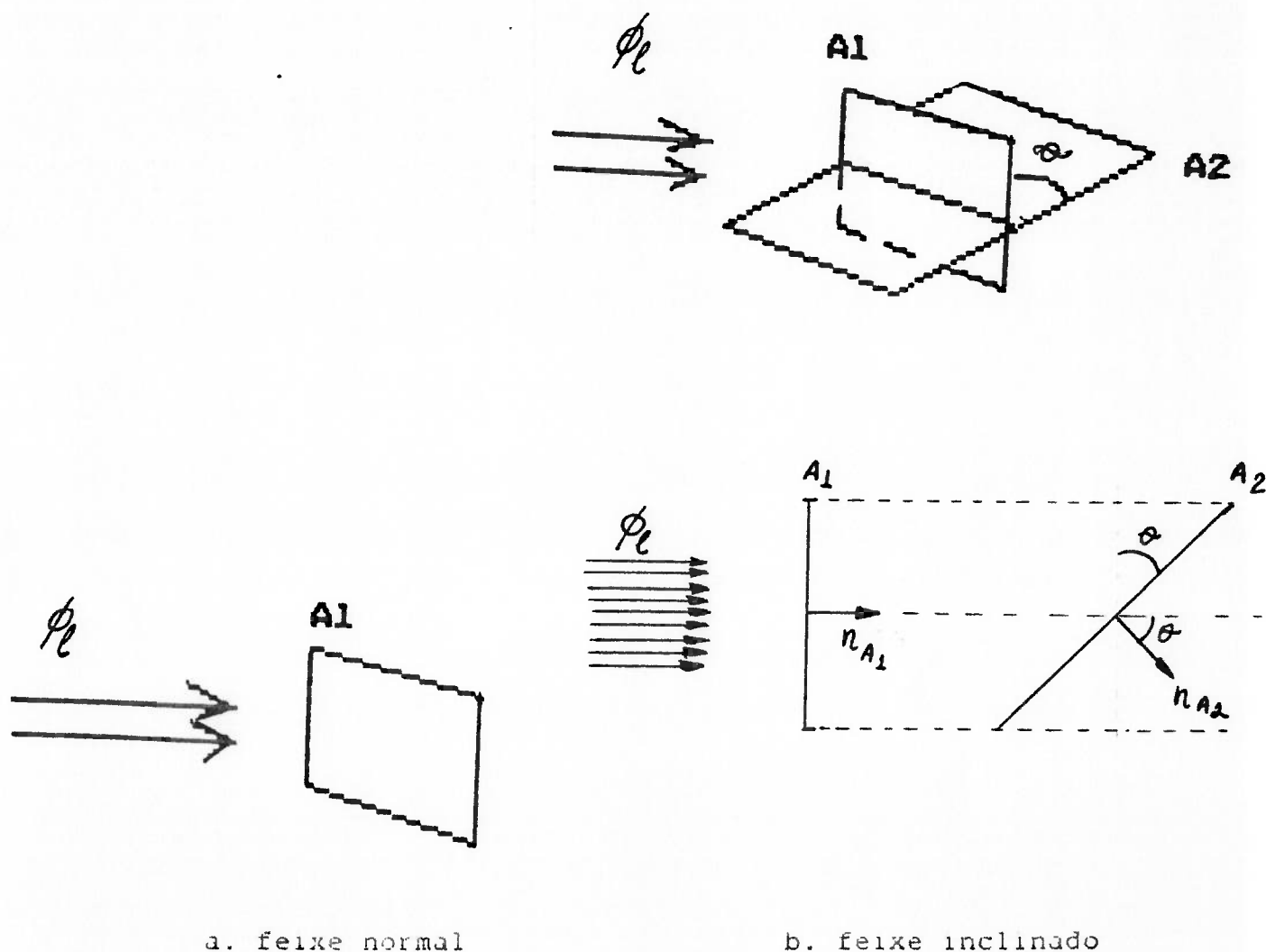


Figura 6.14. Iluminamentos causados por um mesmo feixe sobre duas superfícies planas inclinadas entre si de θ .

6.9.2. LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTANCIA

Um problema comum em projetos de iluminação é a determinação do iluminamento de superfícies localizadas a várias distâncias da fonte. A figura 6.15. mostra uma fonte puntual F, de intensidade I e emitindo fluxo num ângulo sólido. As áreas A1 e A2 estão sobre superfícies esféricas centradas em F e cujos raios são R1 e R2.

O fluxo no ângulo sólido é:

$$\phi_1 = \int I \, d\Omega = I \int d\Omega = I \Omega$$

Os iluminamentos em A1 e A2 são:

$$\begin{aligned} E(A1) &= \phi_1 / A1 \\ E(A2) &= \phi_1 / A2 \end{aligned}$$

Portanto:

$$\begin{aligned} E(A1) &= I \Omega / A1 \\ E(A2) &= I \Omega / A2 \end{aligned}$$

Pela definição de ângulo sólido:

$$\Omega = A1/R1^2 = A2/R2^2$$

$$\text{Ou: } A1 = \Omega R1^2 \quad \text{e} \quad A2 = \Omega R2^2$$

$$\text{Então: } E(A1) = I \Omega / \Omega R1^2 \quad \text{e} \quad E(A2) = I \Omega / \Omega R2^2$$

Finalmente:

$$E(A1) = I / R1^2 \quad (6.18.a)$$

$$E(A2) = I / R2^2 \quad (6.18.b)$$

Estas relações entre intensidade da fonte puntual, iluminamento da superfície perpendicular ao feixe e distância a fonte definem a chamada lei do inverso do quadrado da distância. Muitas vezes falamos no iluminamento num "ponto", e implicitamente estamos nos referindo ao iluminamento em torno do ponto P que está situado a distância Rp da fonte luminosa. Esta vizinhança do ponto P é suposta normal a direção dos raios incidentes, como mostra a figura 6.16.

O iluminamento num ponto P é dado por:

$$E(P) = I / Rp^2 \quad (6.18.c)$$

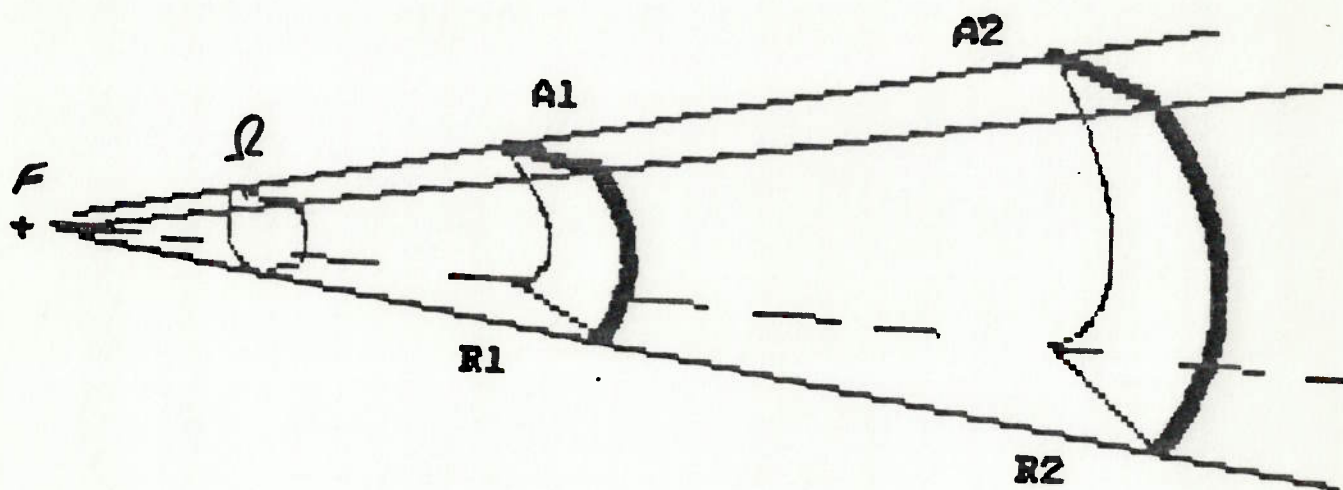


Figura 6.15. Superfícies esféricas $A1$ e $A2$ distantes $R1$ e $R2$ da fonte pontual F . Ambas subentendem o mesmo ângulo sólido, e são "normais" aos raios luminosos.

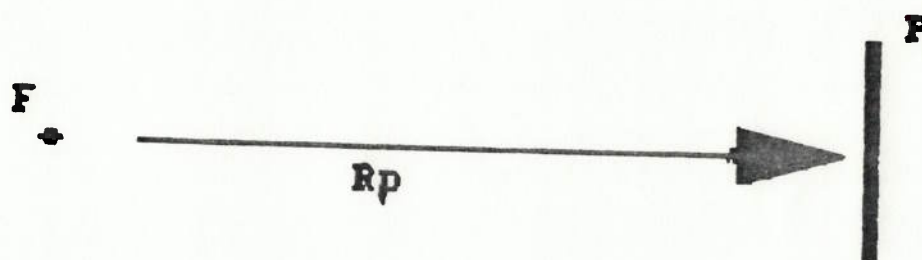


Figura 6.16. Iluminamento num ponto P distante R_p da fonte F . Entorno de P é normal aos raios luminosos.

Na dedução das três expressões (6.18) sempre admitimos que as superfícies eram normais a direção dos raios luminosos. Quando isto não ocorre lançamos mão da lei do cosseno obtendo-se:

$$E(A, \theta) = I \cos^2 \theta / R^2 \quad (6.19.a)$$

onde:

$E(A, \theta)$ = iluminamento na superfície A cuja normal faz um ângulo θ com a direção do feixe

A expressão (6.19.a) é visualizada geometricamente na figura 6.17.

Se considerarmos um ponto P numa superfície inclinada o iluminamento no seu entorno é dado pela expressão (6.19.b), a qual é semelhante a expressão (6.19.a).

$$E(P, \theta) = I \cos^2 \theta / R^2 \quad (6.19.b)$$

Quando temos fontes pontuais é preciso cuidado na aplicação da lei do cosseno. Ela é válida para elementos de área dA com mostra a figura 6.18. mas não pode ser aplicada diretamente para áreas finitas.

Devemos observar também que na dedução admitimos que a fonte era puntiforme e a maioria das fontes reais não o é. Todavia a lei pode ser aplicada com erro desprezível se a distância entre a fonte e a superfície iluminada for maior que cinco vezes a máxima dimensão da fonte. Assim a lei do inverso do quadrado da distância pode ser aplicada na maioria dos casos práticos em que não se tenha por exemplo lâmpadas fluorescentes tubulares longas.

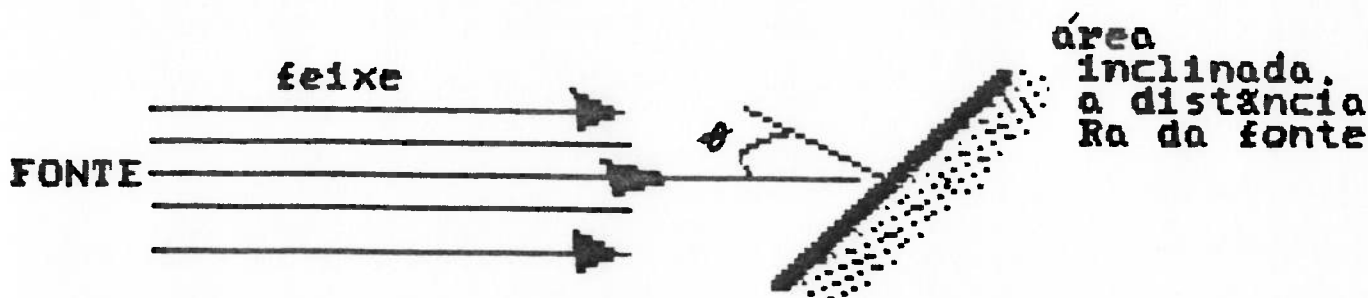


Figura 6.17. Iluminamento numa área A inclinada de um ângulo θ com relação a direção dos raios luminosos.

6.9.3. LEI DO COSSENO AO CUBO

A denominada lei do cosseno ao cubo é muito utilizada em projetos de iluminação de minas na metodologia "ponto a ponto". Consideremos a figura 6.19. onde tem-se uma galeria subterrânea

de altura h e que é iluminada por fontes pontuais distribuídas ao longo do eixo do teto.

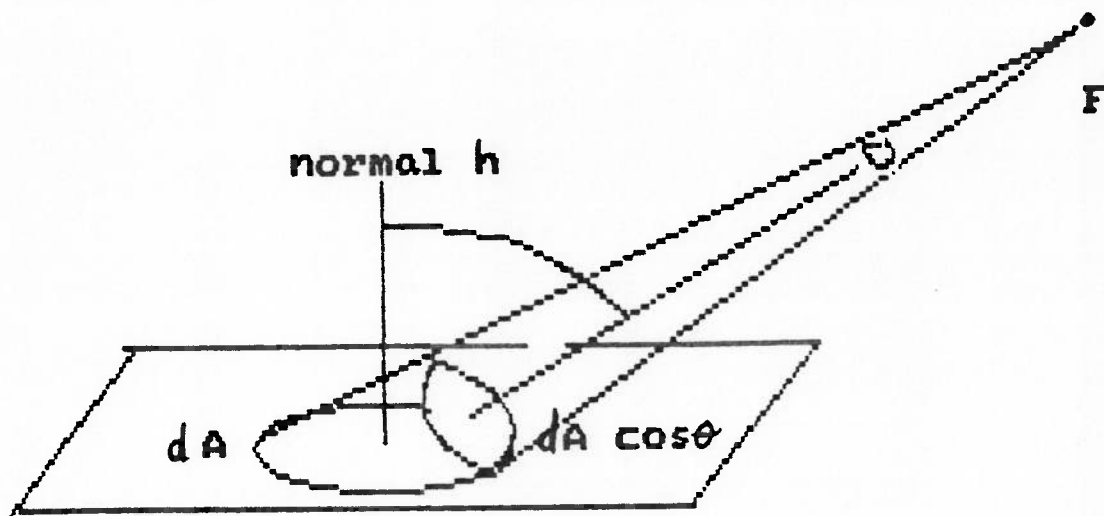


Figura 6.18. Iluminamento no elemento de área dA inclinado do ângulo θ com relação a direção do feixe contido no ângulo sólido.

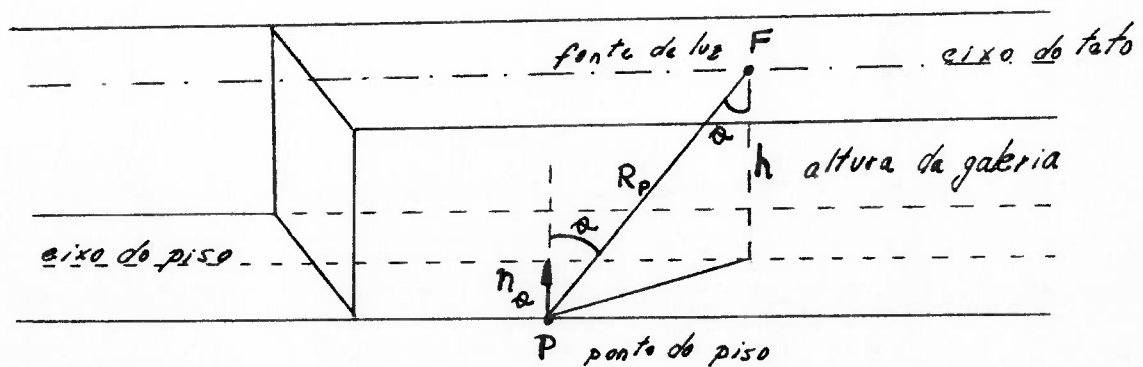


Figura 6.19. Galeria com fontes pontuais localizadas ao longo do eixo do teto.

Para uma pequena área contendo o ponto P no piso e que seja normal ao raio luminoso o iluminamento é dado por:

$$E(P,n) = I(\theta) / R_p^2 \quad (6.20)$$

onde: $E(P,n)$ = iluminamento no ponto P para a superfície normal ao raio luminoso;

$I(\theta)$ = intensidade luminosa da fonte segundo o ângulo θ ;

R_p = distância entre a fonte e o ponto P.

A expressão (6.20.) representa a lei do inverso do quadrado da distância já definida pela expressão (6.18.c) anterior. Todavia o que se objetiva é obter o iluminamento numa área do piso da galeria, ou seja, para uma área contendo o ponto P mas com normal n_0 . Pela lei do cosseno temos:

$$E(P,n_0) = E(P,n) \cos \theta$$

Portanto:

$$E(P,n_0) = I(\theta) \cos \theta / R_p^2 \quad (6.21)$$

Da geometria podemos escrever:

$$h / R_p = \cos \theta \quad \text{ou} \quad R_p^2 = h^2 / \cos^2 \theta$$

Substituindo em (6.21):

$$E(P,n_0) = I(\theta) \cos^3 \theta / h^2 \quad (6.22)$$

A expressão (6.22) é conhecida como a "lei do cosseno ao cubo" e sua utilização na mineração é feita nas seguintes etapas:

- da geometria se obtém h;
- de curvas ou tabelas se obtém a intensidade $I(\theta)$ para o ângulo θ ;
- por (6.22) se estima o iluminamento no ponto P associado a uma fonte.

6.10. SÍNTESE DAS GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS

A tabela 6.7. resume as principais grandezas fotométricas discutidas, bem como seus símbolos, definições e unidades.

A figura 6.20. resume as grandezas da tabela 6.7 mostrando as associações geométricas entre elas.

Tabela 6.7. Principais grandezas fotométricas.

grandezas	símbolo	unidade	definição
fluxo radiante	ϕ_r	watt (W)	energia radiante transportada na unidade de tempo (potência)
fluxo luminoso	ϕ_l	lúmem (lm)	porção do fluxo radiante capaz de provocar sensação visual
intensidade luminosa de fonte puntual	I	candela (cd)	quantidade de fluxo luminoso emitido por unidade de ângulo sólido; grandeza adequada para descrever como uma fonte distribui a luz no espaço que a rodeia. Depende da direção de observação mas não da distância.
iluminamento de uma superfície	E	lux (lx) ou lm/m ²	quantidade de fluxo luminoso incidindo numa superfície, independentemente de direção (*)
luminância	L	nit (nt) ou cd/m ²	quantidade de fluxo luminoso emitida por uma superfície em direção a um dado ponto de observação; independe da distância de observação (**)

(*) grandeza fotométrica de fácil medição e da qual se pode obter outras grandezas mais difíceis de serem medidas; muitas especificações de projeto estão em nível de iluminamento. A unidade americana candela-pé ("foot-candle") representa o fluxo incidente em um pé quadrado, ou seja: 1 fc = 10,76 lx.

(**) grandeza fotométrica mensurável e que se correlaciona entre outras coisas com a percepção subjetiva de brilho de uma superfície.

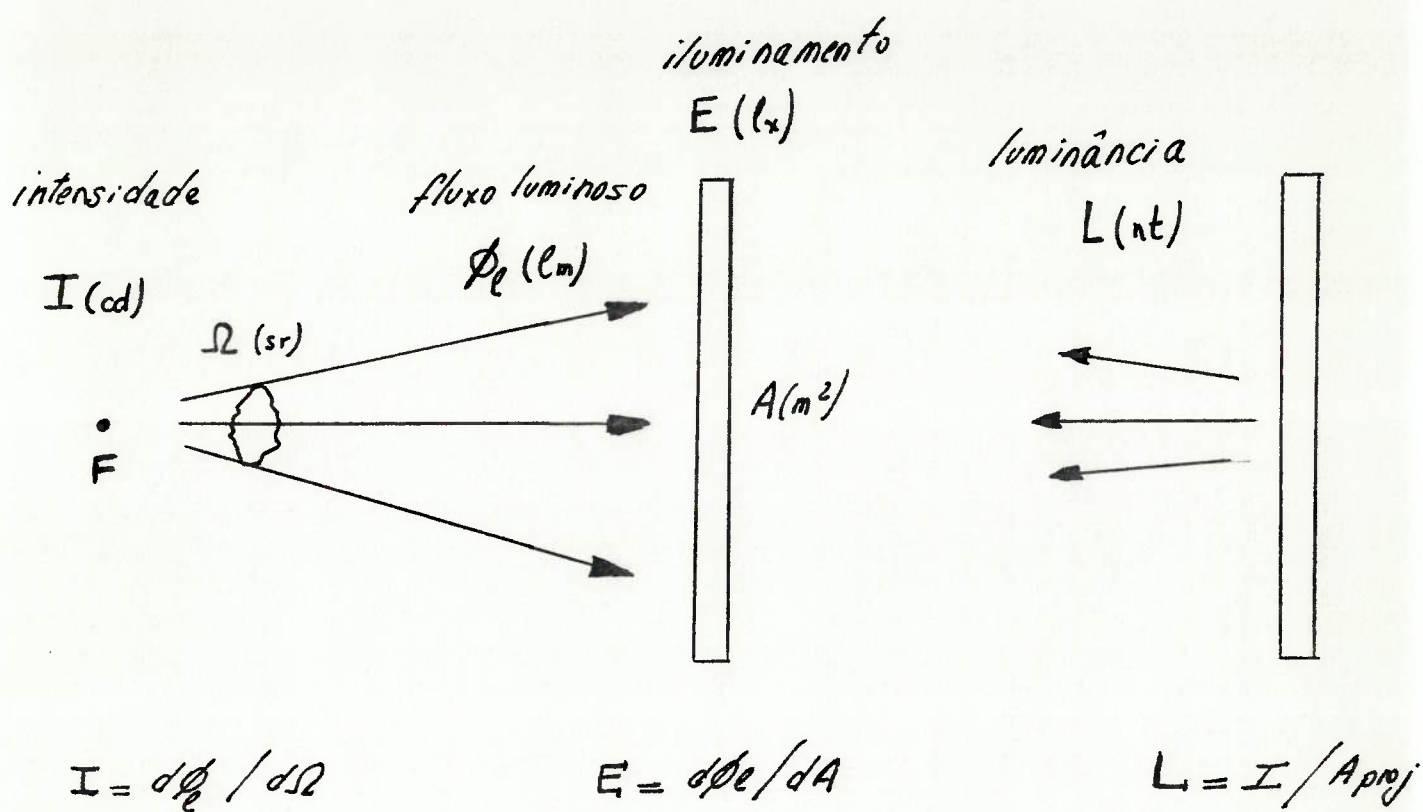


Figura 6.20. Relação entre intensidade, fluxo, iluminamento e luminância.

7. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA LUZ EMITIDA

Nos projetos de iluminação é importante se conhecer como uma fonte luminosa distribui no espaço a seu redor o fluxo que ela emite. A caracterização desta distribuição pode ser feita de vários modos, sendo os mais comuns aqueles que utilizam as chamadas curvas de intensidade luminosa e curvas de isoiluminamento.

7.1. CURVAS DE INTENSIDADE LUMINOSA

É o modo mais comum de se apresentar dados de lâmpadas e luminárias, e consiste basicamente num gráfico da intensidade num plano que contém a fonte. A figura 7.1. ilustra uma curva de intensidade para uma fonte pontual semelhante a uma lâmpada incandescente e podemos notar que ela exprime uma função do tipo:

$$I = I(\theta) \quad (7.1)$$

Portanto curvas de intensidade luminosa são convenientemente apresentadas nas coordenadas polares (I, θ) , e estão associadas a um dado plano que contém a fonte. A completa distribuição espacial de intensidades requer que se conheça as curvas para diversos planos, podendo-se construir a superfície de intensidade luminosa a qual chamaremos de "intensidoide". Em alguns casos de simetria uma única curva de intensidade luminosa seria suficiente para caracterizar o "intensidoide".

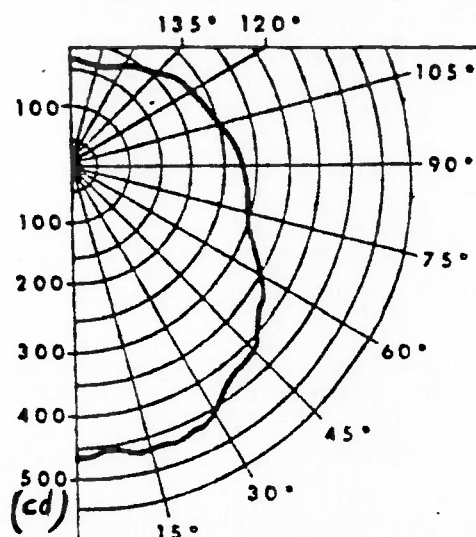


Figura 7.1. Curva de intensidade luminosa para fonte pontual semelhante a lâmpada incandescente comum [6]. Esta curva é para um dado plano contendo a fonte e outros planos poderão apresentar outras curvas.

Uma lâmpada incandescente pode ter um "intensidoide" caracterizado por uma única curva de intensidade, mas lâmpadas fluorescentes tubulares não tem a simetria necessária.

Devido a relação entre intensidade e iluminamento dada pela lei do inverso do quadrado da distância, curvas de intensidade luminosa permitem se caracterizar a capacidade de iluminamento em várias direções. Quanto maior a intensidade numa dada direção, maior a capacidade da fonte em iluminar superfícies nesta direção. Assim curvas de intensidade luminosa podem ser obtidas a partir de medidas de iluminamento em varios pontos e do uso da lei do inverso do quadrado da distância.

A figura 7.2. apresenta uma situação típica onde se efetuou medidas de iluminamento para um holofote mineiro, e a partir das quais se construiu a curva de intensidade luminosa mostrada na figura 7.3. Os cálculos intermediarios e a metodologia utilizadas estão detalhados no Anexo P.

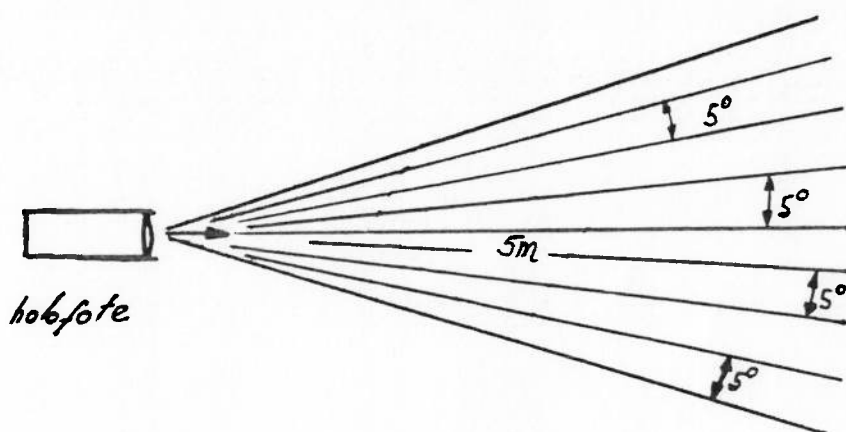


Figura 7.2. Vista em planta de um holofote para o qual foram efetuadas medidas de iluminamento a 5 m de distância a intervalos angulares de 5 graus.

Admitamos que um holofote idêntico ao da figura 7.2. esteja montado num minerador contínuo de carvão que se encontra a 3 metros da face de extração e para a qual queremos determinar os níveis de iluminamento em diversos pontos como ilustra a figura 7.4. Utilizando as leis do cosseno e do inverso do quadrado da distância pode-se obter os níveis de iluminamento na face. Estes níveis são apresentados nas figuras 7.5. e 7.6. e os cálculos efetuados estão detalhados no Anexo Q. Se o holofote estivesse não a 3 metros da face mas a 6 ou 12 metros então as curvas de iluminamento para os 3 casos seriam as apresentadas na figura 7.8. Os cálculos correspondentes se encontram no Anexo R.

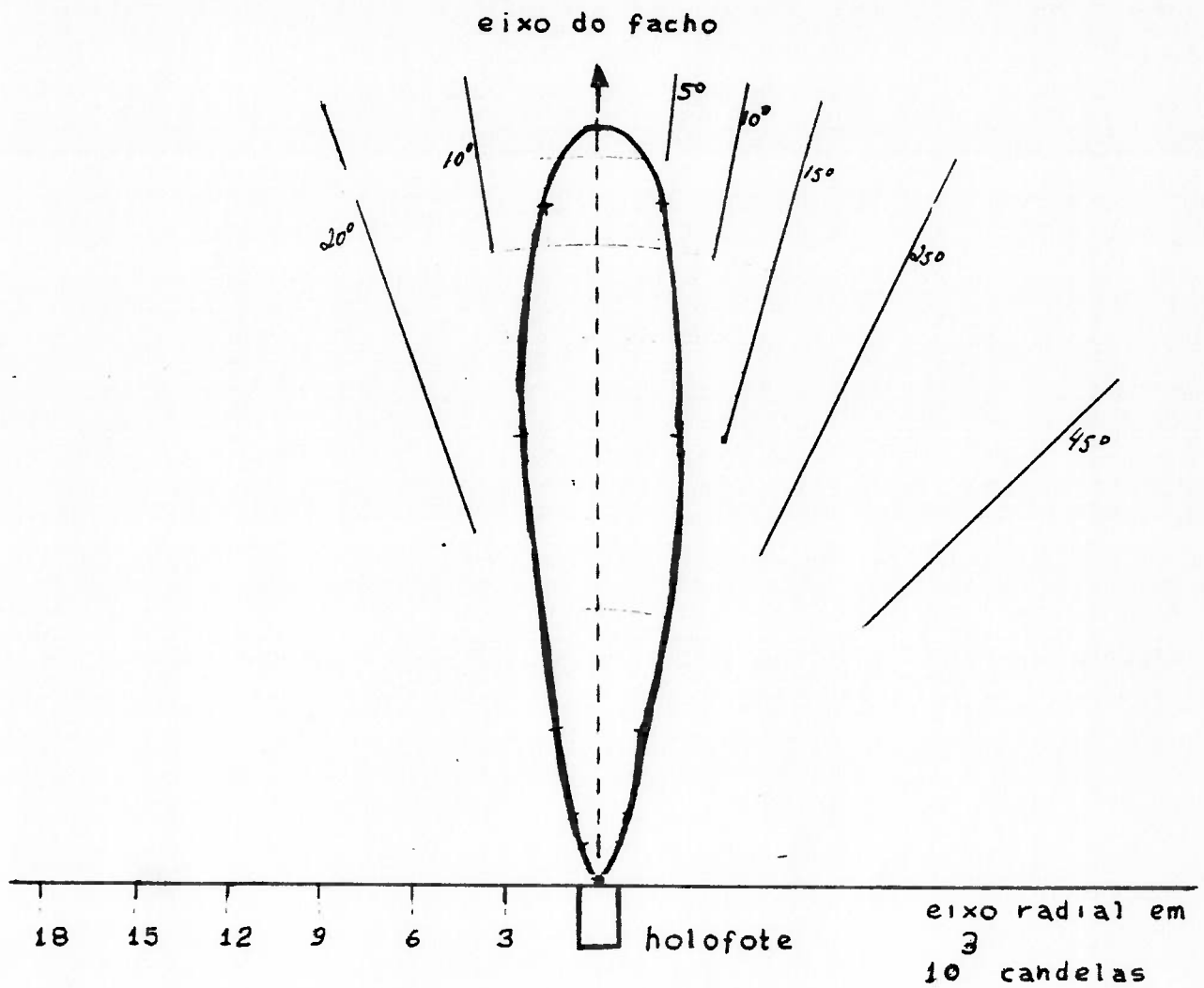


Figura 7.3. Curva de intensidade luminosa para plano horizontal contendo a fonte de luz de um holofote.

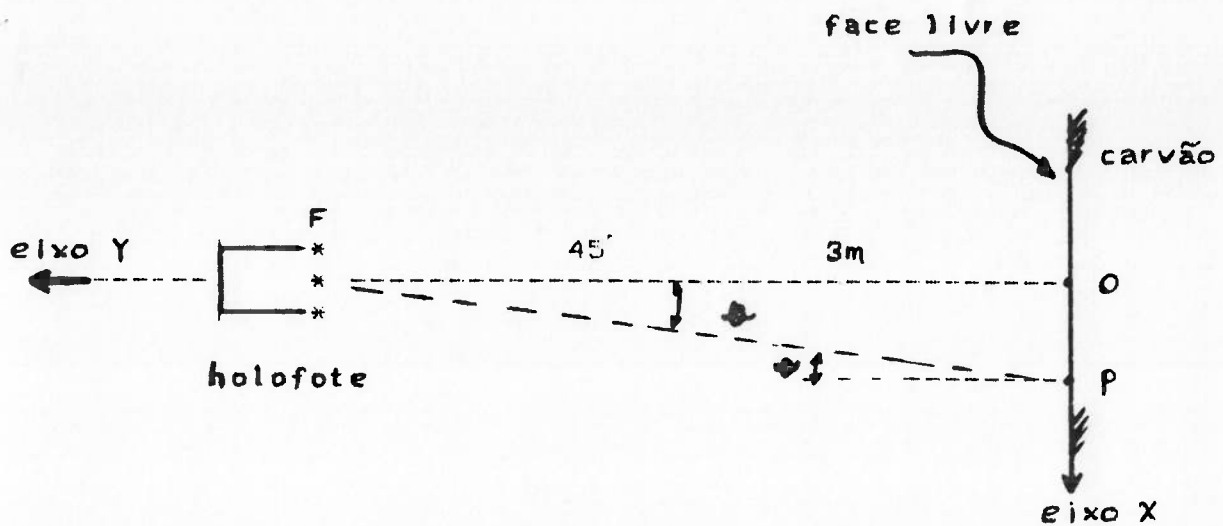


Figura 7.4. Vista em planta de holofote iluminando a face livre de carvão.

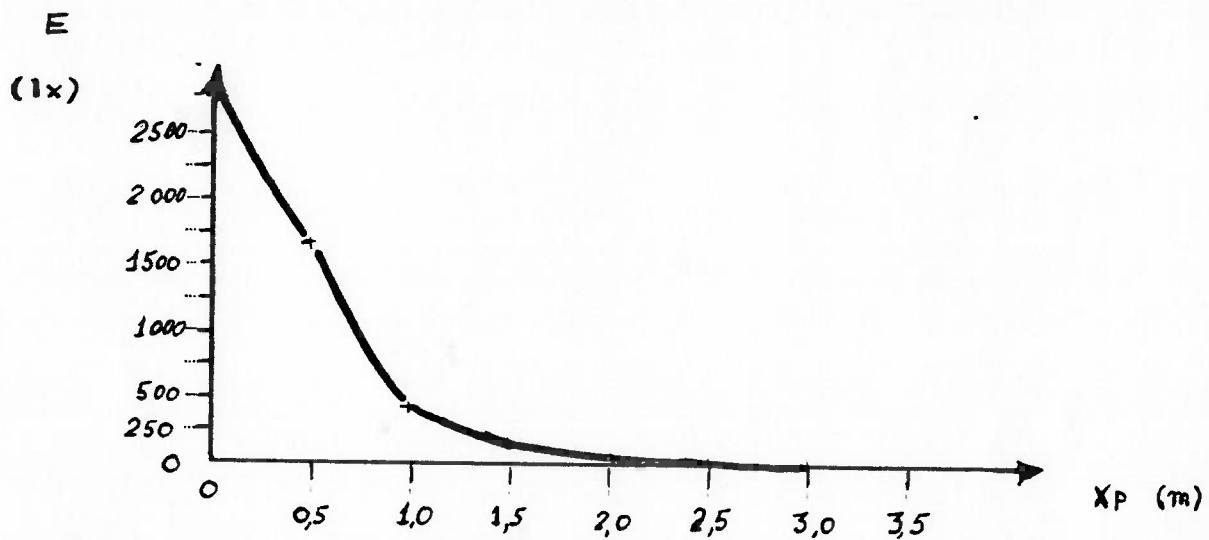


Figura 7.5. Iluminamento na face a várias distâncias do eixo do feixe, para plano horizontal.

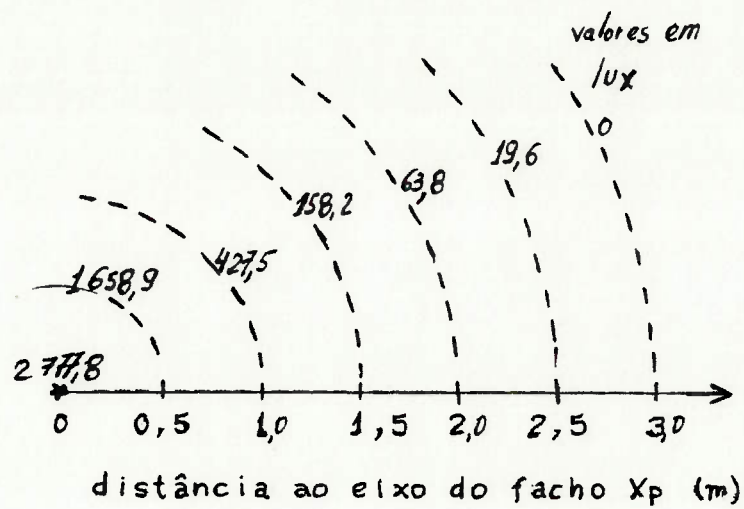


Figura 7.6. Circunferências concêntricas de isoiluminância na face livre. O eixo do fecho é perpendicular ao papel e contém o ponto 0.

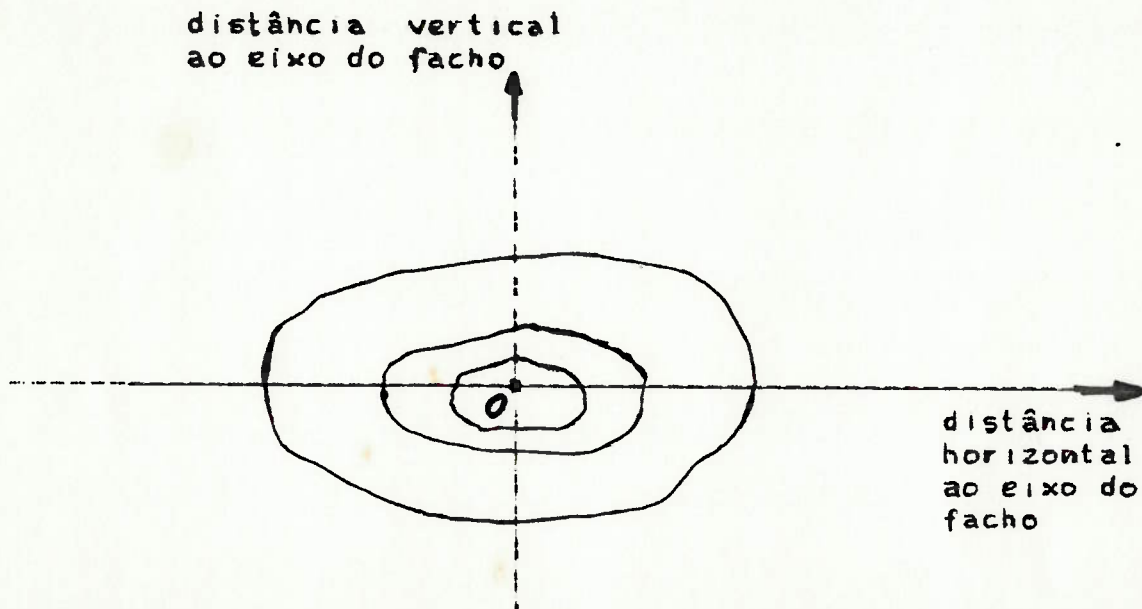


Figura 7.7. Possíveis curvas de isoiluminância para fonte que não distribui luz simetricamente no espaço. O eixo do fecho é perpendicular ao plano do papel e contém o ponto 0.

Se a fonte luminosa não distribuir luz simetricamente no espaço que a rodeia teremos que utilizar curvas de intensidade luminosa para outros planos que contém a fonte. Por exemplo utilizando-se planos verticais e inclinados de 45 graus e repetindo para cada um deles os cálculos efetuados, poderemos obter pontos que unidos em vez de circunferências forneçam curvas como as ilustradas na figura 7.7.

A análise da figura 7.8. mostra que:

- quanto maior a distância da face maior a área iluminada;
- quanto maior a distância menor o pico de iluminamento;
- quanto maior a distância mais uniforme se torna o iluminamento da face.

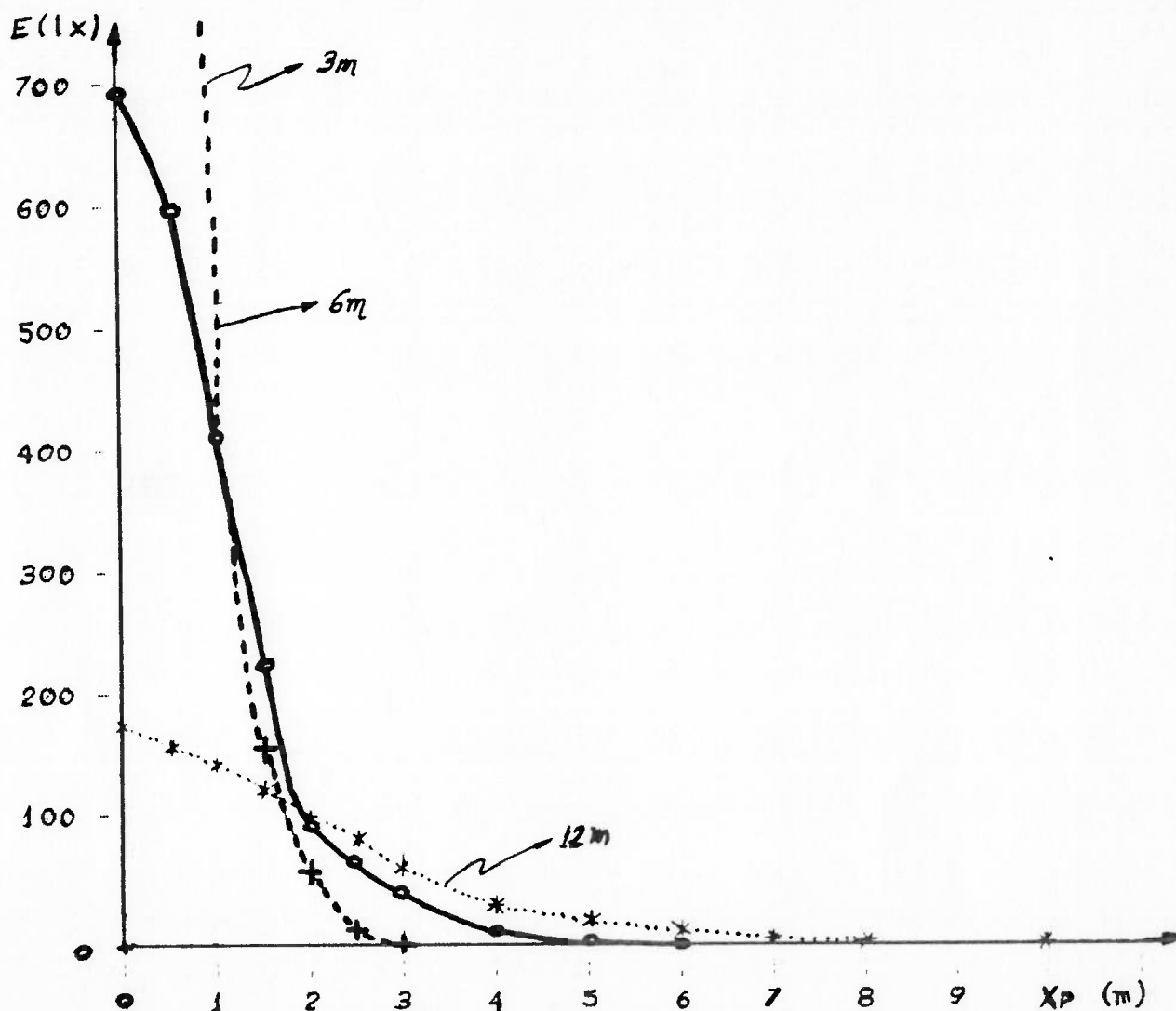


Figura 7.8. Distribuições do iluminamento em faces distantes 3, 6 e 12 m da fonte luminosa. O eixo do fecho contém o ponto 0 e é perpendicular ao plano do papel.

7.2. CURVAS DE ISOILUMINAMENTO

A figura 7.6. apresenta curvas de isoiluminamento na face de carvão, mas podemos também obter curvas de isoiluminamento ao redor da fonte luminosa. Neste caso uma curva de isoiluminamento mostraria quais pontos ao redor de uma fonte luminosa atingiriam um dado nível de iluminamento. Enquanto que uma curva de intensidade luminosa é expressa em coordenadas polares (I, θ) , uma curva de isoiluminamento é expressa em coordenadas polares (R, θ) .

A construção de uma curva de isoiluminamento a partir de uma curva de intensidade luminosa é efetuada com detalhes no Anexo S, utilizando-se primordialmente da lei do inverso do quadrado da distância. A figura 7.9. apresenta as curvas de isoiluminamento correspondentes ao holofote considerado nas figuras 7.4., 7.5., 7.6. e 7.8.

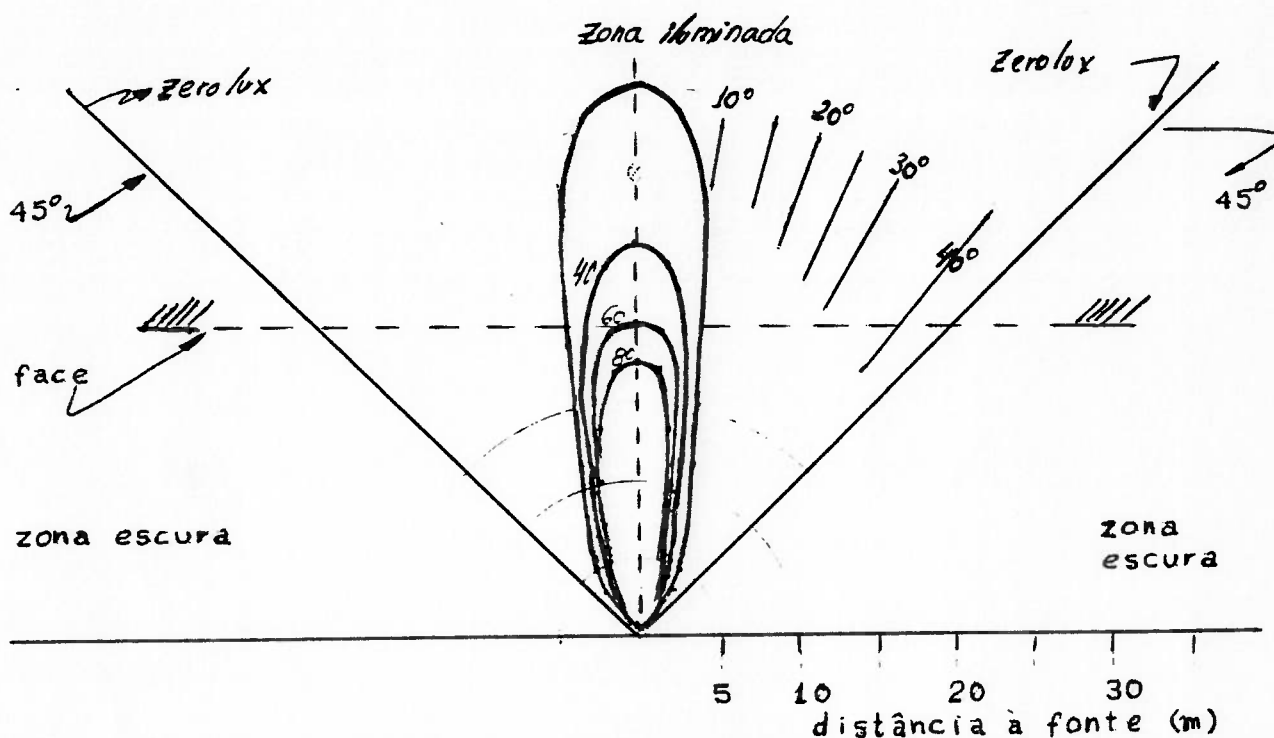


Figura 7.9. Curvas de isoiluminamento para holofote onde se utiliza coordenadas polares (R, θ) .

7.3. CURVAS DE INTENSIDADE E LUMINANCIA MÉDIAS

Muitas vezes lâmpadas e luminárias podem ser tratadas como fontes pontuais mas outras vezes tem de ser tratadas como fontes extensas. Neste último caso em vez de intensidade usamos o conceito de luminância, a qual depende da direção de observação mas não da distância como já foi discutido. Com a curva de intensidade luminosa e as dimensões da fonte podemos estimar a

luminância média de uma fonte extensa quando observada de um dado ponto. Estas estimativas são importantes em análises de ofuscamento e conforto visual em projetos de iluminação de minas.

Consideremos novamente um holofote de veículo mineiro com as mesmas características da figura 7.4. Admitamos que ele seja um farol dianteiro e possua lente de 10 cm de diâmetro. Observemos este farol dos pontos P e Q afastados 5 e 25 graus do eixo do fecho como mostra a figura 7.10, e calculemos a sua luminância para estes pontos de observação.

As intensidades da fonte vista de P e Q são respectivamente 22 500 e 1 250 candelas (obtidas da curva de intensidade luminosa). A luminância média é por definição:

$$\bar{L} = I / A_{\text{proj}} = I / A \cos\theta$$

Como :

$$A = (\pi D^2) / 4 = \pi \times 100 / 4 = 78,53 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

As áreas projetadas são:

$$A_{\text{proj}}(P) = A \cos 5 = 78,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{\text{proj}}(Q) = A \cos 25 = 73,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Então:

$$\bar{L}(P) = 22\,500 / (78,54 \times 10^{-4}) = 2\,865 \text{ kcd/m}^2$$

$$\bar{L}(Q) = 1\,250 / (73,8 \times 10^{-4}) = 169,4 \text{ kcd/m}^2$$

Vimos anteriormente que medidas de iluminamento efetuadas em ambientes de baixa refletância podiam ser usadas em conjunção com a lei do inverso do quadrado da distância para se construir curvas de intensidade luminosa. No caso de minas de carvão, as paredes normalmente tem baixíssima refletância e a intensidade ou luminância pode ser calculada a partir de medidas diretas de iluminamento.

Consideremos uma mina de carvão lavrada em pilar e salão, onde a medida do iluminamento num pilar a 4 metros de uma luminária forneceu o valor de 30 lux. Se a área da luminária projetada na direção do pilar for de 100 centímetros quadrados, a luminância média desta luminária quando observada do pilar pode ser estimada pela seguinte metodologia:

para uma superfície normal ao raio de luz:

$$E = I(\theta) / R^2$$

Logo:

$$\bar{L} = I(\theta) / A_{\text{proj}} = I(\theta) / A \cos\theta = E \times R^2 / A \cos\theta$$

$$\bar{L} = (30 \times 4^2) / 100 \times 10^{-4} = 48\,000 \text{ cd/m}^2$$

Ou seja a luminância desta luminária quando observada do pilar de sustentação é de 48 kilocandelas.

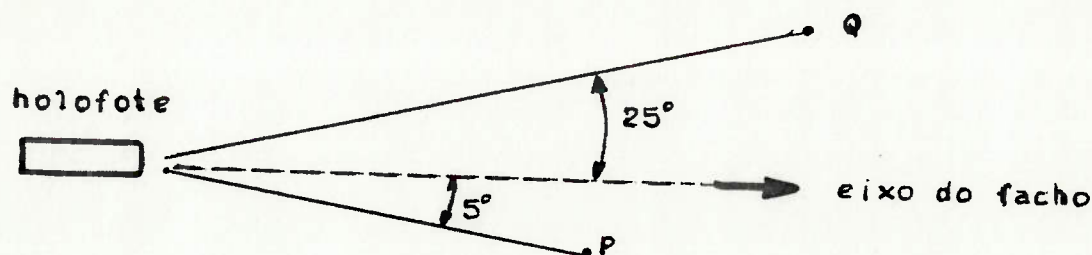


Figura 7.10. Pontos de observação de uma fonte luminosa extensa.

7.4. EMISSORES, TRANSMISSORES E REFLETORES PERFEITAMENTE DIFUSOS

Consideremos uma pequena superfície plana A que emite, reflete ou transmite luz e é observada do ponto P como mostra a figura 7.11.a. A luminância desta superfície com relação ao ângulo de observação ϕ , formado pela normal a A e a direção de observação, é dada por:

$$L(\phi) = I(\phi) / A_{\text{proj}}$$

Recordamos com a figura 7.11.b. que:

$$A_{\text{proj}} = A \cos \phi$$

Logo:

$$L(\phi) = I(\phi) / A \cos \phi \quad (L(\phi) \text{ em cd/m}^2) \quad (7.2)$$

Se a superfície A for perfeitamente difusa (figura 7.12) a variação da intensidade com a direção de observação é dada por:

$$I(\phi) = I_{\text{max}} \cos \phi \quad (7.3)$$

Colocando (7.3) em (7.2) obtemos:

$$L(\phi) = (I_{\text{max}} \cos \phi) / (A \cos \phi)$$

Ou:

$$L(\phi) = I_{\text{max}} / A = \text{constante} \quad (7.4)$$

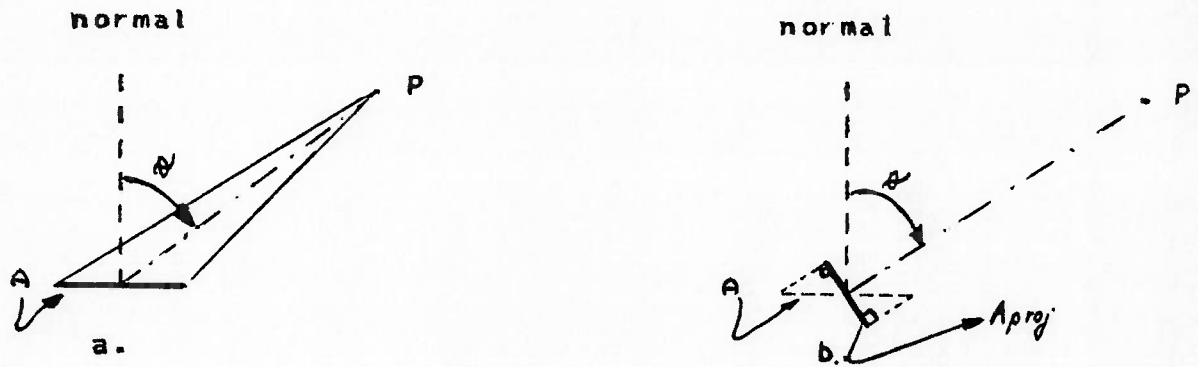


Figura 7.11. Em a. temos o ponto de observação P; em b. temos a projeção da área A na direção de observação.

Portanto para uma pequena superfície difusora perfeita a sua luminância é constante para qualquer ângulo de observação. Para superfícies que não sejam difusoras perfeitas esta propriedade não é válida.

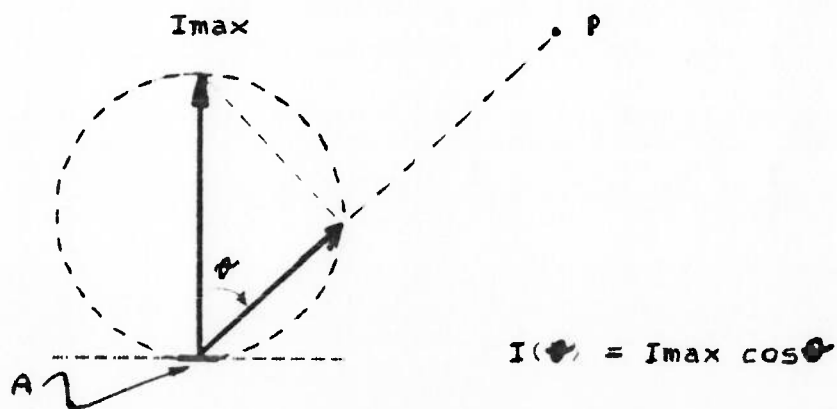


Figura 7.12. Relação entre ângulo de observação θ e intensidade segundo a direção de θ para superfícies perfeitamente difusoras.

Boas aproximações de difusores perfeitos são a neve nova e fofa, o óxido de magnésio e uma parede pintada com tinta fosca. O carvão tem uma componente especular na sua reflexão mas devido ao fato das superfícies de clivagem não estarem bem orientadas, ele pode ser considerado como uma superfície difusora, hipótese adotada para a maioria dos cálculos práticos.

7.5. SUPERFÍCIES LAMBERTIANAS E AS UNIDADES DE LUMINÂNCIA

As superfícies difusoras perfeitas são também denominadas de superfícies Lambertianas, conceito que é muito importante por exemplo na computação gráfica para a quantificação da iluminação e do sombreamento de objetos tridimensionais [55,56].

Para as superfícies difusoras perfeitas existe uma relação entre a luminância e a quantidade total de lúmens emitidos por unidade de área. É esta relação que permite que muitos autores usem a unidade lux em vez de nit para a luminância de difusores perfeitos, existindo inclusive unidades específicas (do sistema internacional ou não) para superfícies refletoras como o Lambert e o "footLambert".

A dedução desta relação envolve essencialmente as definições de intensidade, luminância, ângulo sólido e integral dupla e é apresentada a seguir pois não a encontramos nos textos consultados. A sua dedução explícita nos foi motivada pelo fato de no texto do Bureau of Mines [6] a expressão final se apresentar com um fator π colocado de forma invertida, em oposição ao encontrado em varios outros textos.

Na figura 7.13. A é uma pequena área de um difusor perfeito caracterizada pelo "intensidoide" esférico de diâmetro máximo I_{max} , e dS uma calota esférica infinitesimal na superfície do "intensidoide".

Da definição de intensidade luminosa:

$$I = d\phi / d\Omega \quad \text{-----} \quad d\phi = I d\Omega$$

onde $d\Omega$ é o ângulo sólido definido pela superfície dS e mostrado na figura 7.14. Assim:

$$d\Omega = dS \cos\theta / R^2$$

O fluxo total de lúmens emitidos por A é dado pela integral dupla:

$$\phi = \iint_S d\phi = \iint_S I d\Omega = \iint_S (I_{max} \cos\theta) dS \cos\theta / R^2$$

Ou seja:

$$\phi = \iint_S I_{max} \cos^2\theta dS / R^2 \quad (7.5)$$

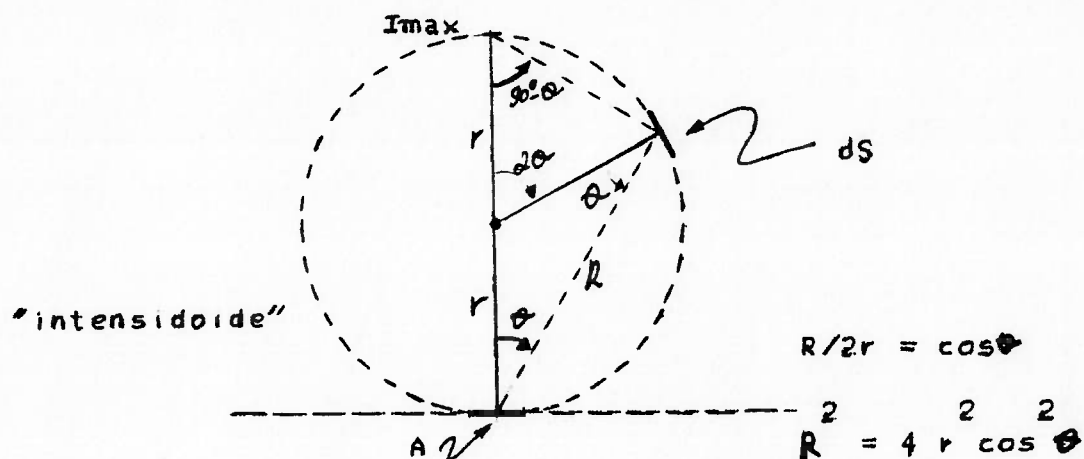


Figura 7.13. Relações geométricas no "intensidoide" associado a superfície difusora perfeita A; dS é uma calota esférica infinitesimal sobre o "intensidoide".

Para avaliar a integral (7.5) vamos utilizar coordenadas esféricas (r, φ, ψ) e portanto vamos expressar todos os parâmetros do integrando nestas coordenadas. Comparando as figuras 7.13. e 7.15. temos:

$$\psi = 2\phi \quad \text{ou} \quad \phi = \psi/2$$

Assim:

$$\phi_1 = I_{\max} \iint_S \cos^2(\psi/2) dS / 4r^2 \cos^2(\psi/2)$$

Substituindo dS no integrando obtemos:

$$\phi_1 = (I_{\max} / 4) \iint_S \sin \psi d\psi d\phi$$

Colocando-se os limites de integração:

$$\phi_1 = (I_{\max} / 4) \left| \int_0^{\pi} \sin \psi d\psi \right| \left| \int_0^{2\pi} d\phi \right| =$$

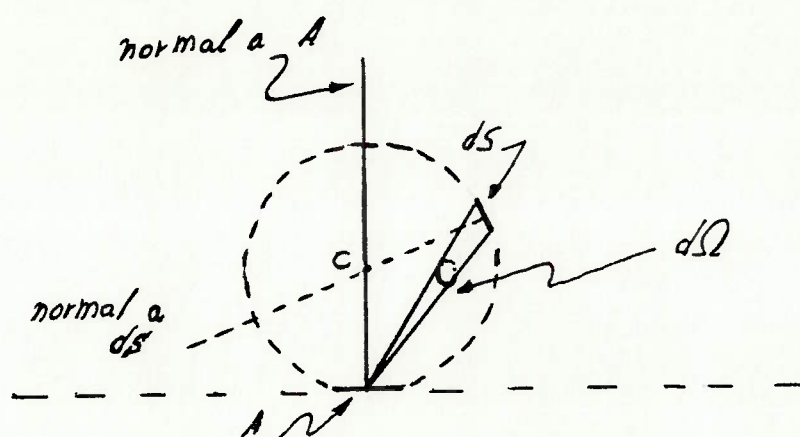


Figura 7.14. Ângulo sólido no "intensidoide" definido pela área infinitesimal dS . O raio do intensidoide é r .

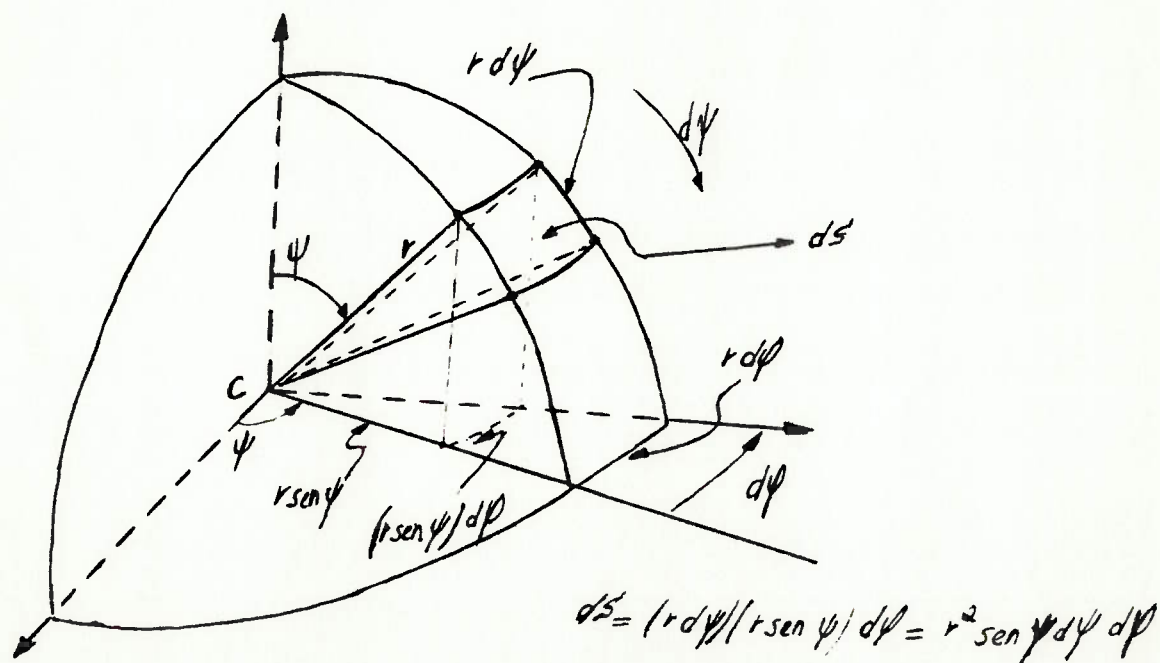


Figura 7.15. Área infinitesimal dS expressa em coordenadas esféricas (r, ϕ, ψ) .

Portanto:

$$\phi_l = (I_{\max} / 2) \pi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \, d(\cos \theta) =$$

$$\phi_l = - (\pi / 2) \times I_{\max} \times [\cos \theta]_0^{\pi/2} = \pi I_{\max}$$

Portanto o fluxo total emitido pela pequena área A, que é uma perfeita difusora, é π vezes a máxima intensidade. Se dividirmos este fluxo total pela área A temos:

$$\phi_l / A = \pi \times I_{\max} / A$$

Mas por (7.4) sabemos que (I_{\max} / A) é a luminância desta superfície. Finalmente obtemos:

$$\phi_l / A = \pi L \quad (7.6)$$

A luminância L é expressa em candelas por metro quadrado ou nit, e então o lado direito de (7.6) tem como unidades cd/m² ou nt. O lado esquerdo de (7.6) tem como unidade lúmens por metro quadrado ou lux, e ambos os lados exprimem a luminância de um difusor perfeito.

Para a luminância expressa em nit usamos o símbolo L e para a luminância expressa em lux usamos o símbolo L'. Ressaltamos que apenas difusores perfeitos podem ter sua luminância expressa em lux e que a relação numérica entre os valores da luminância expressos em lux e em nit é:

$$L'(\text{em lux}) = \pi L(\text{em nit}) \quad (7.7)$$

Esta relação constante entre luminância e lúmens por unidade de área, válida para difusores perfeitos, permite que se use para medir luminância um instrumento fotoelétrico semelhante a um medidor de iluminamento.



Figura 7.16. Casos recomendado (a) e não recomendado (b) de de cálculo de luminancia através de medida de iluminamento.

Esta técnica é plausível desde que o instrumento fique com seu campo de medida totalmente tomado pela área cuja luminância se quer medir. Assim este procedimento não é muito recomendado para objetos pequenos mas para a mineração, onde se tem pilares, paredes e tetos de dimensões relativamente grandes, ela é aplicável. A figura 7.16. ilustra estas considerações.

7.6. RELAÇÃO ENTRE LUMINANCIA E REFLETÂNCIA

Definimos refletância r como o quociente entre a quantidade de luz refletida e a quantidade de luz incidente numa dada área. Ou seja, a refletância é definida pelo quociente entre lúmens que saem por unidade de área e lúmens incidentes. Para refletores perfeitamente difusos a quantidade de lux que sai define a luminância L' , enquanto que a quantidade de lux incidente define o iluminamento E , tendo-se a relação:

$$r = L' / E \quad \text{ou} \quad L' = r E \quad (7.8)$$

$$\begin{array}{ccc} & / & \backslash \\ & \text{lux refletidos} & \text{lux incidentes} \end{array}$$

A expressão (7.8) é importante porque permite que se calcule o iluminamento que se deve fornecer a um ambiente desde que se conheça o nível desejado de luminância ("brilho") e a refletância. Apesar de só ser estritamente válida para refletores perfeitos ela é aplicável a inúmeras situações práticas.

Assim se uma face numa mina metálica recebe um iluminamento de 110 lux e tem uma refletância de 50%, a sua luminância seria de (admitindo-se perfeita reflexão):

$$L' = r \times E = 0,5 \times 110 = 55 \text{ lx}$$

A expressão (7.8) permite que se estime também a iluminação mínima num realce. Seja uma lavra de carvão por minerador contínuo onde tem-se um realce com as dimensões de (9x5,4x1,5) m³. Admitindo-se uma refletância de 3% e um nível mínimo de luminância de 0,646 lx (norma americana), o número mínimo de lux incidentes necessários neste local de trabalho seria:

$$E(\text{min}) = L'(\text{min}) / r = 0,646/0,03 = 21,5 \text{ lx}$$

Valores em torno de 20 lx correspondem a aqueles encontrados em pátios de trens e para o qual as feições humanas são vagamente distinguíveis.

Mas:

$$E = \phi_l / A \quad \text{e} \quad A = 140,4 \text{ m}^2$$

Portanto:

$$\phi_l(\text{min}) = 21,5 \times 140,4 = 3\,018,6 \text{ lúmens}$$

A expressão (7.8) é utilizada não somente para estimativas de iluminamento de faces, pisos e paredes mas também de equipamentos e máquinas, principalmente no caso de elementos móveis que implicam em maiores riscos operacionais. Numa lavra de carvão certas texturas tem refletância da ordem de alguns por cento, enquanto que certos maquinários tem refletância na faixa de 40 a 60%. Admitindo um nível mínimo de luminância de 0,646 lx, os valores dos iluminamentos no minério e no maquinário seriam:

Para o carvão:

$$L' = 0,646 = 0,01 E$$

$$E(\text{carvão}) = 64,6 \text{ lx}$$

Para maquinário:

$$L' = 0,646 = 0,6 E$$

$$E(\text{maquinário}) = 1,08 \text{ lx}$$

Ou seja a superfície do carvão deverá ser mais iluminada que o maquinário cerca de 60 vezes.

Uma unidade que tem caído em desuso no sistema internacional é o Lambert, mas sua correspondente no sistema não métrico, o "footLambert", ainda é usada nos USA. Normas americanas para iluminação de minas subterrâneas de carvão são dadas em termos de "footLambert" que é uma unidade de luminância para difusores perfeitos.

Tanto o "footcandle" como o "footLambert" expressam candelas por pé quadrado, mas "footcandle" é para iluminamento (luz incidente) e "footLambert" é para luminância (luz refletida). Portanto quando se usa "footLambert" esta-se admitindo que a superfície é refletora e perfeita difusora. A figura 7.17. ilustra as unidades usadas para iluminamento (E) e para luminância (L e L').

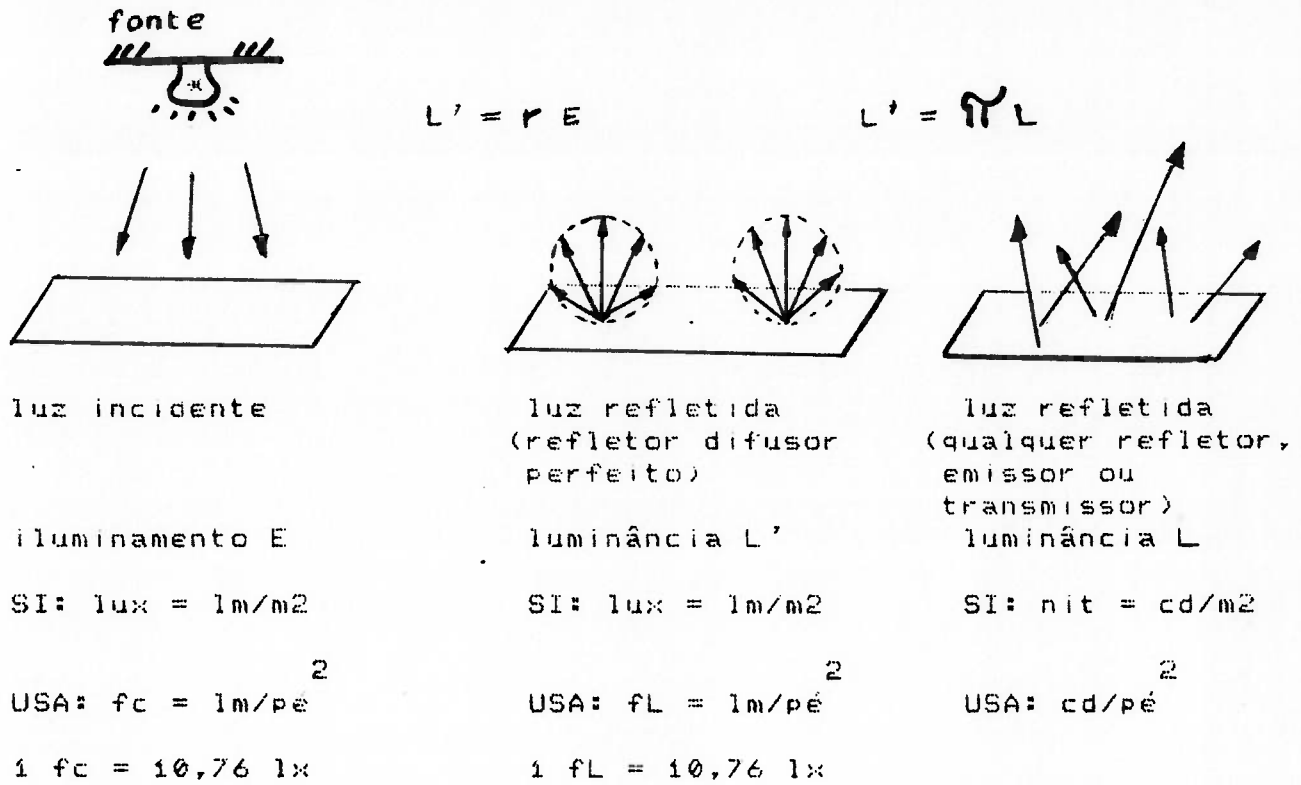


Figura 7.17. Relações entre as diversas unidades para iluminamento e luminância.

8. A VISÃO

8.1. O OLHO HUMANO

Cada órgão sensitivo do corpo humano reage a um tipo particular de estímulo físico, e o olho é sensível à parte do espectro eletromagnético denominada de espectro visível. Os principais mecanismos que nos interessam no olho são aqueles referentes à visão central, à visão periférica e à adaptação visual. As principais partes anatómicas do olho estão esquematizadas na figura 8.1.

O olho humano é um sistema ótico de forma aproximadamente esférica, com diâmetro de cerca de 2,5 cm, e recoberto e protegido pela pálpebra que é uma fina pele. A luz entra pela córnea, atravessa o humor aquoso, a lente e o humor vítreo e sensibiliza a retina (gera uma imagem). A retina por sua vez transmite através do nervo ótico informações desta imagem para o cérebro.

A parte da frente tem uma curvatura maior e é recoberta por uma membrana dura e transparente chamada córnea. A córnea é uma modificação da pele e apresenta um raio de curvatura de cerca de 7,8 mm. Atrás da córnea existe um líquido formado de água e cerca de 77% de glicose chamado de humor aquoso, cujo índice de refração é da ordem de 1,330. Na frente do cristalino existe a íris, a parte "colorida" do olho, que é composta de um tecido muscular que se estende por sobre o cristalino e possui uma abertura no centro chamada pupila.

Em seguida vem o cristalino, que é uma lente biconvexa constituída de uma substância fibrosa e gelatinosa, rija na região central e progressivamente mais macia a medida que se afasta do centro. As fibras do cristalino são entrelaçadas hexagonalmente com raios de curvatura na frente de 10 mm e atrás de 6 mm. Se bem que não homogêneo, o cristalino possui índice de refração médio de 1,437, espessura máxima de 3,6 mm e distância a córnea de 3,6 mm. O cristalino é mantido em sua posição por meio de ligamentos que o unem ao músculo ciliar, o qual por sua vez permite que se altere a distância focal do cristalino.

Após o cristalino temos uma substância gelatinosa e transparente, constituída principalmente de água e com índice de refração de 1,337, chamada de humor vítreo. Os índices de refração do humor aquoso (1,330), do cristalino (1,437) e do humor vítreo (1,337) não diferem muito entre si e são próximos do índice da água (1,336), de modo que a maior parte da refração da luz que penetra no olho ocorre na córnea.

Uma grande parte da superfície interna do olho é recoberta por uma delicada película nervosa chamada retina, cujas fibras se iniciam no nervo ótico e terminam em minúsculas estruturas sensoriais denominadas fotoreceptores. A principal função dos fotoreceptores é receber a imagem e transmiti-la ao nervo ótico, e entre eles circula um líquido azulado chamado púrpura visual.

O olho recebe a luz exterior e executa algumas tarefas de controle sobre esta luz incidente; em seguida fornece informações ao cérebro de modo que sejam definidas características como forma, tamanho, posição, movimentação, cor e brilho. Estas operações são todas inter-relacionadas mas podemos considerar dois sistemas

operacionais distintos: um sistema controlador e um sistema interpretador da luz. Os componentes de cada um deles são apresentados na tabela 8.1.

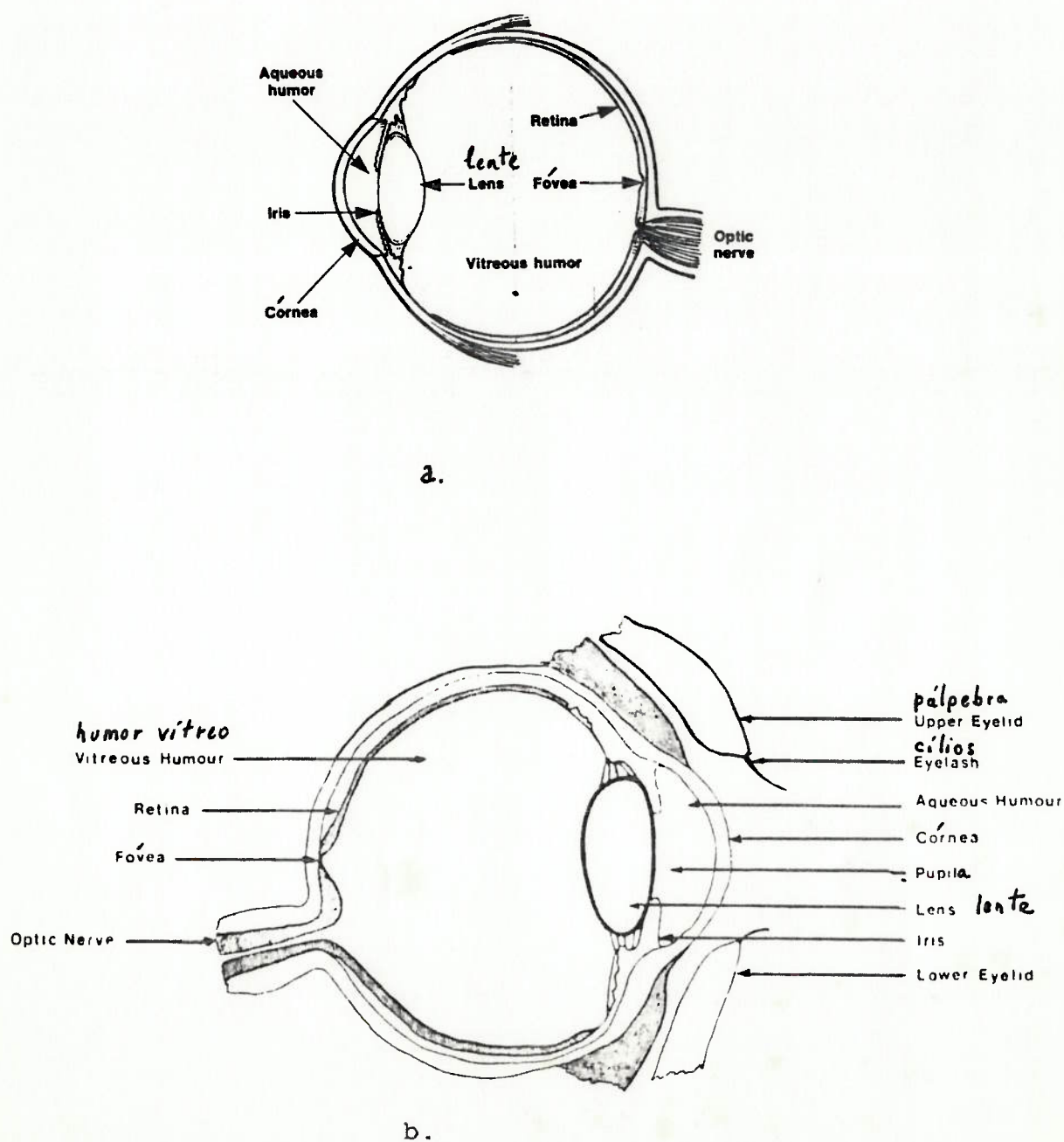


Figura 8.1. Em a. temos os principais componentes anatômicos do olho humano; em b. olho com as pálpebras e cílios [4,23].

Tabela 8.1. Elementos que compoem os sistemas controlador e interpretador da luz [6].

sistema controlador	sistema interpretador
pálpebra	retina
córnea	fóvea
íris e pupila	cones e bastonetes
cristalino	nervo ótico
músculo ciliar	
humores: aquoso, vítreo	

8.2. O SISTEMA CONTROLADOR

O sistema controlador tem como funções básicas a seleção do tipo e da quantidade de luz que é enviada ao sistema interpretador, e a focalização da luz na retina. A função específica de cada elemento componente é a seguinte:

- a. pálpebra: é uma porção de pele que recobre e protege o olho, e que sob extremo brilho se fecha para reduzir a quantidade de luz que penetra.
- b. córnea: atua como um filtro para certos comprimentos de onda e em conjunto com o cristalino focaliza a luz na retina.
- c. íris e pupila: a íris age como um diafragma aumentando ou diminuindo o tamanho da pupila conforme a luminância do objeto visualizado.
- d. cristalino: é uma lente flexível que atua junto com a córnea na focalização da luz na retina, e atua também como um filtro para certos comprimentos de onda.
- e. músculo ciliar: ele altera os raios de curvatura do cristalino, achatando-o ou encurvando-o de modo a ajustá-lo para as diversas distâncias de observação.
- f. humores aquoso e vítreo: atuam como filtros auxiliares, eliminando certos comprimentos de onda.

Portanto o sistema controlador filtra a luz, controla sua quantidade e a orienta direcionalmente (focaliza). As operações principais que ele executa são a filtragem, a quantificação e a focalização.

8.2.1. FILTRAGEM

A exposição da retina às radiações ultra-violeta e infra-vermelha podem danificá-la e a córnea, o humor aquoso, o cristalino e o humor vítreo atuam como filtros protetores. Eles impedem a transmissão de toda a radiação com comprimento de onda menor que 300 nm, e de quase toda radiação de comprimento compreendido entre 300 e 380 nm, protegendo a retina dos raios ultra-violeta.

Praticamente toda a radiação com comprimento de onda maior que 1 400 nm é também filtrada, mas ainda é possível considerável

transmissão de radiação infra-vermelha na faixa entre 780 e 1 000 nm, e a intensa exposição da retina a esta faixa pode ocasionar danos.

8.2.2. QUANTIDADE TRANSMITIDA

A posição da íris sobre o cristalino define o tamanho da pupila, e este regula automaticamente a quantidade de luz que penetra. O diâmetro da pupila varia na proporção de 1 a 4 e portanto sua área varia na razão de 1 para 16, enquanto que a luminância de uma superfície pode variar na faixa de 1 a 100 000; assim a pupila sozinha não é capaz de controlar uma grande variação de luminosidade e a própria retina tem que se adaptar a grandes diferenças de quantidade de luz.

O tamanho da pupila impede também a penetração da luz proveniente das extremidades da córnea e do cristalino, onde as curvaturas inapropriadas provocariam distorções da imagem na retina. É por isso que a pupila se contrai para a visão próxima.

As alterações de dilatação e contração da pupila são controladas pelo sistema nervoso autônomo. A divisão parassimpática atua em função da quantidade de luz incidente enquanto que a divisão simpática provoca a dilatação em decorrência de emoções médias ou fortes [22] .

8.2.3. FOCALIZAÇÃO

Para que se veja um objeto distintamente é necessário que se forme uma imagem nítida na retina, e isto é conseguido porque a córnea e o cristalino redirecionam os raios incidentes. Este redirecionamento faz com que todos os raios provindos de um ponto P sejam projetados num único ponto da retina como mostra a figura 8.2.a. Se a córnea e o cristalino não "concentrassem" os raios, a luz proveniente de um ponto P seria espalhada numa região da retina e se perceberia apenas um borrão, como esquematiza a figura 8.2.b.

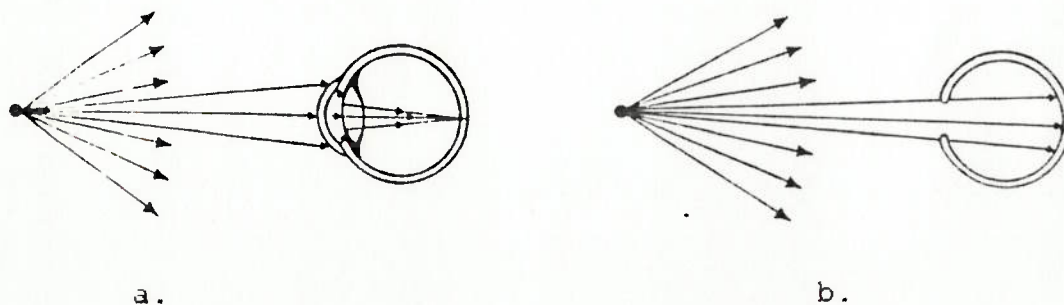


Figura 8.2. a. Focalização da luz num unico ponto da retina de modo que seja possível a percepção de detalhes; b. sem a atuação da córnea e do cristalino não se formaria uma imagem nítida (puntual) na retina e a visão seria borrada [6].

Se a córnea e o cristalino fossem rígidos só haveria uma única distância para a qual se teria uma imagem nítida na retina. Mas graças a ação dos músculos ciliares sobre o cristalino o olho humano consegue ver distintamente objetos situados entre 25 cm e o infinito. Quando em repouso, o olho normal fica focalizado no infinito e o músculo ciliar está relaxado como mostrado na figura 8.3. Quando queremos ver um ponto mais próximo é necessário maior redirecionamento dos raios, o que é conseguido pelo tensionamento do músculo ciliar e consequente aumento da curvatura do cristalino. O processo de mudança de forma do cristalino para a focalização de pontos a variadas distâncias é denominado de acomodação.

Após ficarem um certo tempo olhando objetos próximos, muitas pessoas sentem cansaço visual e mesmo dor. Ambos são provenientes da contínua tensão do músculo ciliar.

Chamamos de pontos remoto e próximo aos pontos mais afastado e mais próximo para os quais se tem visões nítidas na retina. O ponto remoto do olho normal é o infinito como se tem na figura 8.3., e o olho é dito emétrepe. Se o ponto remoto não está no infinito o olho é dito amétrepe e os dois tipos mais simples de ametropia são a miopia e a hipermetropia. A figura 8.4. ilustra de modo simplificado a miopia e a hipermetropia.

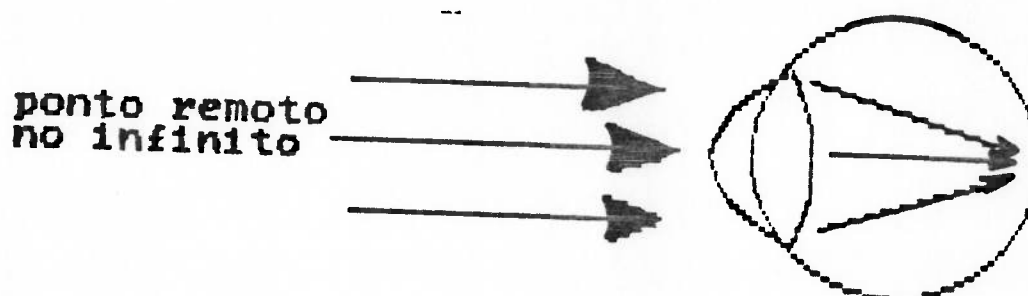


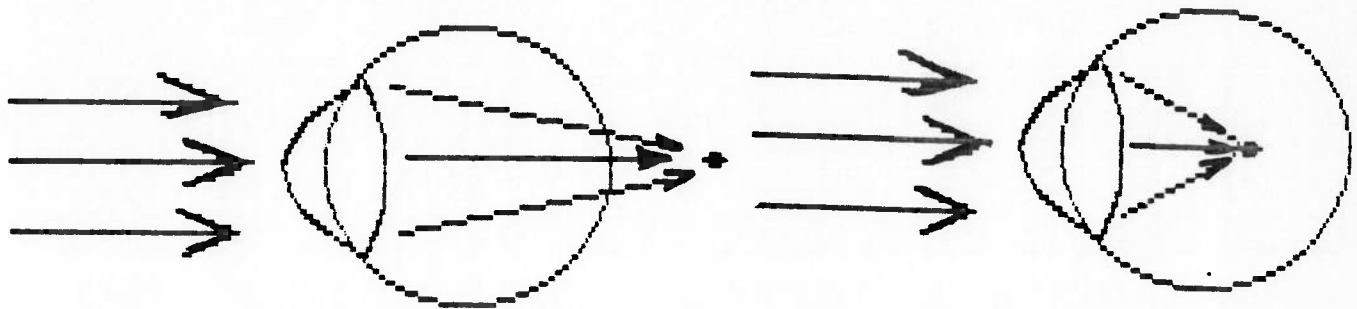
Figura 8.3. Olho normal relaxado com um foco no infinito e outro na retina.

8.3. O SISTEMA INTERPRETADOR

A energia luminosa que penetra pelo olho é transformada na retina em pequenos impulsos elétricos que são transmitidos para o cérebro. Com estes impulsos o cérebro forma uma imagem mental que é comparada com milhões de imagens existentes na memória visual, e uma interpretação é efetuada.

A interpretação se baseia principalmente em duas características físicas da luz que são o nível energético e a composição em termos de comprimento de onda. São estas características que em última análise fornecem as percepções de brilho e de cor. Deste

modo o processo interpretador se inicia na retina e termina no cérebro, numa operação que se efetua em apenas alguns milésimos de segundo.



a. miopia: os raios provindos do infinito convergem num ponto antes da retina; o ponto remoto está mais próximo que o infinito e o ponto próximo está mais perto que o do olho normal.

b. hipermetropia: a imagem de um ponto infinitamente distante se formaria atrás da retina; por acomodação se consegue a convergência na retina, e em geral o ponto próximo é mais distante que o normal.

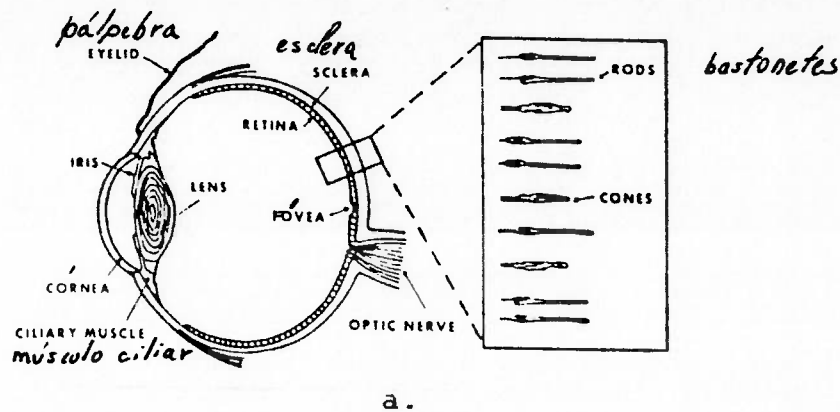
Figura 8.4. Olho amétrope míope e hipermetrópe.

8.3.1. ESTRUTURA NEURAL DA RETINA

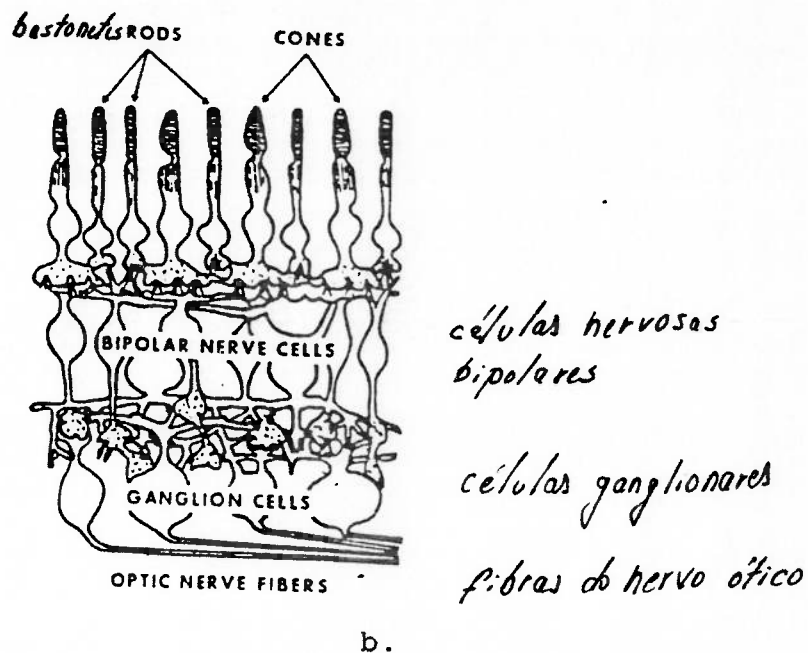
A retina é uma película sensível a luz que recobre cerca de dois terços da parte posterior interna do olho. Ela se subdivide essencialmente em três camadas consecutivas que são compostas por [23]:

- a. fotorreceptores - convertem a energia luminosa em sinais na rede neural e que são de dois tipos chamados de cones e bastonetes; esta denominação provém de suas formas geométricas aproximadas.
- b. células bipolares - fazem as conexões sinápticas com os cones e bastonetes.
- c. células ganglionares - são as fibras que compõem o nervo ótico.

Estes elementos componentes da retina são ilustrados na figura 8.5.



a.



b.

Figura 8.5. Em a. temos uma secção da retina com os cones e bastonetes; em b. temos em detalhe os fotoreceptores, as células bipolares, as células ganglionares e as fibras do nervo ótico que se conectam ao cérebro [6].

Portanto no processo interpretador a luz penetra no olho, atravessa a lente cristalina, em seguida atravessa os líquidos que preenchem o interior, cruza uma malha de vasos sanguíneos até sensibilizar os cones e bastonetes. Estes geram os sinais que ao atingir o cérebro irão permitir uma interpretação visual. A figura 8.6. ilustra de modo simplificado o processo.

Os cones e bastonetes são em grande número e se distribuem na retina como um mosaico. Numa área de apenas 6 cm² existem cerca de 7 milhões de cones e 130 milhões de bastonetes [4]. Todavia eles atuam de modo distinto e a sua distribuição não é uniforme.

Na parte central da retina existe uma ligeira depressão chamada mancha amarela (ou mácula lútea), a qual contém em seu centro uma pequena região de cerca de 0,25 mm de diâmetro denominada de fovea

("fovea centralis"). A fóvea contém apenas cones e nela a visão é "mais penetrante" que no resto da retina. Os músculos que controlam o globo ocular atuam de modo que a imagem do objeto se forme na fóvea, e o restante da retina se destina apenas a dar uma idéia geral do campo de visão.

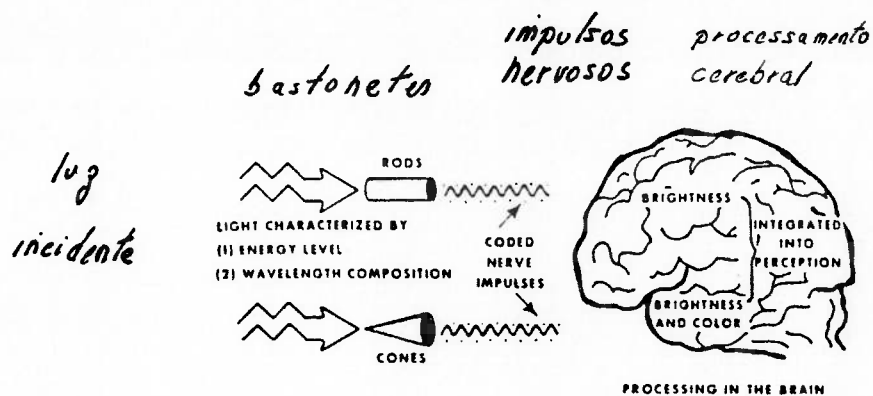


Figura 8.6. Sistema interpretador das sensações visuais. O processo se inicia nos fotoreceptores denominados cones e bastonetes [6].

Na fóvea se concentram mais de 50 000 cones numa área de menos de um milímetro quadrado [4,6], e a seu redor na pequena área da mácula que a circunda se tem uma altíssima concentração de cones.

Exteriormente à mácula a proporção de cones diminui a medida que nos afastamos da fóvea, enquanto que a proporção de bastonetes aumenta. Assim na região central da retina (fóvea e mácula) existem apenas cones e na periferia da retina encontramos cones e bastonetes.

Esta distribuição não uniforme de fotoreceptores pelas regiões central e periférica da retina está ilustrada na figura 8.7. e dá origem às denominações de visão central e visão periférica. A noção das características particulares de cada uma destes tipos de visão é importante para projetos de iluminação em subsolo e isto será analisado mais adiante.

Perto da fóvea existe uma zona insensível a luz e que corresponde ao local onde as fibras nervosas das células ganglionares se reúnem para constituir o nervo óptico. É a região em que este nervo penetra no globo ocular e nela não existem nem cones nem bastonetes, de modo que as imagens que aí se formam não são "vistas". Deste fato provém o nome popular de ponto cego e que pode ser percebido através da figura 8.8.

8.3.2. VISÃO FOTÓPICA E VISÃO ESCOTÓPICA

A transferência das informações dos fotoreceptores para o córtex cerebral não é feita por um conjunto de fibras nervosas individuais que se iniciam em cada um dos cones e bastonetes. Para os cones da fóvea isto é praticamente verdadeiro mas para os fotoreceptores da periferia ocorre a união de muitos receptores

numa única célula bipolar (sinapse), e a união de muitas células bipolares numa única célula ganglionar (vide figura 8.5b).

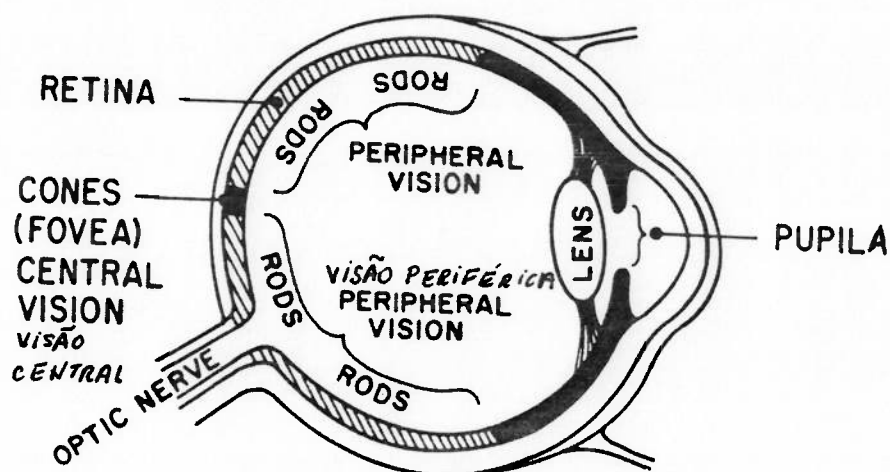


Figura 8.7. Distribuição não uniforme de cones e bastonetes pela retina. Esta não uniformidade da origem aos nomes de visão central e visão periférica [5].



Figura 8.8. Pode-se comprovar a existência do ponto cego fechando-se o olho esquerdo e olhando para a cruz com o direito. Quando a figura estiver a cerca de 25 cm do olho o quadrado desaparece; a uma distância menor ele reaparece mas o círculo desaparece. A uma distância ainda menor o círculo reaparece [20].

Deste modo sendo a fovea um local de baixa convergência ela tem um alto poder de resolução e permite a visualização de detalhes, ao passo que a periferia tendo alta convergência tem correspondente baixo poder de resolução e não permite a visualização precisa de detalhes.

Se olharmos diretamente para um objeto a imagem se forma no centro da retina, ou seja na fovea, e a imagem é clara, bem definida e precisa. É a chamada visão central.

Se olharmos fixamente para um objeto locado por exemplo no fundo

de uma sala poderemos ainda assim distinguir o que há a seu redor, mesmo que sem as mesmas riquezas de detalhes e clareza. Isto porque a imagem se forma na periferia da retina onde se tem menos fotoreceptores que na fóvea, e há também preponderância de bastonetes. É a chamada visão periférica.

Se continuarmos olhando o objeto e formos diminuindo a luminosidade da sala poderemos constatar que:

- a. as cores vão esmaecendo até que se perceba apenas branco, preto e tons de cinza.
- b. pouco antes de se obter a escuridão total os objetos parecem desaparecer mas ainda se pode perceber a sala como um todo.

Estas alterações decorrem do fato de que apenas os cones permitem uma visão com cores cromáticas, ou seja, com azul, amarelo, verde e vermelho entre outras. Mas os cones funcionam adequadamente apenas quando existe luz em quantidade suficiente, e a partir de um certo nível de iluminação não enviam mais sinais ao cérebro. Por outro lado os bastonetes só permitem a visão de cores acromáticas (branco e tons de cinza) mas são mais sensíveis a pouca luz e continuam enviando sinais ao cérebro até a escuridão total. Figurativamente podemos comparar os cones a um filme colorido e os bastonetes a um filme branco e preto, e sabemos que os filmes branco e preto são mais sensíveis a pouca luminosidade.

Os cones permitem a chamada visão fotópica, eficiente para altos níveis de iluminação e com precisão de detalhes, e por existirem três tipos de cones especializados em três domínios espectrais diferentes é que é possível se ter imagens coloridas.

Os bastonetes permitem a chamada visão escotópica, adequada para baixos níveis de iluminação e sem alta definição de detalhes, e como não discriminam quanto a faixas espectrais a visão escotópica é em branco e preto.

São utilizadas como sinônimos os termos visão escotópica e visão periférica e os termos visão fotópica e visão central, e as características de cada uma são importantes na análise da segurança em minas. A visão periférica é importante na mineração por dois motivos:

- a. em minas a céu aberto quase nunca se experimenta a escuridão total pois sempre há a luz do luar, das estrelas ou de uma distante lâmpada. Nesta situação os cones estão inertes mas os bastonetes estão sensibilizados, e para procurarmos um objeto é melhor não olharmos diretamente para onde deveria estar mas um pouco para o lado dele de modo a se otimizar a visão periférica. Em subsolo no caso de existirem apenas as lanternas portáteis de capacete a visão se concentra apenas no domínio do fecho da lanterna reduzindo-se a visão periférica.
- b. ambientes mineiros são ambientes de alto risco e apesar da visão periférica não fornecer muita precisão de geometria dos objetos ela é muito sensível para detecção de movimentos. Esta habilidade de perceber movimentos é conhecida pelos caçadores com o nome de visão pelo "canto dos olhos", sendo um importante mecanismo de segurança quando se trabalha em locais com equipamentos móveis. As normas americanas de iluminação para minas subterrâneas de carvão exigem iluminação de rede e um número mínimo de unidades de luminância onde operam mineradores contínuos e outras máquinas. O limite inferior de luminância é definido justamente para que funcione a visão escotópica.

Os bastonetes começam a ser sensibilizados por níveis de luminância entre 0,003 4 e 0,000 34 nit, enquanto que os primeiros cones se sensibilizam apenas a partir de 0,003 4 nit. Todos os fotoreceptores estão sensibilizados para um nível geral de luminância de 0,1 a 0,2 nit e o valor 0,2 nit é o limite inferior exigido nas minas americanas e também o valor sugerido internacionalmente para luminância de áreas em subsolo onde operam equipamentos pesados e com mobilidade (pelo menos de alguma parte) [4,6]. Com 0,2 nit as cores e os principais detalhes podem ser visualizados mas infelizmente apenas a iluminação de lâmpadas de capacete não fornece este mínimo nas vizinhanças do fecho luminoso. Deste modo é recomendável que em subsolo se tenha uma iluminação complementar além da individual. A figura 8.9. ilustra a pequena área iluminada por uma lanterna onde se tem o nível mínimo de luminância para sensibilizar todos os fotoreceptores.

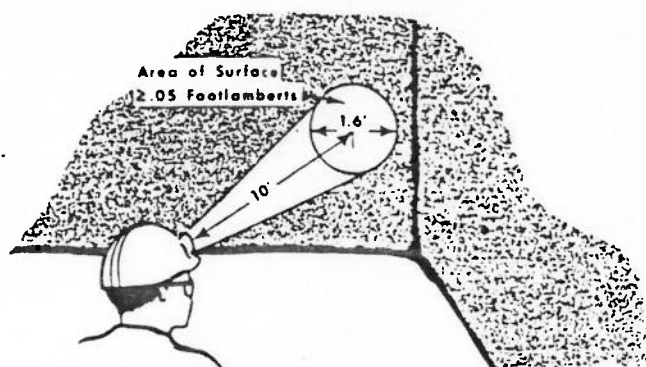


Figura 8.9. Área em face de carvão com refletância de 4% onde se atinge o limite mínimo de 0,2 nit necessário para ativação de todos fotoreceptores. A distância a face é de 3 m [6].

8.3.3. FUNCIONAMENTO DOS BASTONETES

O início do processo de percepção ocorre nos fotoreceptores (cones e bastonetes) os quais contém compostos químicos sensíveis a luz (compostos fotoquímicos). Reagindo à exposição da luz eles produzem alterações elétricas nas células nervosas da retina, que por serem conectadas ao nervo ótico permitem a chegada dos impulsos ao cérebro. Neste processo informações de brilho são enviadas pelos cones e bastonetes enquanto que informações de cores apenas pelos cones. Todos os detalhes pelos quais os fotoreceptores interpretam as características de luminância e comprimento de onda da luz não são bem conhecidos mas os fatos essenciais são que [6]:

- a. a resposta dos fotoreceptores se baseia em reações fotoquímicas;

b. existem muitos processos de interpretação neural destas reações que permitem ao cérebro distinguir cores e brilhos.

Os bastonetes contém um composto químico fotosensível denominado de rodopsina, o qual se subdivide em vários outros compostos quando exposto a luz. Esta decomposição produz uma variação na energia elétrica da célula do bastonete que isoladamente ou em grupo está conectado a uma célula ganglionar. A variação de energia elétrica se acumula até o ponto onde a célula ganglionar emite um impulso para o cérebro através do nervo ótico. A frequência destes impulsos é proporcional a energia incidente sobre o bastonete, e com base nisso o cérebro responde com uma interpretação do que se denomina de brilho.

8.3.4. FUNCIONAMENTO DOS CONES

O funcionamento dos cones é mais complexo que o dos bastonetes e a teoria mais aceita os subdivide em três classes em função dos compostos fotoquímicos que contém [4,6]. Uma classe contém composto fotossensível a comprimentos de onda curtos (região do azul), a outra composto fotossensível a comprimentos de onda médios (região do verde) e a terceira compostos fotossensíveis a grandes comprimentos de onda (região do vermelho). As três classes geram impulsos nervosos de modo similar aos bastonetes e estes ao atingirem o cérebro são processados de dois modos, um aditivo e outro diferencial.

No processo aditivo os sinais cujas frequências são proporcionais à energia luminosa incidindo nos cones são combinados para fornecer informações que o cérebro usará para identificar o brilho.

No processo diferencial os sinais das três classes de cones são comparados para se obter um levantamento da mistura de comprimentos de onda da luz. Esta análise é posteriormente interpretada como cor. Após estes dois níveis intermediários de processamento o cérebro integra todos os dados neurais de cor e brilho numa única interpretação final denominada de "imagem vista".

A velocidade de resposta dos fotoreceptores face a um estímulo luminoso é proporcional a intensidade da luz, pois sua decomposição química tem velocidade de reação influenciada diretamente pela quantidade de energia incidente. O tempo de percepção visual é o intervalo existente entre o momento em que se olha para um objeto e a sua percepção final como objeto. Ele aumenta com maiores níveis gerais de iluminação e com o grau de contraste entre o objeto e o ambiente a seu redor. Este 'e mais um motivo para se ter iluminação geral de rede em subsolo (além da obrigatória de capacete) pois o tempo de percepção pode ser vital em certas situações de risco ocorrentes na mineração subterrânea.

Muitos dos acidentes que ocorreram em minas subterrâneas podem ser atribuídos a lenta velocidade de percepção visual, com mineiros tendo sido atingidos por trens em movimento, por queda de blocos do teto ou mesmo por moto-escavo-transportadoras ("scrapers") [4]. A lentidão de resposta visual em todos os casos estava associada ao insuficiente nível de iluminação, o qual deve ser mantido alto em todas as situações onde se tenha

máquinas e equipamentos em movimento. Além disso este tipo de acidentes em geral apresentam alto grau de severidade.

8.3.5. DESVIO DE PURKINJE

A figura 5.8. apresenta a curva espectral de eficiência luminosa a qual ilustra graficamente a variação da sensibilidade do olho face a diferentes comprimentos de onda. Esta sensibilidade é expressa em termos de percepção de brilho e por isso esta curva é também denominada de curva de sensibilidade do olho humano. Todavia a sensibilidade do olho não é uniforme no domínio visível mas varia com o comprimento de onda considerado. Esta variação decorre principalmente de [6]:

- a. características seletivas distintas dos compostos fotossensíveis quanto aos diversos comprimentos de onda;
- b. absorção ou filtragem de certos comprimentos de onda por alguns dos meios transparentes do olho. Estes fenômenos tem importância relativa menor que o primeiro fator acima.

Para um alto nível de iluminação para a qual os cones estejam adaptados e funcionando (luminância superior a 0,2 nit), a retina responde na faixa de 400 a 700 nm e são eles que determinam o ponto de máxima sensibilidade da curva. O máximo valor ocorre para comprimento de onda de 550 nm como ilustrado na figura 5.8. e repetido na figura 8.10. Esta curva se refere a visão fotópica ou visão central adaptada para a luz ("day cone vision" ou "light adapted eye") e o seu pico ocorre para uma luz verde-amarelada.

Para um baixo nível de iluminação tal qual o encontrado em certos locais de minas subterrâneas (luminância inferior a 0,03 nit) os fotoreceptores ativados são essencialmente os bastonetes, o olho está adaptado a penumbra e a retina responde na faixa de 380 a 660 nm [4]. São eles que determinam a máxima sensibilidade que ocorre pouco acima do 500 nm. Na literatura encontramos os valores pico de 502 nm e 510 nm e esta curva se refere a visão escotópica ou visão periférica adaptada a penumbra ("night rod vision" ou "dark adapted eye") [4,6,23].

Entre os dois extremos de muita luz e pouca luz tanto os bastonetes como os cones em funcionamento contribuem para a locação da máxima sensibilidade e a curva correspondente se situa entre as duas apresentadas a figura 8.10. Esta região é denominada de região de visão mesotópica.

Internacionalmente são reconhecidas as duas curvas, ou seja as curvas de sensibilidade para visão fotópica e para visão escotópica, sendo a primeira também grafada como curva $V(\lambda)$.

A mais importante é a curva fotópica porque foi internacionalmente acordado que ela deveria ser a base para todas as medidas de iluminação independentemente do nível de luminosidade existente. A exatidão com que um instrumento se ajusta a esta curva em termos de luzes de diferentes cores é denominada de ajuste espectral ("spectral match") [23].

O desvio de Purkinje fica definido pela diferença de cerca de 40 nm existente entre os picos de máxima sensibilidade do olho nas condições de visão fotópica e escotópica. Este desvio ocorre no sentido da região do azul do espectro e está relacionado com o problema de iluminação de minas em vários aspectos.

Em primeiro lugar porque os instrumentos de medida estão calibrados para as condições fotópicas, devendo-se ter cuidado quando se efetuar pesquisas minuciosas em condições escotópicas pois as interpretações podem conter erro.

Em segundo lugar deve-se procurar nos projetos de iluminação fornecer níveis que permitam a visão fotópica (acima de 0,2 nit) de modo que os cones estejam operando. Quando isto não é factível a visibilidade pode ser melhorada usando-se recobrimento das paredes com tinta que reflita preferencialmente os comprimentos de onda menores (azul e verde). Ou então fontes de luz que emitam relativamente mais energia na região dos menores comprimentos de onda. Por este motivo os ingleses utilizaram por um certo período lâmpadas verdes em suas minas [6].

Deve-se observar todavia que nas condições de visão fotópica as lâmpadas mais eficientes seriam as com maior emissão na região espectral do verde, mas que nas condições escotópicas as lâmpadas azuis seriam ainda mais eficientes devido ao desvio de Purkinje.

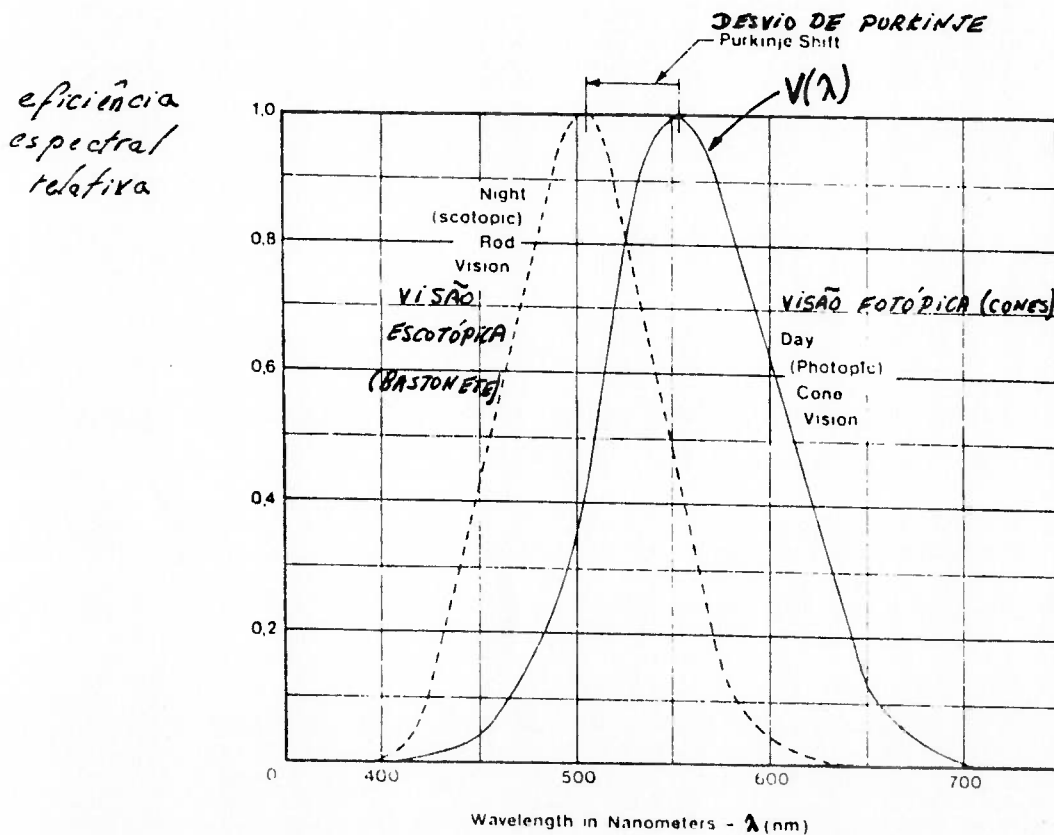


Figura 8.10. Desvio de Purkinje relativo a diferença de máxima sensibilidade para as visões fotópicas (visão central adaptada a luz) e escotópica (visão periférica adaptada à penumbra) [4].

8.4. ADAPTAÇÃO VISUAL

A visão humana opera em uma ampla faixa de níveis de iluminação porque é capaz de se adaptar a variações de claridade e penumbra. O controle do sistema visual é feito por dois mecanismos, um envolvendo a íris e pupila e o outro processos fisiológicos na retina.

O processo envolvendo a íris e a pupila foi descrito no item 8.2.2., e nos homens a variação da área da pupila é feita homoteticamente ou seja, a forma circular é mantida. Já nos felinos a diminuição de área é acompanhada por um alongamento gerando uma mudança da forma ovalada para a forma de um filete. O tempo de resposta da pupila é de alguns segundos [5].

O processo fisiológico na retina é o mais importante e objetiva aumentar a sensibilidade do olho quando em baixos níveis de iluminação. Este processo é puramente fisiológico e não ocorre interferência com as atividades do córtex cerebral.

Nas suas partes mais externas os fotoreceptores contém fotopigmentos que se decompõe pela absorção da luz, produzindo-se uma proteína e um aldeído instável da vitamina A. Esta decomposição libera elétrons que geram impulsos para o cérebro que são conduzidos pelo nervo ótico. A sensibilidade do olho é muito dependente da porcentagem de pigmentos não decompostos. Assim numa situação de iluminação constante a concentração de fotopigmentos se mantém inalterada, e uma alteração da iluminação provoca a síntese ou a decomposição de pigmentos.

Quando uma pessoa permanecer muito tempo sob um baixo nível de iluminação a regeneração dos pigmentos provoca um aumento da sensibilidade, e este processo pelo qual a retina se adapta a baixas luminâncias (faixa entre 0,003 4 até 0,2 nit, com valor médio da ordem de 0,034 nit), é denominado de adaptação visual à penumbra.

O tempo de adaptação da retina varia muito e uma faixa citada na literatura é de 18 a 36 minutos [22]. Nas operações em subsolo a acuidade visual dos mineiros é importante e ela depende da habilidade e do estado de adaptação visual. No dia a dia mineiro os problemas de adaptação se iniciam com o turno de trabalho e terminam ao seu final.

Para um dia claro durante o deslocamento da superfície para o subsolo (onde se tenha apenas lâmpadas de capacete) a parte principal da adaptação ocorre em dois a três minutos, mas o processo todo desde a "cegueira" quase total até o estado de adaptação final pode demorar de 30 a 40 minutos [5]. Já a passagem do subsolo para a superfície em dia claro pode requerer uma adaptação de segundos até 1 a 2 minutos.

No interior da mina as mudanças de luminância tendem a ser menores que os extremos anteriormente citados, mas mesmo assim problemas de adaptação existem. Como exemplos citamos a mudança do olhar de uma região bem iluminada para outra pouco iluminada, ou quando em deslocamento por locais apenas iluminados com lanternas pessoais as quais sofrem contínuos deslocamentos. Nestas situações ficando-se imóvel ocorre uma rápida adaptação mas nem sempre é possível ficar parado em minas subterrâneas, principalmente nos realces de produção. Situações críticas podem surgir próximas por exemplo a mineradores contínuos com lanças

móveis e com suportes ao redor, onde não se pode permanecer fixo num dado local devido ao avanço da produção e deslocamento dos equipamentos.

Lâmpadas de capacete são extremamente inadequadas neste contexto porque além de causarem problemas de adaptação e não permitir visão periférica podem causar ofuscamento ao atingirem os olhos. Um ofuscamento causado por uma súbita iluminação da face por uma fonte luminosa pode ser minimizado fechando-se imediatamente um dos olhos. O olho fechado retém parcialmente seu estado de adaptação a penumbra e se recupera mais rapidamente. Este mecanismo preventivo é conhecido pelos mineiros desde longa data e já em 1556 Agrícola ilustrava este procedimento em seu livro De Re Metallica. A figura 8.11. é uma cópia da ilustração apresentada nesta obra.

8.5. DEFEITOS E DOENÇAS VISUAIS

Dentre os muitos defeitos visuais que podem afetar o desempenho do trabalhador alguns podem ser totalmente corrigidos por meios óticos. Outros podem ser parcialmente minimizados através de adequados projetos de iluminação enquanto outros fatalmente irão prejudicar o desempenho nas operações mineiras.

Os defeitos mais comuns podem ser agrupados em defeitos de refração, daltonismo, dificuldades de adaptação, nistagmus e deterioração por envelhecimento.

Os defeitos de refração causam dificuldades de focalização na retina estando normalmente associados a problemas com a córnea e o cristalino. Em vez de se obter uma imagem nítida se obtém um imagem "borrada" e os principais são a miopia, a hipermetropia, o astigmatismo e a presbiopia. Os dois primeiros foram apresentados no item 8.2.3. enquanto o astigmatismo decorre da não uniformidade de curvatura das superfícies de refração do olho. A presbiopia é uma dificuldade de conseguir alteração na curvatura do cristalino (acomodação). Estes defeitos podem ser corrigidos por meio do uso de lentes de contato ou óculos de modo que não se prejudique o desempenho no trabalho.

Existem três tipos principais de daltonismo, os denominados daltonismo total, o daltonismo azul-verde e o daltonismo verde-vermelho [6]. No daltonismo total não há distinção de cores e a visão ocorre em tons de cinza, enquanto que no daltonismo azul-verde estas cores não são distinguíveis. No daltonismo verde-vermelho temos a deunatropia (ambas as cores são percebidas como amarelo) ou a protanopia (além de serem percebidas como amarelo não há distinção de tons de vermelho). As causas do daltonismo podem ser genéticas ou podem estar associadas a doenças do olho ou mesmo a excesso de álcool ou fumo.

Estudos efetuados com mineiros da África do Sul indicaram que cerca de 8% dos machos brancos apresentavam daltonismo verde-vermelho, enquanto que nos machos pretos a proporção era muito menor da ordem de 1,4% apenas [4,6]. Nas mulheres a porcentagem obtida foi menor ainda, da ordem de 1%.

O daltonismo representa um risco a segurança em atividades mineiras tais como as que envolvam fiação elétrica, armação da malha de explosivos para detonação ou manuseio de cilindros de

gás. Não é tão problemática a interpretação de sinais de tráfego porque normalmente é perceptível a distinção de brilho entre tons de verde e vermelho, e também porque a posição geométrica relativa dos símbolos é memorizada. Portanto daltônicos poderiam dirigir veículos de transporte em subsolo porque lembrariam que a luz vermelha está acima da verde e pelo brilho relativo saberiam qual estaria acesa. Estas são situações especiais e toda contratação de funcionário de mina deveria obrigatoriamente incluir um teste de daltonismo.



Figura 8.11. Manutenção da adaptação à penumbra pelo tapamento de um olho com uma das mãos ao se passar por uma área muito iluminada. Na outra mão está segura uma lanterna de mineiro que ao ter sua chama extinta indicava o fim do turno de trabalho [24].

A diminuição da capacidade de adaptação visual a penumbra pode ter origem em causas patológicas ou nutricionais. A deficiência de vitamina A é a maior causa do decréscimo da capacidade de adaptação porque a redução da quantidade desta vitamina no sangue implica numa diminuição da quantidade de fotopigmentos. Deficiências extremas podem ocasionar a chamada "cegueira noturna".

Sob baixos níveis de iluminação onde os cones estão inoperantes o foco na retina se desloca da fóvea em cerca de 20 graus, para uma região onde há uma maior concentração de bastonetes. Se o olho funcionar muito tempo nestas condições ele terá dificuldades para voltar a focalizar na fóvea nas condições normais de iluminação. Os sintomas mais comuns são o movimento contínuo dos olhos de modo circular ou de um lado para o outro, caracterizando a doença denominada nistagmus.

A incidência de nistagmus chegou a ser uma séria doença ocupacional dos mineiros de subsolo, estimando-se que numa dada época ela atingia mais de 70% dos mineiros da europa [4]. Após a introdução da lâmpada de capacete ela praticamente desapareceu.

A deterioração do sistema visual com o envelhecimento pode na maioria dos casos ser minimizada por meios óticos ou por ajustes nas condições de iluminação. Os defeitos mais comuns incluem a presbiopia, o aumento da sensibilidade ao ofuscamento, o surgimento de catarata, o decréscimo da capacidade de detectar movimento no campo periférico, a diminuição do poder de visualizar detalhes e o aumento do tempo de adaptação.

9. CAMPO E AMBIENTE VISUAIS

9.1. CAMPO VISUAL

O processo de percepção visual se inicia com a focalização da imagem na retina, prossegue com os fotoreceptores interpretando cor e brilho e termina com a integração destas respostas pelo cérebro. Todavia este processo sozinho não explica totalmente todas as características da imagem percebida pelos olhos e muitos outros fatores contribuem ao processo final. Dentre estes se destacam a distribuição de fotoreceptores e as conexões neurais com o cérebro, os limites físicos do campo visual, a percepção combinada dos dois olhos e a movimentação dos olhos e da cabeça.

9.1.1. DISTRIBUIÇÃO DE FOTORECEPTORES

A distribuição de cones e bastonetes pela retina e a relação número de fotoreceptores por terminal nervoso (relação de conexão) determinam "como se vê" em diferentes partes do campo visual. Cones tem baixa relação de conexão e permitem alta resolução de detalhes mas tem baixa sensibilidade ao nível de iluminação. Já os bastonetes tem alta relação de conexão que permite uma alta sensibilidade mas tem um pequeno poder de resolução. A concentração de cones na fóvea cria a chamada visão central (onde se tem a máxima resolução) e define um campo visual determinado por um ângulo sólido de cerca de 2 graus. Externamente ao campo da visão central tem-se a visão periférica na qual apesar das formas não serem tão precisas a referência espacial é muito boa e a percepção de movimento é alta. Esta visão é muito importante em subsolo face ao tipo de operações executadas, ao baixo nível de iluminação e aos riscos existentes.

A noção de referência espacial é importante em operações de manobra e posicionamento de jumbos de atirantamento principalmente em galerias com muito escoramento. A alta sensibilidade à luz da visão periférica implica numa alta sensibilidade para a detecção de movimentos, e quando um movimento é detectado um reflexo movimenta os olhos de modo a colocar o objeto em visão central. Portanto a visão periférica serve como um instrumento de alarme inicial para o mineiro e uma situação crítica é a detecção de pequenos movimentos e escorregamentos de terra e rocha que precedem às quedas de bloco, desabamentos de teto e colapso de pilares. Sistemas de iluminação que adequadamente iluminem áreas no campo periférico otimizam o funcionamento deste mecanismo detector de riscos.

9.1.2. LIMITES FÍSICOS DO CAMPO

Estes limites são determinados pelos contornos da face havendo regiões alcançadas pelos dois olhos e regiões alcançadas apenas por um olho. O ângulo de 2 graus corresponde à visão central enquanto que a visão periférica com ambos os olhos define horizontalmente um ângulo de 120 graus. Considerando-se as

regiões em que atua apenas um olho obtemos um ângulo na horizontal de 180 graus [6]. Numa secção vertical devido às sobranceiras e queixo o ângulo global se reduz a cerca de 130 graus.

9.1.3. MOVIMENTAÇÃO DOS OLHOS E CABEÇA

O olho não obtém uma pormenorizada imagem de um objeto apenas pela focalização apropriada na fóvea, sendo essenciais ao processo a movimentação dos olhos. O objetivo da movimentação dos olhos é manter um constante deslocamento da imagem sobre a retina de modo que esta não desapareça gradualmente e haja interrupção do envio de sinais para o cérebro. Quando olhando para um objeto estacionário os olhos percorrem a área de interesse com pequenos e bruscos deslocamentos, e quando olhando para um objeto móvel tal qual carvão numa correia transportadora eles o seguem com movimentos suaves.

Tendo-se como referência um eixo central horizontal partindo do ponto médio entre os olhos, a visualização de objetos localizados dentro de um ângulo de 40 graus é feita apenas com a movimentação dos olhos. Para objetos localizados numa região entre 40 e 90 graus o movimento dos olhos seria suficiente mas se o tempo de observação for longo a cabeça se re-orienta. Para objetos localizados fora dos 90 graus centrais a cabeça é movimentada para a visualização de um objeto.

Em minas subterrâneas com camadas de carvão de baixa potência os movimentos da cabeça nos realces é em geral muito restringido. Nas operações de perfuração e aparafusamento de teto o mineiro prefere muitas vezes mover apenas os olhos para focalizar objetos num campo mais amplo que os 40 graus centrais. Todavia se a iluminação é apenas por lâmpada de capacete esta preferência não pode ser executada pois o fecho é dependente do movimento da cabeça. Este é um problema de engenharia ambiental que pode ser resolvido por uma adequada iluminação geral de modo que a iluminação do furo seja independente da posição da cabeça do mineiro.

9.2. AMBIENTE VISUAL

Num projeto de iluminação de mina subterrânea não é suficiente se ter preocupação apenas com o sistema de percepção visual e com os parâmetros que afetam seu funcionamento. O projetista deve também se preocupar com a visibilidade dos objetos e detalhes que compõem o ambiente visual, pois este pode afetar diretamente o desempenho, a eficiência e a segurança. Para a mineração os principais parâmetros de ambientalização a serem considerados são: o contraste, a dimensão dos objetos, a fixação, o piscamento de fontes, o efeito do tempo, o ofuscamento e a visão noturna. Associados a estes parâmetros existem os conceitos de acuidade e visibilidade que estão diretamente ligados ao desempenho ocupacional. Portanto um projeto de iluminação deve considerar os fatores ambientais e suas influências na percepção visual.

9.2.1. CONTRASTE

O termo contraste se refere às diferenças em luminância e cor existentes entre um objeto e o ambiente que o rodeia [6]. Um ambiente emissor ou refletor de níveis uniformes de fluxo luminoso com composição homogênea de comprimentos de onda permitiria apenas a visualização de brilho e cor uniformes. É a percepção e discriminação das diferenças (contrastes) em brilho e cor que permite que o sistema visual receba informações úteis sobre as condições do ambiente, tais como forma, tamanho, disposição relativa, movimentação e coloração.

A detecção de contraste é a mais importante habilidade visual e a alteração do ambiente de modo a se otimizar esta atividade é um dos objetivos principais do projetista do sistema de iluminação. De modo geral a relação entre visão e contraste é de que sob uma dada condição de iluminação quanto maior o contraste maior a "facilidade" para se perceber objetos, detalhes e relações espaciais.

Existem dois tipos de contraste, o cromático (devido a composição espectral) e o luminoso (associado ao brilho). Objetos observados com um fundo de mesma luminância são ditos sob observação com contraste luminoso zero. Nestas situações eles são diferenciados do fundo por contraste cromático, o qual apesar de poder ser significativo em geral não supera 20% da visibilidade oriunda dos contrastes luminosos. Em minas subterrâneas o contraste cromático é em geral pequeno em comparação a outros ambientes de trabalho, sendo mínimo em minas de carvão. Nestas situações a visibilidade é essencialmente dependente do contraste luminoso.

O contraste luminoso é uma grandeza física mensurável operacionalmente definida pela relação:

$$C = (L_f - L_o) / L_f \quad (9.1)$$

onde: C = contraste luminoso, adimensional;

L_f = luminância do fundo, em nit;

L_o = luminância do objeto, em nit.

Alguns autores definem contraste com a subtração (L_o-L_f), o que implica apenas numa alteração de sinal sem alterar o significado físico associado à magnitude.

Assumindo-se que tanto o objeto como o fundo sejam difusores perfeitos, o contraste se torna função do iluminamento (E) e da refletância (r). Se ambos forem iluminados de modo uniforme e constante então o contraste depende apenas da refletância e a expressão (9.1) se torna:

$$C = (L_f - L_o) / L_f = (E r_f - E r_o) / E r_f$$

$$C = (r_f - r_o) / r_f \quad (9.2)$$

onde: r_f = refletância do fundo;

r_o = refletância do objeto.

Portanto o contraste pode ser controlado em certas situações pelo uso de películas superficiais como tinta ou fitas refletoras. As minas de fluorita visitadas tinham várias galerias principais todas caiadas de branco o que entre outros benefícios melhorava o contraste.

A grandeza fotométrica contraste definida pela fórmula (9.1) se mantém constante para um dado iluminamento independentemente de sua magnitude. A redução do nível de iluminamento não altera portanto o contraste mas diminui a habilidade humana de detectá-lo. Este fato é demonstrado inequivocamente com o aumento da dificuldade de leitura de uma página impressa com a correspondente diminuição da intensidade de iluminamento. Tetos de mina apresentam baixo contraste e sob baixos níveis de iluminamento aumenta a dificuldade para se perceber e observar importantes detalhes como juntas, fissuras e contorno de blocos instáveis. Nas perigosas e delicadas operações de batimento de choco e colocação de tirantes a percepção de contrastes é vital.

Experimentos conduzidos por Lewis indicaram que [6]:

- a. para luminância de fundo de 0,34 nit a percepção de um ponto preto exigia um contraste mínimo de 0,5, ou seja deveria haver uma diferença de no mínimo 50% entre as refletâncias do objeto e fundo.
- b. para uma luminância de fundo de 34,3 nit a percepção do ponto exigia apenas um contraste de 0,06, ou uma diferença de 6% entre as respectivas refletâncias.

9.2.2. DIMENSÃO DOS OBJETOS

Um dos fatores que influencia a habilidade de detectar contrastes é a dimensão dos objetos, pois é senso comum que objetos maiores são mais "fáceis de ver". A dimensão é neste contexto definida em termos de ângulo visual subentendido para compensar o efeito da distância do observador sobre o tamanho aparente do objeto.

Tamanho de objeto, contraste e nível de iluminação são grandezas interrelacionadas e a variação da magnitude de um afeta a magnitude das demais quanto a percepção do objeto. Independentemente do nível de iluminação existe um tamanho mínimo de objeto que pode ser discernido e isto decorre das próprias características fisiológicas do olho. Este limite é da ordem de 4 minutos de arco.

9.2.3. EFEITO DO TEMPO

Para um dado valor de contraste quanto maior o nível de iluminamento menos tempo é requerido para se perceber um objeto. O efeito do tempo se torna desprezível a partir de intervalos de observação maiores que 0,3 segundos. Todavia para níveis de luminância na faixa de 0,003 a 0,3 nit (que existe em muitas minas), o tempo de percepção pode ser crítico para o reconhecimento de riscos mesmo com altos contrastes. Assim mesmo para um contraste de 50% e uma luminância de 0,17 nit o tempo de reação seria da ordem de 0,3 segundos [6].

9.2.4. FIXAÇÃO

O olho é afetado no seu processo de fixação voluntária por fatores como áreas de alto brilho, contraste, cor ou uma combinação destes. Isto decorre de uma tendência involuntária para orientação do olho em direção a luz. Quanto mais intenso o estímulo maior a atração e a tendência de re-orientação.

A aproximação de uma lanterna numa travessa, os faróis de um veículo numa galeria de transporte ou o arco de solda numa oficina em subsolo podem criar uma distração fototrópica, as quais podem tornar mais difícil a fixação numa área mais escura. Distrações não desejadas reduzem a produtividade e causam desconforto visual. Em sistemas de iluminação de subsolo deve-se portanto evitar fontes puntuais intensas ou áreas de contraste tão alto que possam vir a causar distrações.

9.2.5. PISCAMENTO

Uma condição com luz piscante ou tremulante é causa de incômodo que pode causar fadiga ocular. Com uma frequência de 10 Hz cerca de 10% dos indivíduos testados apresentaram sintomas desde redução de atenção e dor de cabeça até náuseas e sintomas epiléticos [4]. Portanto o piscamento de fontes luminosas deve ser evitado principalmente na faixa de 5 a 25 Hz. Este tópico tem importância em três situações de iluminação mineira: uma relativa a lâmpadas fluorescentes, outra relativa a alternância de superfícies brilhantes e uma terceira relativa a luzes de aviso.

Lâmpadas fluorescentes ficam piscando quando tubos antigos ou defeituosos ficam produzindo múltiplas tentativas de início do processo. Eles devem ser substituídos imediatamente não só por aumentarem a fadiga e diminuírem o desempenho dos trabalhadores mas também por poderem danificar o equilíbrio da estrutura de suporte.

Com corrente alternada de 60 Hz as lâmpadas fluorescentes produzem uma alteração de intensidade com esta mesma frequência, mas esta é maior que a frequência subjetiva de fusão de imagens pelo olho e portanto nada é percebido. Todavia ela é discernível quando se observa objetos móveis principalmente se eles tiverem alta refletância especular. Este fenômeno é denominado de efeito estroboscópico e pode fazer com que partes móveis de uma máquina pareçam imóveis ou mesmo aparentem estar girando lentamente em sentido contrário. É uma ilusão de ótica que pode ser muito perigosa em oficinas devendo-se evitar o fenômeno.

O efeito estroboscópico é mais pronunciado com lâmpadas com luz do tipo solar do que com as lâmpadas dos tipos luz branca ou com tons quentes. A eliminação do problema pode ser feita de várias maneiras tais como:

- a. usando dois ou mais tubos em cada luminária e obrigando as fases a se alternarem usando um circuito de controle de avanço e retardo;
- b. usar lâmpadas que contenham compostos fosforescentes que retenham a luz durante os ciclos de luz;
- c. para lâmpadas de alta descarga pode-se colocar filas

adjacentes de luminarias acionadas por diferentes fases de uma fonte trifásica.

Com lâmpadas de tungstênio de baixa voltagem o efeito estroboscópico é minimizado pela maior espessura do filamento, tendo-se apenas uma leve variação da intensidade de luz gerada.

Uma alternância de brilho pode causar uma sub ou uma sobre-exposição da retina, a qual requer um certo tempo para se adaptar a variações de brilho. Pesquisas fisiológicas demonstraram que a alternância rítmica de duas superfícies com brilhos distintos causa um declínio de desempenho visual. Se estas superfícies tiverem contraste de valor 4 o declínio é equivalente ao causado por uma redução do nível de iluminamento de 1 000 para 30 lux [4]. Medidas preventivas contra este fenômeno incluem enclausuramento de partes móveis de máquinas, uso de cores apropriadas para o fundo e iluminação cuidadosa.

Luzes intermitentes são comumente utilizadas em minas para sinalização de aviso, tal como no último vagão de um trem. A frequência deve estar entre 1 e 1,2 Hz com a fonte dentro de uma superfície de vidro ou plástico vermelho, pois o cérebro interpreta o vermelho como um sinal de aviso e atenção.

A duração do tempo em que a fonte luminosa deve ficar apagada num elemento de sinalização piscante tem sido alvo de muitas pesquisas, pois o olho apresenta o fenômeno de persistência de imagem. Devido a este fenômeno a imagem na tela de televisão parece contínua e também um súbito lampejo parece durar mais do que na realidade. O chamado efeito Bartley se refere exatamente a este aumento de tempo e de brilho associado a pulsos de luz.

Para uma fonte intermitente com quociente sinal-ausência de sinal de 1:1 e com frequência muito alta, acima da frequência crítica de fusão, a alternância não é perceptível. A luminância aparente observada será igual a metade daquela de uma fonte com emissão constante. Todavia para frequências menores a luz intermitente parece mais brilhante que a luz contínua, e para altas luminâncias pode parecer até duas vezes mais brilhante.

Devido ao fato de luzes intermitentes parecerem durar mais e serem mais brilhantes é aconselhável manter o quociente sinal-ausência de sinal relativamente baixo, ou seja em torno de 1:5 [4]. Portanto para frequências de 1,2 Hz a luz estaria acesa 0,2 segundos e apagada 1 segundo.

9.2.6. VISÃO NOTURNA

Como os mineiros normalmente trabalham em ambientes com iluminação nas faixas de visão escotópica e mesotópica, deve ser efetuado um teste de habilidade visual nestas faixas antes de se efetivar a contratação. A habilidade de percepção com baixos níveis de iluminação é comumente denominada de visão noturna.

9.3. ACUIDADE

A acuidade visual é a habilidade de discriminar pequenos detalhes em associação com a percepção de profundidade, podendo ser entendida como o poder de resolução do olho. De modo geral as

atividades do olho não são levadas ao extremo mas isto ocorre em certas atividades da mineração tais como batimento de choccos, embocadura de furos ou desentupimento de um chute de escoamento de minério ou estéril.

A acuidade aumenta com o nível de luminância no campo visual atingindo um valor máximo para cerca de 1 600 nit [4]. Entre 0,3 e 1 600 nit a acuidade aumenta 150% e alterações de cor tem pouca influência desde que a luminância permaneça constante. A acuidade também aumenta com a diferença de luminância entre o objeto e sua circunvizinhança, e quando estas são próximas qualquer variação relativa causa grande variação na acuidade.

A acuidade é melhor para sinais ou objetos escuros com um fundo claro do que para sinais e objetos claros num fundo escuro. Ela é melhor para visão binocular do que para monocular e também melhor para fontes com luz monocromática com relação a fontes com espectro contínuo ou segmentado. Assim o olho detecta melhor detalhes com uma lâmpada de sódio de baixa pressão do que com lâmpadas de filamento de tungstênio ou fluorescentes, desde que a luminância seja a mesma.

9.4. VISIBILIDADE

A visibilidade de um objeto pode ser considerada como o grau de dificuldade encontrada para sua visualização. Operacionalmente ela é definida pelo quociente entre dois contrastes envolvendo o objeto e o campo de fundo como apresentado pela expressão (9.3) [6]:

$$V = \text{Catual} / \text{Climiar} \quad (9.3)$$

onde: V = visibilidade, adimensional;

Catual = contraste entre objeto e fundo sob um dado nível de luminância do fundo;

Climiar = contraste mínimo entre objeto e fundo de modo que ele seja percebido, para o mesmo nível de luminância do fundo.

9.5. OFUSCAMENTO

A faixa de luminâncias à qual o olho é sensível depende de sua adaptação à luminância média do campo visual. Esta faixa é limitada inferiormente pelo limiar de visão, ou seja pela luminância mínima necessária para um objeto ser visto, e superiormente pelo brilho excessivo ou indesejável.

A presença de uma fonte muito brilhante no campo visual gera efeitos adversos à visibilidade, causando prejuízos ao desempenho visual. Neste contexto o excesso de luz pode ser classificado como ofuscamento desabilitante ou ofuscamento desconfortante.

9.5.1. OFUSCAMENTO DESHABILITANTE

No ofuscamento deshabilitante há uma redução da habilidade de resolução perto da fonte luminosa que gera o excesso de luz, com a imediata e direta redução do desempenho visual. Ele pode ser medido de modo objetivo, aumenta com a idade do olho, decresce com o aumento do ângulo entre a fonte de luz e a linha de visão, decresce com a distância da fonte e depende principalmente do iluminamento da fonte de ofuscamento que recai no olho [4,6,22].

9.5.2. OFUSCAMENTO DESCONFORTANTE

O ofuscamento desconfortante causa distração da atenção com relação ao objeto que os olhos estão fixando, gerando fadiga e em casos extremos dor e desconforto intoleráveis. A pupila se contrai e dilata involuntariamente dependendo da quantidade de luz que atinge o olho.

Uma súbita variação do iluminamento de 0,5 para 100 lux causa uma redução de 50% na área da pupila mas o olho acusaria o esforço. Como o olho rapidamente se adapta ao nível mais alto de luminância o desempenho não é prejudicado mas ocorre uma influência no fator humano devido ao desconforto experimentado. Este desconforto parece ter origem no esforço executado pelos músculos do esfíncter que controlam o diâmetro da pupila, podendo se manifestar como um pequeno susto ou retraimento até dor física (como quando da exposição repentina ao arco de solda).

O ofuscamento desconfortante não pode ser medido objetivamente mas apenas subjetivamente, sendo dependente de fatores como as características fisiológicas do sistema visual do mineiro, do seu estado geral de saúde e até de seu preconceito com relação ao ofuscamento. Os métodos usuais de avaliação se baseiam em perguntar quando a sensação de ofuscamento se torna quase imperceptível, perceptível, tolerável e intolerável.

Este tipo de desconforto aumenta com a luminância da fonte e com o aumento do número de fontes no campo visual, mas decresce com o aumento do ângulo da fonte com relação a linha de visão e com o aumento da luminância nas vizinhanças da fonte de ofuscamento. Por causa deste último efeito as luzes de um carro que se aproxima pouco incomodam pouco durante o dia mas causam desconforto durante a noite. Pelo mesmo motivo quando se usa solda em garagens subterrâneas deve-se ter uma área muito bem iluminada ao redor antes de ligar o arco, de modo que a pupila esteja bem contraída.

9.5.3. REDUÇÃO DO OFUSCAMENTO

Um sistema de iluminação pode causar pequeno desconforto sem afetar a habilidade visual ou pode ter um efeito desabilitador sem causar um desconforto, e ambos podem ou não estar associados simultaneamente. A importância relativa de cada um depende do tipo e quantidade de luz disponível e do trabalho visual executado. A tabela 9.1. apresenta alguns exemplos de ofuscamento ocorrentes na mineração, onde há uma subdivisão nos tipos de ofuscamento retro-citados. Pormenores com respeito a esta subdivisão podem ser encontrados na referência indicada.

Tabela 9.1. Exemplos de ofuscamento ocorrentes na mineração. A subdivisão em subtipos pode ser encontrada em [4].

tipo	efeito	subtipos	causas	exemplo real
deshabitante	redução da visibilidade	brilho em véu	espalhamento no globo ocular	halo em torno de minerador cont. em carvão
		sucessivo	adaptação a mudança de estado	lampejo no olho provindo de lâmpada de capacete em realce não iluminado
desconfortante	fadiga visual distração irritação	saturação	luminância acima do limite de adaptação	sol em campo ou cava cobertos de neve
		por contraste	luminância acima da capacidade de adaptação atual	lampejo provindo de lâmpada de capacete em local bem iluminado

Do ponto de vista de projeto de iluminação em subsolo o ofuscamento pode ser considerado como um mau direcionamento do feixe luminoso, normalmente indo atingir diretamente os olhos em vez do objeto que se quer ver. Existem várias técnicas para se reduzir o ofuscamento sendo as principais as seguintes [4]:

- a. evitar pequenas fontes de alta luminância;
- b. utilização de fontes extensas de baixa luminância;
- c. colocação das luminárias fora do campo visual;
- d. proteger as fontes da visualização direta;
- e. utilização de lentes difusoras, filtros ou polarizadores cruzados;
- f. manutenção da diferença de luminância entre objeto e fundo em níveis baixos;
- g. manutenção da luminância do fundo e vizinhanças em níveis altos;
- h. posicionamento adequado dos locais de trabalho e das tarefas;
- i. evitar materiais especulares;
- j. utilização de luz com qualidade correta.

9.6. DESEMPENHO OCUPACIONAL

A medida final da eficiência de um sistema de iluminação deve ser o desempenho dos indivíduos que trabalham no ambiente por ele iluminado. Este desempenho pode ser quantificado em termos da eliminação de riscos e da velocidade e precisão na execução das tarefas. Um dos problemas nesta avaliação é que muitos fatores se

associam para determinar o estado final de desempenho incluindo o sistema visual, o processamento das imagens e a habilidade motora.

O significado isolado do fator visão (ou seja nível de iluminação) é difícil de interpretar, porque entre outras coisas varia de tarefa a tarefa.

A iluminação de minas subterrâneas tem características únicas por causa dos baixos níveis de iluminação quando comparados a outros tipos de indústrias. O mineiro está preparado psicologicamente para aceitar a penumbra como parte de seu emprego, uma condição em que suas pupilas ficam dilatadas e altamente sensíveis a ofuscamentos e suas consequências.

Para o projetista o ofuscamento numa mina não é uma luz muito brilhante que incomoda durante um certo tempo. Ele é encarado como um fator de redução de desempenho e aumento de risco sem que muitas vezes o observador tenha consciência disso.

Para que um trabalho mineiro seja executado rapidamente, acuradamente e com segurança o campo visual deve ser adequadamente visível e o trabalhador ter as necessárias habilidades. Portanto pode-se escrever [4]:

desempenho visual = visibilidade da tarefa + fator humano

A visibilidade da tarefa depende de quatro parâmetros mensuráveis que são:

- a. tamanho e pormenores do que deve ser visto;
- b. tempo disponível para a tarefa;
- c. contrastes de luminância e cor entre objeto e fundo;
- d. a luminância média à qual o olho se adapta durante a execução da tarefa.

Numa mina em subsolo tem-se pouco controle sobre os dois primeiros parâmetros mas pode-se alterar os dois últimos.

No aspecto humano entram inúmeros fatores tais como estado emocional, fadiga, motivação, treinamento e saúde. A contribuição destas variáveis é de difícil quantificação sendo muito complexo se analisar seus efeitos individuais sobre o desempenho visual. Todavia sabe-se que o ofuscamento causa fadiga e irritação que por sua vez causam diminuição da produtividade e aumento dos riscos de acidente.

Um importante fator humano é aquele relacionado com a idade do trabalhador. A partir dos 25 anos a força muscular diminui, os tempos de reação de mãos e pés aumentam, a velocidade de movimentação manual decresce e há um declínio do desempenho visual. Jovens trabalhadores tem melhor visão em todos os sentidos, com maior acuidade, maior campo de adaptação, maior acomodação para objetos próximos, maior resolução a distância e maior resistência ao ofuscamento.

A tabela 9.2 apresenta dados comparativos entre os requerimentos de iluminação exigidos para a leitura de um livro. A referência é o requerimento para um adulto de 40 anos para o qual se adotou o valor unitário. Desta tabela pode-se concluir que um leitor de sessenta anos precisa de 15 vezes mais iluminação que um garoto de dez anos para a leitura de um livro impresso. Outros estudos efetuados com dois grupos, um de 20 a 30 anos e o outro de 50 a 65 anos, indicaram declínio da acuidade da mesma ordem [Bodman citado em [4]]. O desempenho obtido pelo primeiro grupo com níveis de

iluminamento de 2 a 5 lux era alcançado pelo segundo grupo com níveis de 100 a 400 lux.

Tabela 9.2. Comparação de desempenho visual para diversas faixas etárias. A referência é a idade de 40 anos para a qual se adotou o valor unitário [4].

faixa etária (anos)	nível relativo de iluminamento
10 a 20	0,3 a 0,5
20 a 30	0,5 a 0,7
30 a 40	0,7 a 1,0
40 a 50	1,0 a 2,0
50 a 60	2,0 a 5,0

Portanto existem combinações de fatores que aumentam os riscos para os trabalhadores mais idosos, mas estas desvantagens podem ser parcialmente compensadas pela melhoria das condições de iluminação no ambiente de trabalho. Esta atitude é interessante também pelo fato que no ambiente hostil da mineração subterrânea o fator experiência é muito importante e ela só advém com muitos anos de vivência em subsolo.

10. SINALIZAÇÃO E CÓDIGO DE CORES

10.1. PERCEPÇÃO DE COR

Fontes luminosas produzem espectros de ondas de diferentes comprimentos de onda e o olho distingue os diferentes comprimentos por meio de cores. No espectro visível a sequência das cores por ordem de crescente comprimento de onda é violeta, azul, verde, amarelo e vermelho.

Apesar de conter três tipos de sensores para cor o olho não é capaz de fazer uma análise dos diversos comprimentos de onda, o que só é possível com um espectrofotômetro. Um grupo de sensores é estimulado pelos comprimentos de onda da faixa do azul, outro grupo é estimulado pela faixa do verde e um terceiro pela faixa do vermelho. Por meio das respostas destes três grupos de sensores e pelas reações nervosas no cérebro torna-se possível a percepção de todo o espectro de cores.

A cor de uma superfície se deve a combinação de vários comprimentos de onda, não existindo uma tinta que irradie ou reflita apenas luz monocromática. Uma tinta verde absorve a maior parte dos comprimentos de onda excepto aqueles da faixa circunvizinha a 500 nm; estes comprimentos de onda penetram o olho que percebe a tinta como verde.

O cérebro reconhece apenas uma cor e não pode definir como esta foi obtida. Assim misturando-se partes iguais de tinta azul e amarelo percebe-se a cor verde, devido aos efeitos subtrativos da tinta azul absorvendo a luz amarela, e da tinta amarela absorvendo a luz azul, de modo que resta preponderantemente a luz verde sendo refletida. Todavia ao misturarmos uma luz amarela e uma luz azul a luz obtida é cinza porque neste caso os efeitos são aditivos. Em ambos os casos o olho não consegue distinguir as diferentes cores individuais que conduzem ao resultado final.

10.2. LUZ MONOCROMÁTICA

Apesar de não existir uma "tinta monocromática" é possível se construir lâmpadas que emitem comprimentos de onda específicos. Consideremos os seguintes tipos de lâmpadas: de sódio a baixa pressão, de sódio a alta pressão e fluorescente tipo Duhelm.

A. Lâmpada de sódio a baixa pressão

A luz de uma lâmpada deste tipo é monocromática e elas tem sido bastante usadas na mineração devido a sua alta eficiência. Todavia sob esta fonte tudo se apresenta em tons de amarelo e geólogos podem ter dificuldade em mapeamentos subterrâneos porque estão acostumados a identificar rochas e minerais sob luz natural. Além disso os colegas de trabalho se apresentam com uma cor amarela típica das pessoas doentes.

B. Lâmpada de sódio a alta pressão

A luz desta fonte é na sua maior parte das regiões amarela e laranja do espectro, e as rochas tendem a serem vistas com uma cor amarelo-dourado. Numa mina de cobre onde a calco-pirita é o principal minério lavrado pode ocorrer confusão entre minério e

estéril pois ambos teriam cores muito similares.

C. Lâmpadas de Duhelm

Estas fontes são tubos fluorescentes que produzem luz verde e tem sido utilizadas em minas de carvão britânicas. A percepção visual é melhorada devido a maior sensibilidade do olho para as faixas verde-amarela mas existem inconvenientes. Um deles é o custo da película de material fosforescente que recobre a parte interna do tubo e que transmite apenas o comprimento de onda desejado. Outro inconveniente é de natureza fisiológica pois tudo é visto em tons de verde, e devido à lei do inverso do quadrado da distância e ao efeito Purkinje as cores "frias" azul e verde parecem estar mais distantes. Além disso objetos mais distantes não recebem muita luz de modo que suas tonalidades se deslocam em direção ao azul. Deste modo diferenças de cor atrapalham a percepção de profundidade e mineiros tem reclamado que as "coisas não parecem certas", talvez porque a percepção esteja prejudicada pela diminuição das informações normalmente fornecidas pelas cores [4].

10.3. CORES E IDENTIFICAÇÃO DE OBJETOS

A coloração de um objeto depende não apenas dos comprimentos de onda que ele reflete mas também dos comprimentos de onda emitidos pela fonte luminosa. Deste modo nas situações em que um código de cores é importante deve-se analisar as cores empregadas e as fontes utilizadas.

Uma placa pintada com letras nas cores vermelha e preta pode ser facilmente legível utilizando-se uma lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão, mas não se poderia dizer quais letras seriam vermelhas e quais seriam pretas. Este tipo de situação poderia ser mais crítico no caso de um electricista trabalhando num conjunto de terminais.

O uso da lâmpada de capacete torna porém as cores mais identificáveis porque esta sendo de filamento de tungstênio produz uma luz branca (a qual é uma mistura de todos os comprimentos de onda). Assim qualquer objeto colorido sob luz branca refletirá sua cor principal e absorverá as demais cores.

Lâmpadas de haletos metálicos tem menor eficiência que lâmpadas de sódio de alta pressão mas emitem um espectro mais amplo de cores, devendo ser usada quando o parâmetro cor for importante. A faixa de cores destas lâmpadas depende do haleta e da voltagem empregados.

A luz artificial realça determinadas cores e as lâmpadas incandescentes comuns realçam o amarelo, o creme e o marfim; já as fluorescentes azuladas realçam as cores azul, cinza e lilás.

Uma atividade importante na lavra é a identificação de pedaços de cordel detonante que não deflagraram durante a detonação. O uso de cores "exóticas" pode auxiliar esta atividade e certos fabricantes produzem cordeis apenas nas seguintes cores: rosa aurora, rosa neon, vermelho foguete, laranja fogo, amarelo arco, amarelo saturno, amarelo relâmpago e verde semáforo [4]. Ao se selecionar um cordel deste grupo deve-se escolher aquele que forneça o maior contraste com as superfícies vizinhas.

Situações de risco ou áreas perigosas são em geral identificadas por um código de cores, e os trabalhadores em geral reagem mais espontaneamente face a um acidente quando os riscos estão uniformemente codificados. O "American National Standards Institute" estabeleceu um "Código de Segurança de Cores para Riscos Físicos" e para o caso da mineração as de maior interesse são:

- a. cuidado - amarelo;
- b. pare - vermelho;
- c. prossiga - verde;
- d. situação de risco - listas pretas em fundo amarelo.

Este código foi elaborado de modo que as pessoas daltônicas pudessem ler as mensagens de aviso, e testes demonstraram que após estarem adaptados a uma nova fonte de luz os trabalhadores eram capazes de reconhecer estas cores padrão de segurança com níveis de iluminação de até 50 lux. Ao nível de 2 a 3 lux ocorrem dificuldades de reconhecimento para certos tipos de fontes.

Um interessante código de cores para extintores é o seguinte:

- a. extintores de pó químico - branco (porque lembra pó);
- b. extintores de CO₂ - azul (porque lembra céu e atmosfera);
- c. extintores de água - verde (porque lembra mar).

Este código de cores é empregado na mineração RPM, na lavra de ouro em Minas Gerais.

10.4. VISÃO ESCOTÓPICA

Do mesmo modo que uma lâmpada é mais eficiente se ela produz luz da faixa verde do espectro (ou do seu entorno), a cor verde é a cor mais visível do espectro. Deste modo a "melhor" cor para a parte móvel de uma máquina seria aquela que refletisse em sua maior parte luz na faixa entre 500 e 555 nm, que corresponde às cores verde e verde-amarelado. Esta cor tem sido denominada de "verde-bombeiro" ("fire truck green") porque várias cidades dos USA estão pintando seus carros de bombeiro e suas ambulancias nesta cor verde-amarelada de modo a fazer uso desta propriedade [4].

Todavia o uso de considerações visuais na escolha da cor dos equipamentos não é prática comum na indústria de manufaturados, que em geral usa cores com o intuito de uma identificação de produtos.

Nas condições de pouca iluminação, quando a visão escotópica é preponderante, as cores nas extremidade azul do espectro aparecem como tons de cinza enquanto que as cores na extremidade vermelha aparecem como pretas. Este fenômeno deriva diretamente do desvio de Purkinje e faz com que um cartaz com as cores vermelha e verde seja percebido com as cores preto e cinza, ou seja, o verde continua mais visível que o vermelho.

10.5. DALTONISMO

A impossibilidade do olho distinguir cores pode ter origem em fatores genéticos, em doenças oculares ou mesmo em atitudes

como consumo excessivo de bebidas e cigarros.

O daltonismo total, em que o mundo é percebido apenas em tons de cinza, é muito raro. O daltonismo mais comum se refere ao par verde-vermelho mas existe também com relação ao par azul-amarelo.

Cerca de 10% dos homens e 1% das mulheres sofre de algum tipo de daltonismo, e estudos levados a termo pelo "Chamber of Mines" da Africa do Sul indicaram que 8% dos mineiros brancos sofriam de daltonismo enquanto que apenas 1,4% dos mineiros negros apresentavam daltonismo.

O daltonismo não impede o trabalho em subsolo mas deve-se evitar que daltônicos executem certas tarefas que envolvam código e cores como a amarração de grandes malhas de detonação acionadas eletricamente onde uma conexão errada pode originar curto-circuito.

10.6. VISIBILIDADE E REFLETANCIA

O tempo de percepção diminui com o aumento da visibilidade pois a velocidade desta reação é proporcional à quantidade de luz que atinge o globo ocular. Portanto diminuindo o tempo de reação tem-se mais tempo disponível para uma reação de segurança ou de defesa.

A visibilidade de um objeto depende da quantidade de luz incidente, da sua refletância e das condições da atmosfera.

A refletância de uma superfície depende da composição espectral da luz incidente, do ângulo de incidência, da natureza e estado da superfície refletora. Para paredes lisas alguns valores médios da refletância para diversas cores são [18]:

- a. branco - 0,88;
- b. creme - 0,69;
- c. amarelo-pálido - 0,65;
- d. azul claro - 0,65;
- e. verde-pálido - 0,59;
- f. cinza-claro - 0,55;
- g. camurça - 0,52;
- h. cinza-neutro, rosa-claro, verde-claro - 0,50;
- i. turquesa-claro - 0,35;
- j. vermelho - 0,15;
- k. verde-escuro, turquesa-escuro - 0,10;

A escolha das cores deve também ser adequada para facilitar a distinção entre o perfil de uma peça e sua área de trabalho, entre a área de trabalho e a máquina, e entre a máquina e o fundo próximo. Assim além de se obter uma boa visibilidade deve-se evitar a fadiga ocular derivada de excessivos contrastes. O contraste entre duas superfícies (ser definido como o quociente entre a diferença das refletâncias divididas pela maior delas) pode ser classificado como [18]:

- a. contraste alto - entre 0,40 e 0,80;
- b. contraste médio - entre 0,20 e 0,40;
- c. contraste baixo - entre 0,05 e 0,20.

A alta refletância de uma superfície pode ser até mais importante que a cor quando se analisa o vestuário, o capacete, as máquinas e os equipamentos usados na mineração subterrânea. Neste contexto capacetes brancos são uma boa alternativa em

subsolo.

A visibilidade pode ser aumentada por meio de materiais de alta visibilidade, e os três tipos mais usados em minas são os fosforescentes, os fluorescentes, e os retro-refletivos.

Os materiais fosforescentes contém átomos que são excitáveis através da luz ultra-violeta ou radiatividade e que ao retornarem ao estado natural emitem luz visível. O processo é lento e estes materiais brilham por um certo tempo após a retirada da fonte mas a luz emitida é relativamente fraca.

Os materiais fluorescentes são também excitáveis pela luz ultra-violeta mas retornam rapidamente ao seu estado natural assim que a fonte excitadora deixa de existir. Na mina de Texasgulf no Canadá todos os mineiros de subsolo tem que usar coletes fluorescentes para assegurar que os pedestres sejam claramente visíveis aos operadores de veículos.

Os materiais retro-reflexivos retornam a luz em direção a sua fonte, e os melhores resultados são obtidos com o observador próximo a esta. A Anaconda Wire and Cable produz uma linha de transmissão de 600 V denominada "Linha Brilhante" que utiliza um plástico retro-reflexivo especial. Este plástico contém moldados internamente 70 prismas por milímetro quadrado, os quais são fechados e não são afetados pela umidade, além de serem facilmente limpos. A "Linha Brilhante" contém de cada lado uma faixa de 6 mm deste plástico retro-reflexivo de modo a auxiliar na visibilidade do cabo e diminuir o numero de danos oriundos da passagem indevida de veículos sobre ele.

10.7. CLASSIFICAÇÃO DE CORES E SEGURANÇA OCUPACIONAL

O uso criterioso das cores pode tornar o ambiente de trabalho mais atrativo, melhorar as condições de visibilidade e contraste, diminuir a fadiga visual, tornar os avisos mais legíveis e auxiliar na segurança. Uma mina não é um ambiente para ser pintado como uma casa mas por ser um local de trabalho de elevado risco e com condições adversas, sempre que possível deve-se tirar partido das propriedades e combinações de cores.

Num ambiente de trabalho a escolha das cores depende da função do ambiente, da escala (dimensões) do ambiente e do tipo psicológico das pessoas que usarão o ambiente.

As cores podem ser classificadas de várias maneiras tal como "frias", "quentes", "leves" e "pesadas" e a tabela 10.1 relaciona estes adjetivos com algumas faixas de comprimento de onda.

As cores "frias" proporcionam um efeito psicológico refrescante, favorecem a introspecção, são tranquilizadoras e repousantes. Aparentemente aumentam as dimensões de um ambiente quando se está dentro dele e "reduzem" as superfícies de cartazes e de placas.

As cores "quentes" aumentam a temperatura do ambiente, favorecem a extroversão e o dinamismo, e são excitantes. Aparentemente diminuem as dimensões dos ambientes e aumentam as superfícies de avisos e cartazes.

As cores "leves" devem ser usadas preferencialmente na direção vertical, enquanto que as "pesadas" devem ser usadas preferencialmente na horizontal. Do mesmo modo as tonalidades claras devem estar preferencialmente nas partes superiores enquanto

que as tonalidades escuras devem ocupar a base.

Tabela 10.1. Classificação de cores e comprimento de onda [18].

faixa de coloração	comprimento de onda (nm)	"temperatura"	"peso"
violeta	400 a 430	fria	pesada
azul	430 a 500	fria	pesada
verde	500 a 570	fria	leve
amarelo	570 a 590	quente	leve
laranja	590 a 610	quente	leve
vermelho	620 a 700	quente	pesada

10.8. CÓDIGO DE CORES E SEGURANÇA

A utilização da cor na segurança do trabalho deve seguir a Norma Regulamentadora no. 26 da Portaria 3 214 do Ministério do Trabalho e as Normas da ABNT NB-76 e NB-54. Estas normas tem por objetivo fixar as cores que devem ser usadas nos locais de trabalho para prevenção de acidentes, identificando os equipamentos de segurança, delimitando áreas, caracterizando as canalizações de líquidos e gases e advertindo contra riscos existentes. A utilização de cores não dispensa o emprego de outras formas de prevenção de acidentes e deve ser tal que não induza distração, fadiga ou confusão ao trabalhador. Sempre que necessário a indicação de cor deverá ser acompanhada de sinais convencionais ou por palavras.

As principais cores utilizadas são o vermelho, o amarelo, o branco, o preto, o azul, o verde, o laranja, o púrpura, o lilás, o cinza, o alumínio e o marrom [37].

A. Vermelho

O vermelho deve ser usado para indicar equipamentos de combate a incêndios, mas não para indicar perigo por ser de pouca visibilidade em comparação com o amarelo e o alaranjado (que significa alerta). Deve ser empregado para identificar:

- caixa de alarme de incêndio, hidrantes, bombas e sirenes de alarme;
- caixas com cobertores abafa-chama, extintores e indicações de localização de extintores;
- localização de mangueiras, baldes, tubulações e sistemas de aspersão de água ("sprinklers");
- transporte com equipamentos de combate a incêndio e portas de saída de emergência.

Excepcionalmente a cor vermelha poderá ser usada no sentido de

advertência de perigo, principalmente em:

- a. luzes colocadas em barricadas, tapumes e outras obstruções temporárias;
- b. em botões de interruptores de circuitos elétricos para paradas de emergência.

B. Amarelo

O amarelo deve ser empregado para indicar "cuidado" nas situações de:

- a. corrimões, parapeitos, pisos e partes inferiores de escadas que apresentem risco, e espelhos de degraus de escadas;
- b. bordos desguarnecidos de poços e entradas subterrâneas, e de plataformas que não possam ter corrimões;
- c. bordas horizontais de portas de elevadores que se fecham verticalmente, pisos de plataformas de carregamento;
- d. meio-fios, paredes de fundo de corredores sem saída, vigas colocadas a meia altura;
- e. cabines, caçambas e "gatos" de pontes-rolantes, guindastes, e escavadeiras;
- f. equipamentos de transporte e manipulação de materiais como empilhadeiras, tratores, vagonetas e reboques;
- g. pilastras, vigas, postes, colunas e partes salientes de estruturas e máquinas nos quais se possa esbarrar;
- h. cavaletes, porteiras e lanças de cancelas;
- i. fundos de letreiros e avisos de advertência, bandeiras com sinal de advertência (em combinação com preto);
- j. para-choques de veículos de transporte pesados, com listas pretas.

Listas verticais ou horizontais e quadrados pretos poderão ser usados sobre o amarelo quando houver necessidade de melhorar a visibilidade de sinalização.

C. Branco

Esta cor deverá ser utilizada em:

- a. passarelas e corredores, além de sinais de direção e circulação;
- b. localização de bebedouros e coletores de resíduos;
- c. áreas em torno dos equipamentos de socorro de urgência, de combate a incêndio ou outros equipamentos de emergência;
- d. áreas de armazenagem ou zonas de segurança.

D. Preto

Deverá ser utilizado para indicar as canalizações de inflamáveis e combustíveis de alta viscosidade como óleos lubrificantes, asfalto, alcatrão e piche.

E. Azul

Esta cor deverá ser usada em:

- a. canalizações de ar comprimido;
- b. avisos de fontes de potência, pontos de partida ou comando de máquinas e equipamentos;
- c. prevenção de movimentos acidentais de equipamentos em manutenção, com o sentido de cuidado.

F. Verde

O verde é a cor que caracteriza segurança, devendo ser utilizado para identificar:

- a. canalizações de água, fontes lavadoras dos olhos e chuveiros de segurança;
- b. caixas de equipamentos de socorros de urgência, macas, e envólucros de máscaras contra gases;
- c. localização de EPI, caixas com EPI, emblemas de segurança;
- d. portas de entrada para salas de curativos de emergência, quadros para exposição de cartazes e avisos de segurança;
- e. mangueiras de oxigênio.

G. Laranja

Esta cor deverá ser usada para identificar:

- a. canalizações contendo ácidos;
- b. partes móveis de máquinas e equipamentos, partes internas das guardas das máquinas que possam ser removidas, dispositivos de corte, bordas de serras e prensas;
- c. faces internas de caixas protetoras de dispositivos elétricos;
- d. faces externas de polias e engrenagens, botões de arranque de segurança.

H. Púrpura

Deve ser empregada em associação com os perigos provenientes das radiações eletromagnéticas penetrantes (radiações nucleares) como em:

- a. portas que dão acesso a locais onde se manipula ou armazena materiais radiativos;
- b. recipientes de materiais nucleares, sinais luminosos que indiquem equipamentos produtores de radiações e partículas nucleares.

I. Lilás

Deverá ser usado para indicar canalizações que contenham álcalis, e as refinarias de petróleo poderão usá-lo para a identificação de lubrificantes.

J. Cinza

O cinza claro deverá ser usado para canalizações em vácuo e o cinza escuro para identificar eletrodutos.

K. Alumínio

O alumínio poderá ser usado em canalizações contendo gases inflamáveis e combustíveis de baixa viscosidade como óleo diesel, gasolina, querosene, óleo lubrificante, etc.

L. Marrom

Esta cor pode ser utilizada a critério da empresa para identificação de quaisquer fluidos não anteriormente citados.

Algumas sugestões em termos de cor no ambiente de trabalho são as seguintes [37]:

- a. o corpo das máquinas deverá ser em branco, preto ou verde.
- b. as canalizações industriais para líquidos e gases devem ser coloridas em toda a sua extensão, e a canalização de água

potável deve ser diferenciada das demais. Quando houver a necessidade de uma identificação mais detalhada sobre concentração, temperatura, pureza, pressão, etc, se usará faixas de cores diferentes aplicadas sobre a cor básica.

- c. os depósitos ou tanques fixos que armazenem fluidos deverão ser pintados com as mesmas cores que as canalizações.

10.9. SINALIZAÇÃO

Uma das mais importantes características de uma sinalização é que ela deve provocar imediata reação a sua mensagem, sem perda de tempo para cuidadosa leitura e interpretação. A figura 10.1. apresenta dois tipos de sinalização que ilustram esta característica.

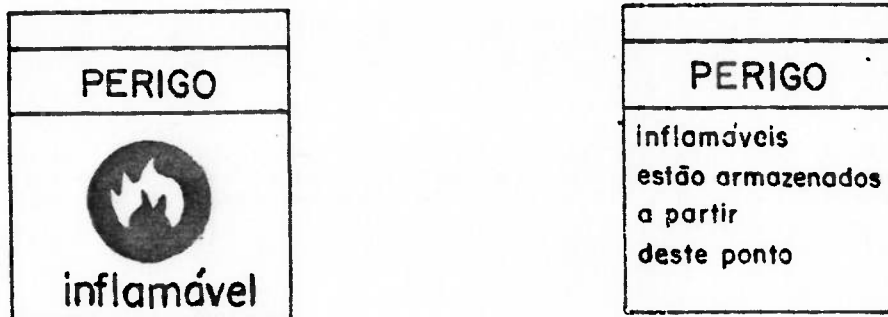


Figura 10.1. O aviso da esquerda provoca imediata reação no leitor enquanto que o da direita requer um certo tempo de percepção [18].

Outra característica importante da sinalização é a sua uniformidade de modo que não só os operários de visão normal se familiarizem com as mensagens que são transmitidas mas também os eventuais daltônicos e analfabetos. Os sinais de prevenção de acidentes podem ser classificados e adaptados aos seguintes cinco tipos [18]:

- a. sinais de perigo - para indicação de perigos específicos;
- b. sinais de atenção - para indicação de práticas inseguras ou situação de risco;
- c. sinais de instrução - para dar informações sobre ações e atitudes seguras de modo geral;
- d. sinais de direção - para indicação de saídas e escadas que envolvam segurança;
- e. sinais de simples informação - para mensagens de natureza geral sobre itens não anteriormente prescritos.

A. Sinais de perigo

Deverão conter um fundo branco sobre o qual aparecerá um oval de cor vermelha dentro de um retângulo preto. Uma linha branca separará o perímetro externo do oval vermelho do retângulo preto. A palavra "perigo" aparecerá em branco dentro do oval vermelho. O conjunto deverá ser locado na parte superior da área total da placa, e as dimensões relativas do oval e da palavra "perigo" variarão de acordo com a dimensão total da placa. As mensagens na parte inferior devem ser completas e breves. A figura 10.2. ilustra este tipo de sinalização.

B. Sinais de atenção

Devem conter um retângulo preto sobre um fundo amarelo. A palavra "atenção" em cor amarela deverá ficar centralizada no retângulo preto, o qual deve ficar na parte superior da área total do aviso. A figura 10.3. ilustra este tipo de sinalização.

C. Sinais de instrução

Devem conter um retângulo verde sobre fundo branco, e localizado na parte superior da área total do aviso. As letras serão em branco sobre o retângulo verde. Qualquer mensagem deverá estar locada na parte inferior em letras pretas sobre o fundo branco. A figura 10.4. ilustra este tipo de sinalização.

D. Sinais de direção

Terão um fundo branco com setas brancas sobre um retângulo preto. A mensagem deverá ser pintada na parte inferior, com letras brancas sobre fundo preto. A figura 10.5. ilustra este tipo de sinalização.

E. Sinais de simples informação

Deverão conter um retângulo azul sobre fundo branco, localizado na parte superior da área total. As letras deverão ser brancas sobre o retângulo azul. Qualquer mensagem se localizará na parte inferior, em letras pretas sobre o fundo branco. A figura 10.6. ilustra este tipo de sinalização.

Outra característica importante de um aviso se refere aos símbolos empregados. As figuras 10.7. e 10.8. ilustram alguns dos símbolos mais usuais. A simbologia para tipos de lâmpadas apesar de ser usual para fabricantes e projetos de minas não é oficial.

As cores de um cartaz ou aviso dependerão da finalidade da comunicação, dos efeitos emocionais que se queira obter, das dimensões e da visibilidade requerida. Em termos de visibilidade e contraste temos grupos combinatórios de cores de alta ou baixa visibilidade tal como:

A. grupo de alta visibilidade -

- amarelo sobre preto ou preto sobre amarelo;
- branco sobre preto;
- branco sobre azul marinho;
- amarelo sobre vermelho;
- branco sobre vermelho;
- preto sobre branco;
- vermelho sobre amarelo;
- azul sobre branco ou vermelho sobre branco.



Figura 10.2. Sinalização de perigo [18].



Figura 10.3. Sinalização de atenção [18].



Figura 10.4. Sinalização de instrução de segurança [18].

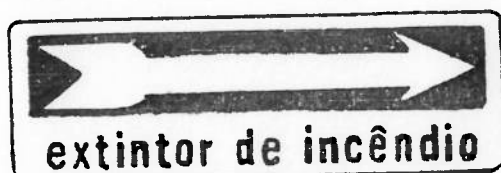


Figura 10.5. Sinalização de direção [18].

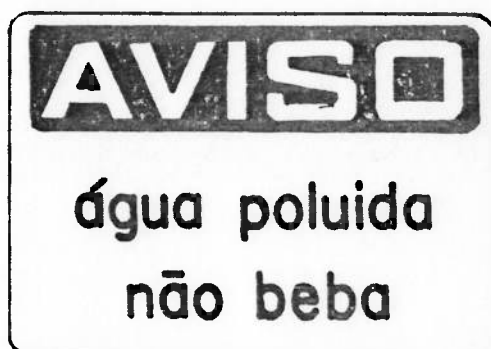


Figura 10.6. Sinalização de simples informação [18].

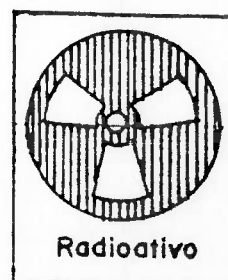


Figura 10.7. Símbolos mais usuais [18].

B. grupo de baixa visibilidade -
vermelho sobre verde ou vice-versa;
verde sobre azul ou vice-versa;
cinza sobre verde ou vice-versa;
cinza sobre preto ou vice-versa.



sódio a baixa pressão

sódio a alta pressão

fluorescente



haleto metálico

filamento de tungstênio

vapor de mercúrio

Figura 10.8. Simbologia usual para tipos de lâmpadas [4].

11. LÂMPADAS E LUMINÁRIAS

11.1. PRODUÇÃO LUMINOSA

A criação das lâmpadas de segurança ajudou a minimizar o problema de explosão de gás enquanto que a utilização da lâmpada de capacete permitiu a eliminação da doença nistagmus. Atualmente o problema central da iluminação de minas é como prover as apropriadas quantidade e qualidade de luz de modo a maximizar a segurança, o desempenho e o estado de espírito com o menor custo.

As fontes de luz utilizadas na mineração produzem luz ou por incandescência ou por fotoluminescência, havendo grandes diferenças quanto ao seu modo de operação, ao custo de investimento, à quantidade e qualidade da luz gerada.

A incandescência é a emissão de luz visível por meio de um corpo a alta temperatura. O espectro obtido é contínuo e a relativa energia na região visível depende da temperatura do filamento (ou da superfície emissora). Dentre as lâmpadas incandescentes podemos citar as de filamento de tungstênio, as halógenas de quartzo ou aquelas em que um gás é queimado dentro de uma fina malha.

A fotoluminescência resulta da colisão de átomos de um gás neutro com elétrons emitidos por um arco de tubo de descarga. A colisão excita os átomos tirando seus elétrons de órbita e estes ao retornarem emitem radiação na região visível ou ultravioleta do espectro. A radiação ultravioleta pode ser utilizada para excitar uma película fosforescente colocada nas paredes do bulbo e este segundo processo de excitação pode produzir radiação na faixa visível do espectro. Dentre as lâmpadas fotoluminescentes se incluem as fluorescentes comuns, as de sódio a baixa pressão, e as de descarga com alta intensidade (de mercúrio, de haletos metálicos e de sódio a alta pressão).

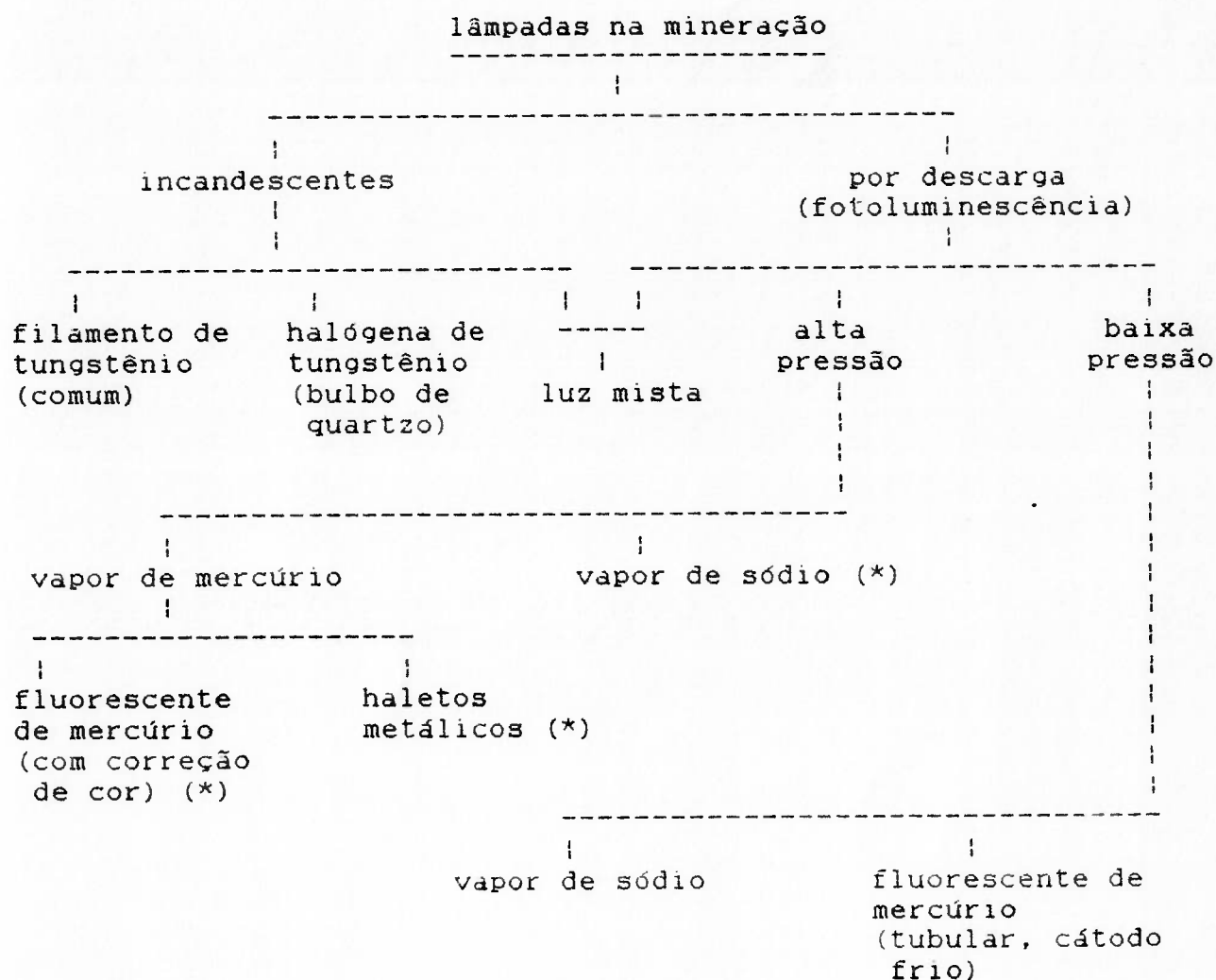
A figura 11.1. apresenta uma classificação de lâmpadas baseada na origem da sua produção luminosa.

11.2. CRITÉRIOS COMPARATIVOS

Para a elaboração de projetos de iluminação de minas é necessário que se conheça as principais características das lâmpadas disponíveis comercialmente.

Existem muitos critérios para se comparar fontes luminosas e os principais são [22]:

- a. luminância da fonte - este parâmetro fornece uma indicação da magnitude dos problemas de ofuscamento que podem ser gerados. Quanto menor a luminância ambiental mais grave pode vir a ser o problema.
- b. vida útil - quanto maior a vida útil menor tenderá a ser a perda por equipamentos parados para a troca de lâmpadas.
- c. eficiência luminosa - é a relação entre o fluxo total emitido e a potência total consumida, e o uso de fontes de baixa eficiência implica na utilização de maior número de lâmpadas, o que irá consumir potência adicional.



(*) HID

Figura 11.1. Classificação dos tipos de lâmpadas a partir do tipo de produção luminosa [23]. Outros tipos de lâmpadas baseadas em eletro-luminescência, quimio-luminescência e alterações atômicas não estão representadas. Todavia elas são fontes consideradas de baixo brilho [22]. A sigla HID significa "high intensity discharge" ou descarga de alta intensidade e é uma terminologia muito usada. A terminologia de lâmpadas tipo PAR, EAR e R não se aplica a tipo de fonte mas a métodos de reflexão usados no bulbo ou em partes da luminária.

- d. nível de lúmens emitidos - é definido como o quociente entre os lúmens emitidos no início do uso da fonte e quando se atingir 70% da sua vida útil estimada. Este parâmetro fornece uma indicação da uniformidade de produção luminosa ao longo da vida da lâmpada e uma estimativa da necessidade de correção quanto ao nível de iluminação desejado.
- e. alteração de cor - se refere ao efeito de uma fonte sobre a coloração de um objeto sob luz solar. Para as máximas acuidade e percepção de detalhe os objetos devem ser percebidos nas suas cores reais.
- f. dimensão ótica - se refere às dimensões físicas do elemento gerador de luz. Sistemas óticos com dimensões compactas permitem controle preciso da luz emitida, e na mineração é importante também o problema de espaço reduzido.
- g. posicionamento durante funcionamento - este parâmetro se refere às propriedades ótico-físicas da fonte com relação às possíveis orientações durante operação. O projeto de luminárias compactas se baseia neste parâmetro e na dimensão ótica.
- h. resistência mecânica - se refere tanto a resistência ao choque como a vibrações. Na mineração há preferência para fontes com filamentos grossos e vidros sólidos com relação a fontes com filamentos finos, não apoiados e vidraria frágil.
- i. potencial térmico - podem surgir problemas de temperatura com a utilização de certas fontes em combinação com certas luminárias. Fontes de emissão concentrada e baixa eficiência geram problemas que não ocorrem com fontes maiores, menos intensas e de maior eficiência.
- j. segurança intrínseca - é a característica de não transmitir a atmosfera da mina suficiente energia para a ignição de metano e poeira. Esta propriedade deve-se manter mesmo com a ruptura do bulbo.
- k. necessidade de equipamentos auxiliares - numa mina a necessidade de equipamentos auxiliares grandes e complexos para o funcionamento de uma fonte é indesejável.
- l. tempo de reinício - na mineração deve-se procurar fontes que tenham pequenos tempos para início de operação e atinjam a emissão plena em pouco tempo.

11.3. TIPOS DE LÂMPADAS

Uma descrição detalhada de cada tipo de lâmpada pode ser encontrada na literatura (referências 1,4,5,8,22,23) e nos catálogos dos fabricantes. A sucinta descrição apresentada tem por objetivo uma noção das características operacionais de cada uma de modo a se poder ter um mapa comparativo das principais lâmpadas utilizadas na mineração.

11.3.1. LÂMPADAS COM FILAMENTO DE TUNGSTÊNIO

É também conhecida simplesmente por lâmpada incandescente pois contém um filamento aquecido até a incandescência, sendo a lâmpada mais usada na mineração subterrânea. É muito empregada

nos capacetes mineiros, em equipamentos móveis e em redes fixas de iluminação, existindo uma tendência gradual de sua substituição por métodos mais eficientes de iluminação [4].

Pode ser encontrada com enorme variedade de forma de bulbo, tipo de soquete e características de filamento, com a potência variando desde 0,1 até 20 000 W.

O gás de preenchimento para as lâmpadas de 40 W ou mais é normalmente uma mistura de nitrogênio e argônio numa proporção que depende da potência individual. Para potências inferiores a 40 W em geral elas são do tipo "a vácuo".

O filamento de tungstênio opera na faixa de temperatura de 2 500 a 3 300 K, emitindo um espectro contínuo de radiação que todavia não é igual ao espectro da luz solar. É produzida uma luz branca mas como apenas uma pequena porção da energia espectral pertence ao domínio visível (com a maior parte sendo da região do infra-vermelho), este tipo de lâmpada produz muito calor.

As perdas de gás são menores com filamentos mais grossos e portanto as lâmpadas de 120 volts são mais eficientes que as de 240 volts, com a máxima eficiência sendo atingida entre 12 e 20 volts. Flutuações na voltagem causam variações sensíveis do fluxo emitido; 10% de variação na voltagem pode causar uma queda de 70% na emissão.

As condições ambientais em minas são muito particulares e para cada situação deve ser escolhida a lâmpada mais adequada. Para tanto existe uma ampla variedade de subtipos especiais e o maior custo pode vir a ser compensado por características únicas. Os principais subtipos disponíveis são:

- a. de capacete;
- b. para vibração;
- c. para serviços robustos;
- d. com vida útil prolongada;
- e. para aquecimento;
- f. de segurança.

Nas lâmpadas de capacete se deseja alta eficiência e a mistura de nitrogênio e argônio é substituída por outros gases inertes com menores condutividades térmicas. Estes gases são muito caros para serem utilizados nas lâmpadas comuns e o mais empregado no preenchimento do bulbo é o criptônio. Este gás é introduzido a uma pressão de cerca de 80% da pressão atmosférica e quando em operação esta pressão sobe para um valor próximo da atmosférica.

As lâmpadas especiais para vibração são construídas com um fio mais flexível de tungstênio e contém um maior número de suportes. Estes suportes adicionais aumentam as perdas térmicas e diminuem a eficiência. Estão disponíveis com potência de 25 a 150 W, devendo ser operadas na posição vertical e não resistem a choques intensos. Os locais mais indicados para estas lâmpadas são as câmaras de britagem, os salões de bombeamento e as instalações de correias transportadoras, pois normalmente ocorrem vibrações de baixa amplitude.

Lâmpadas robustas são construídas com filamento resistente a choque e contém suportes extras os quais aumentam a perda térmica e diminuem a eficiência. Possuem potência na faixa de 25 a 500 W e podem ser operadas em qualquer posição mas não são projetadas para resistir a vibração pois o filamento é feito com fio não flexível. Elas são utilizadas em locais onde se

tem choques oriundos de desmonte por explosivo e de fogachos, tais como dentro e nas proximidades de realces de produção, junto a chutes, bicas de escoamento e chaminés de transferência, ou mesmo grelhas. Como muitas vezes choques e vibrações estão associados num mesmo local pode ser necessário escolher e experimentar lâmpadas robustas e para vibração, selecionando a que se adaptar melhor.

Lâmpadas com vida prolongada são indicadas para locais onde a substituição é complicada devido a problemas de espaço e localização. Locais com estas características são estações de britagem, chaminés e poços internos ou oficinas de manutenção com teto elevado. São indicadas para minas onde os custos elétricos sejam baixos e os custos de mão de obra sejam altos. Situações de custo mais baixo de eletricidade ocorrem quando a mina gera suas necessidades via pequena hidrelétrica ou mesmo queimando metano. A faixa de potência vai de 40 a 1 500 W e enquanto uma lâmpada normal tem vida em torno de 1 000 horas as de vida longa atingem 2 500 a 3 000 horas. O aumento da vida útil se faz às custas de uma diminuição da produção luminosa de cerca de 15%.

Como fontes de luz as lâmpadas para aquecimento são ineficientes em comparação com as lâmpadas comuns, pois tem sua curva espectral de distribuição luminosa deslocada para a região do infra-vermelho. Todavia são eficientes emissoras de energia radiante não aquecendo o ar mas diretamente as superfícies para as quais forem orientadas. Elas tem utilização principalmente em países com inverno rigoroso como o Canadá, a Rússia, a Finlândia, a Noruega e a Dinamarca, sendo usadas nos locais de difícil aquecimento devido a alta vazão de ar requerida. São usadas em abrigos, garagens, depósitos, refeitórios e armários para manter cobertores secos e quentes. No caso do nitrato de amônia estocado elas são importantes para evitar a umidade que deteriora rapidamente este composto usado nas detonações.

Algumas lâmpadas de segurança são construídas para se manterem "intactas" após um impacto. Elas tem o bulbo recoberto por uma película transparente de silicone que absorve parte do choque e reduz a possibilidade de quebra. Se ocorrer a quebra não ocorre estilhaçamento e como a película é transparente a perda luminosa é de menos de 5% em comparação com uma lâmpada comum. Em minas úmidas o gotejamento de água pode trincar os bulbos comuns mas as de segurança permanecem intactas. O criptônio usado nas lâmpadas de capacete é também empregado em certas lâmpadas de alta potência especialmente projetadas para serem expostas a umidade. Ele é um gás inerte que conduz calor do filamento mais devagar que argônio ou nitrogênio, aumentando a eficiência em cerca de 10% e diminuindo o escoamento da bateria. Ele mantém a temperatura do bulbo suficientemente baixa de modo que expansões ou contrações associadas a súbitos resfriamentos não trincam o vidro. A vida útil da lâmpada também aumenta mas seu custo também é maior, da ordem de 50% mais.

Lâmpadas incandescentes podem causar problemas de ofuscamento e existem tipos que apresentam uma barreira protetora antes do filamento o qual serve também para orientar os raios e eliminar um halo que as vezes surge na parte central do feixe. Esta barreira opera em conjunto com uma superfície refletora existente após o filamento. Alguns tipos serão descritos no item 11.3.8.

11.3.2. LAMPADAS HALÓGENAS DE TUNGSTÊNIO

Este tipo de lâmpada foi introduzido na década de sessenta e representou um avanço na tecnologia de filamentos, introduzindo vantagens na área do controle preciso de luz tais como em faróis de veículos. Elas tem eficiência maior que as incandescentes comuns (entre 20 e 27 lm/W) e são muito brilhantes (em torno de 16 milhões de nit). A temperatura operacional é muito alta, na faixa de 3000 a 3400 K, com emissão de uma luz branca. Devido ao alto brilho, à alta temperatura do filamento e às reduzidas dimensões do bulbo ela se aproxima do que se denomina uma fonte puntual de alta intensidade. Portanto tem alto potencial para causar problemas de ofuscamento.

O halogênio por si só não aumenta a vida útil ou a eficiência mas age como um catalizador no chamado "ciclo do iodo". O halogênio mais usado é o iodo que é introduzido junto com o gás de preenchimento. Durante o funcionamento ele se combina com qualquer vapor de tungstênio e impede o escurecimento do bulbo.

Para resistir às altas temperaturas o bulbo é normalmente fabricado com quartzo ou vidro muito duro que são mais difíceis de manuseio para os fabricantes.

11.3.3. LAMPADAS FLUORESCENTES A VAPOR DE MERCÚRIO

Estas lâmpadas de arco de descarga a baixa pressão são constituídas por um longo tubo contendo vapor de mercúrio e eletrodos, com as extremidades vedadas. Acima de uma dada diferença de potencial entre os eletrodos o gás fica excitado e flui a corrente elétrica. A radiação devida a descarga do gás tem um espectro descontínuo apresentando apenas uma pequena parte da energia na faixa do azul visível, com uma concentração na faixa de 200 a 300 nm.

Na superfície interna do tubo existe uma película colocada na forma pulverulenta e composta por substância que tem a propriedade de ser excitada pela radiação ultra-violeta e re-emitir energia na faixa do espectro visível ("phosphor"). Esta substância componente da película é composta de certos silicatos, boratos, fosfatos ou tungstatos. Cerca de 90% da luz é derivada por fluorescência sendo o restante oriundo das linhas visíveis do espectro do mercúrio.

A distribuição de cores depende da mistura de componentes da película podendo-se com cuidado produzir a cor desejada. A cor conhecida como "branco frio" é produzida por uma mistura que gera uma distribuição espectral aproximada da cor oriunda de incandescência a 4500 K, ou seja da luz do dia. Lâmpadas fluorescentes altamente eficientes e na cor verde maçã já tem sido recomendadas na literatura para iluminação de faces de extração em carvão [4].

A inicialização das lâmpadas fluorescentes pode ser efetuada por pré-aquecimento, quando alguns segundos podem ser requeridos. As lâmpadas de rápida partida ou mesmo partida instantânea raramente são utilizadas na mineração pois as fluorescentes normalmente nunca são desligadas, o que minimiza o risco de choque e de faíscas. Outro sistema de partida é o de cátodo frio

que permite que os tubos tenham as formas mais variadas. Antigamente tubos circulares de 40 W e diâmetro de 25 cm eram utilizados na Inglaterra.

Lâmpadas fluorescentes tem vida útil consideravelmente maior que lâmpadas incandescentes pois na mineração estas últimas apresentam excessiva quebra de filamento devido a choques e vibrações. Dependendo da potência a vida útil varia de 500 a 30 000 horas.

A eficiência luminosa varia de 35 a 85 lm/W e a luminância varia de 5 000 a 20 000 nit, e elas são apropriadas para se minimizar problemas de ofuscamento.

11.3.4. LÂMPADAS A VAPOR DE SÓDIO A BAIXA PRESSÃO

Este tipo de lâmpada tem sido usado há mais de quatro décadas mas nunca foi muito popular. Compõe-se essencialmente de um tubo em forma de U, resistente a sódio e recoberto com uma película de borato, e contido dentro de um cilindro de vidro. O cilindro externo de vidro é por sua vez recoberto internamente por um óxido de índio que aumenta a eficiência e reduz as perdas térmicas. Dentro do tubo interno em forma de U existe uma pequena quantidade de sódio que quando em operação se encontra à temperatura de 235 graus. Gases inertes como neônio, argônio, xenônio e hélio estão também presentes para auxiliar a partida. Entre o tubo externo e o interno se produz alto vácuo para minimizar as perdas térmicas convectivas.

No processo de inicialização pode-se demorar até quinze minutos para se atingir pleno brilho, e ser necessário um a dois minutos para reinício após uma queda de corrente.

A luminância obtida é da ordem de 100 000 nit, a eficácia é alta podendo atingir 183 lm/W, e a vida útil varia entre 10 000 e 18 000 horas. A produção luminosa se mantém durante a vida útil e variações de condição ambiente não a afetam.

As fontes de sódio a baixa pressão produzem luz monocromática a qual não produz aberração ao penetrar pelo cristalino, ou seja, forma-se apenas uma imagem ao contrário da luz branca que origina várias imagens. A formação de uma única imagem permite uma focalização mais fácil e mais precisa, havendo evidências de que a acuidade é 10% melhor com relação a fontes com espectro contínuo ou descontínuo [4].

As lâmpadas de sódio a baixa pressão tem a mais alta eficiência e são mais utilizadas na indústria mineira do que em outros tipos de indústria. As perdas por transmissão são menores porque a luz amarela tem um baixo índice de refração e não é muito afetada pela difração. Assim dentro da mina a luz amarela não altera muito sua direção ao passar por gotas de água (refração) ou ao passar por poeira em suspensão (difração). Ela tem portanto bom poder de penetração em atmosferas enevoadas ou empoeiradas.

A curva espectral da luz emitida tem pico em 589 nm, valor próximo a máxima resposta do olho humano que ocorre para 555 nm para visão fotópica. Assim os cones operam eficientemente enquanto os bastonetes não estão plenamente adaptados e portanto estão "preparados" para serem utilizados assim que o mineiro se deslocar para uma área mais escura da mina.

A luz emitida sendo monocromática faz com que os objetos sejam vistos em amarelo e tons de cinza o que não é um problema na mineração. Minas não tem muita variação de cor e no caso do manuseio de equipamentos com código de cores (como cilindros de gás) o trabalhador pode usar sua lanterna de capacete (que é obrigatória).

Quando não em operação o tubo central em forma de U contém sódio líquido e portanto a proximidade de uma chama descoberta gera uma situação de risco que deve ser evitada. Se o tubo quebrar o sódio pode reagir violentamente com a água, o que por sua vez pode deflagrar uma mistura ar-metano. Por este motivo esta lâmpada não deve ser utilizada em minas de carvão e sua disposição final deve ser cuidadosa.

Os tubos são longos e finos com dimensão variando entre 30 cm para potência de 35 W até 1,10 m para potência de 55 W, o que torna difícil um controle preciso do feixe. Por isso estas lâmpadas são excelentes para uso em holofotes de iluminação de grandes áreas, mas não são adequadas para iluminação concentrada numa pequena região.

11.3.5. LAMPADAS A VAPOR DE MERCÚRIO A ALTA PRESSÃO

As lâmpadas de sódio a alta pressão junto com as de mercúrio e as de haletos metálicos compõem o grupo das chamadas lâmpadas de descarga de alta intensidade ("HID-high intensity discharge"). A característica comum a este grupo é a presença de arcos de descarga em tubos com gás, operando com pressões e correntes de modo a gerar as desejadas quantidades de radiação nos arcos. Todas elas requerem um reostato para suprir a voltagem de partida e limitar a corrente. Em geral requerem vários minutos para atingir a produção luminosa de pico e também para reiniciar após uma interrupção de corrente. O reinício só ocorre após o resfriamento do gás proporcionar um nível de pressão de vapor em que haja descarga no arco.

Nas lâmpadas de mercúrio a colisão entre elétrons e átomos de mercúrio no arco ionizam estes últimos obtendo-se as linhas espectrais do mercúrio (404,7; 435,8; 546,1; 577,9 nm). A distribuição espectral é influenciada pela pressão de vapor em que o arco opera e pela espessura do bulbo da lâmpada. Uma parte da energia radiante gerada é da faixa do ultravioleta e é absorvida pelo vidro; se houver uma película de material fluorescente a radiação ultravioleta pode ser convertida em luz visível. Neste caso a lâmpada é dita como tendo "aperfeiçoamento em cor".

A luminância é alta na faixa de 100 000 a 1 000 000 de nit e a potência vai de 50 até 3 000 W. A vida útil estimada varia de 10 000 a 24 000 horas e as eficiências são altas, na faixa de 35 a 60 lm/W. Estas características fazem com que elas sejam muito utilizadas na mineração apesar de algumas desvantagens como:

- a. longo período até atingir emissão luminosa máxima, da ordem de 7 a 9 minutos;
- b. longo período de reinício, cerca de 10 minutos;
- c. devido a alta intensidade problemas de ofuscamento podem ocorrer.

11.3.6. LÂMPADAS DE HALETOS METÁLICOS A ALTA PRESSÃO

São similares às lâmpadas de mercúrio e contém adicionalmente haletos metálicos na forma de iodeto de sódio, de iodeto de tálio e iodeto de índio. Estes aditivos produzem luz nas faixas do amarelo e vermelho, que misturada com a luz do vapor de mercúrio que é das faixas do azul e verde, fornece um produto final com uma qualidade melhor de distribuição espectral. Além disso obtém-se maior brilho e uma eficácia 50% maior que para as incandescentes de mesma potência.

A operação da lâmpada requer um reostato que forneça suficiente voltagem inicial e uma correta forma de onda. Devido a alta voltagem inicial requerida a vida útil é relativamente menor em comparação com as de mercúrio. O tempo de reinício é longo, entre 10 e 20 minutos e o excessivo brilho gera problemas de ofuscamento. Por estas características este tipo de lâmpada não tem sido muito utilizado na mineração [4].

11.3.7. LÂMPADAS A VAPOR DE SÓDIO A ALTA PRESSÃO

Por uma série de razões estas lâmpadas tem tido aceitação cada vez maior na mineração. Suas características divergem das de outras lâmpadas de descarga de alta intensidade principalmente quanto a radiação emitida e modo de operação.

O arco consiste essencialmente de vapores de sódio, mercúrio e xenônio mantidos a alta temperatura dentro de um tubo de cerâmica translúcida. Este tubo cerâmico é resistente à altas temperaturas e aos efeitos corrosivos do sódio, tendo seus eletrodos nas extremidades seladas por processo que também resista a estas condições. Apesar de ser denominada de lâmpada de alta pressão dentro do tubo a pressão é menor que a atmosférica. A quantidade de sódio é muito pequena não ocorrendo risco de reação deste com água se o tubo quebrar, possibilidade existente para as lâmpadas de baixa pressão.

As eficiências se situam na faixa de 110 a 130 lm/W e a vida útil está na faixa de 20 000 a 40 000 horas para potência de 400 W. O máximo brilho é atingido em tempo menor que para as lâmpadas de mercúrio e o reinício em geral requer menos de um minuto. A maior parte da energia radiante está na faixa do amarelo e laranja, e estas cores são adequadas para ambientes com baixo nível de iluminação. Além disso produzem muito pouca radiação ultra-violeta.

11.3.8. LÂMPADAS REFLETORIZADAS

Lâmpadas refletorizadas apresentam uma parte do próprio bulbo atuando como superfície refletora. A reflexão é conseguida por meio de uma película metálica colocada na superfície interna do bulbo e obtida por meio de condensação ou vaporização de alumínio ou prata. De acordo com a forma da superfície refletora tem-se diferentes nomes para as lâmpadas, sendo os mais comuns os seguintes: tipo R, tipo PAR e tipo EAR. As fontes luminosas podem ser incandescentes, fluorescentes ou mesmo de vapor.

O tipo R se compõe de uma única peça de vidro e apresenta possibilidade de bom controle do feixe luminoso que pode ser concentrado num ponto ou disperso para cobrir uma ampla área. Duas das vantagens destas lâmpadas são que cada vez que se troca a fonte também se coloca uma nova e limpa superfície refletora, e como o feixe tem focalização precisa pelo sistema ótico não é preciso nova focalização a cada troca de fonte.

O tipo PAR deriva seu nome de "parabolic aluminized reflector" indicando que parte da superfície do bulbo tem a forma de uma parábola e seu sistema ótico focaliza precisamente a luz emitida. Assim esta lâmpada é um completo sistema de iluminação com fonte, refletor e lentes.

A forma parabólica produz um feixe estreito se a fonte estiver no foco do refletor e se a lente frontal contiver prismas pode-se projetar luz com o desejado padrão de feixe. Estas lâmpadas são usadas em veículos LHD, com fonte incandescente predominando nos Estados Unidos e fonte halógena de quartzo predominando na Europa. O uso de películas de material dicróico na parte interior das lentes permite a obtenção de cores específicas e lâmpadas PAR emitindo luz próxima ao extremo vermelho do espectro são apropriadas para minas subterrâneas devido a fumaça e poeira em suspensão.

O tipo EAR tem sua denominação derivada de "elliptical aluminized reflector" e a forma elíptica gera uma concentração do feixe a cerca de 5 cm antes da lente depois da qual ele se expande. O tipo EAR é útil em pontos de transferência de correias monitorados por circuito fechado de televisão pois nenhuma luz extraviada provinda da lâmpada atinge o monitor. É útil também em estações de britagem onde pode tornar de alta luminância o ponto de observação.

11.4. COMPARAÇÃO DAS LÂMPADAS USADAS NA MINERAÇÃO

A tabela 11.1. resume algumas das principais características das lâmpadas mais comumente utilizadas na mineração da América do Norte e da Europa. A evolução tecnológica pode ter alterado alguns valores mas de modo geral a comparação entre as lâmpadas é válida apesar do levantamento ter sido efetuado por Trotter no início da década passada.

A tabela 11.2. apresenta a simbologia utilizada por alguns fabricantes bem como as características de distribuição espectral e influência na aparência da cor do objeto visto ("color rendition").

A figura 11.2. compara a eficiência inicial das diversas fontes em termos de lúmens por watt.

Um importante componente das lâmpadas é o reostato existindo diversos tipos e modelos mas uma discussão mais detalhada deles foge ao escopo deste trabalho.

A figura 11.3. ilustra a forma geral das curvas de distribuição espectral para lâmpadas incandescentes e fluorescentes com relação a luz solar. Percebe-se que lâmpadas de filamento de tungstênio tem baixa eficiência (10 a 12%) porque emitem a maior parte da energia radiante na região do infra-vermelho. As fluorescentes apresentam em geral várias linhas espectrais na região do espectro visível.

Tabela 11.1. Comparação entre diversas fontes luminosas usadas na mineração [baseada em 4].

tipo de fonte	luminância para bulbo claro (nt)	vida útil estimada (horas)	uso com corrente contínua	tempo de aquecimento prévio	tempo para reinício
filamento incandescente de tungstênio	10 exp(5) a 10 exp(7)	750 a 1 000	sim	-	-
halógena de tungstênio	2x10exp(7)	5 a 2 000	sim	-	-
fluorescente de mercúrio	5x10exp(4) a 2x10exp(5)	500 a 30 000	sim	-	-
vapor de mercúrio a alta pressão	10 exp(5) a 10 exp(6)	16 000 a 24 000	com limitações	7 a 9	3 a 10
haletos metálicos	5x10exp(6)	10 000 a 20 000	com limitações	2 a 5	10 a 20
vapor de sódio a baixa pressão	10 exp(5)	10 000 a 18 000	não recomendado	7 a 9	1 a 2
vapor de sódio a alta pressão	10 exp(7)	12 000 a 24 000	não recomendado	3 a 4	0,5 a 1

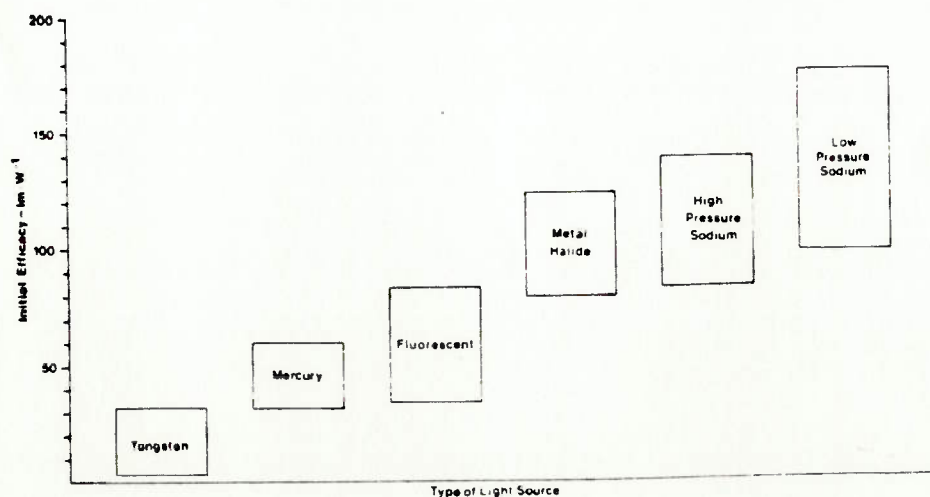


Figura 11.2. Eficiência de diversas fontes [4].

Tabela 11.2. Características de distribuição espectral, influência na cor percebida dos objetos e aplicações [4,6].

tipo de fonte	distribuição espectral	influência sobre a cor percebida	símbolo	aplicações
filamento incandescente de tungstênio	"quente" amarela a branca	excelente		muito usada, com tipos especiais; capacete, fixa de rede e equipamentos móveis; sistema flexível; inadequada para atmosferas explosivas.
halógena de tungstênio	"quente" amarela leve a branca	excelente		onde necessário controle do feixe como capacete e farol de veículo; bulbo não escurece; pode ofuscar
fluorescente de mercúrio	"quente" branca	excelente		vida útil longa, baixa luminância, em geral em rede
vapor de mercúrio a alta pressão	"fria" azulada	média		bastante usadas; boa vida útil e eficiência, pode causar ofuscam.
haletos metálicos	"fria" azul a branca	boa		necessário altas voltagens para início; pouco usada devido ao alto brilho
vapor de sódio a baixa pressão	"quente" âmbar	ruim		alta eficiência, melhora acuidade, permite boa focalização, distrib. espectral próxima da do olho, não recomendada para equip. móveis
vapor de sódio a alta pressão	"quente" dourada	regular		cor adequada para ambiente de baixa iluminação, alta eficiência, usada em redes fixas

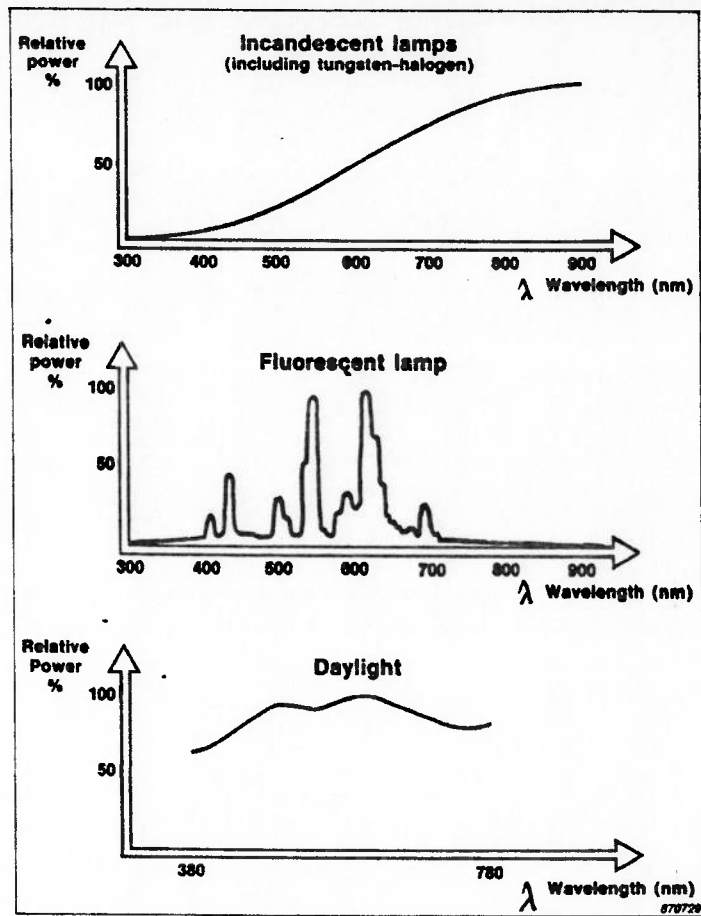


Figura 11.3. Distribuição espectral para lâmpadas incandescentes e fluorescentes em comparação com a luz solar [23].

12. INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

12.1. INTRODUÇÃO

O desempenho de um sistema de iluminação é função principalmente de [6]:

- a. características dos componentes eletromecânicos utilizados;
- b. parâmetros de projeto;
- c. técnicas de instalação;
- d. metodologias de manutenção.

As duas últimas podem minimizar custos operacionais, aumentar a vida útil dos componentes do sistema, diminuir o tempo ocioso das máquinas, assegurar o desempenho aceitável do sistema e auxiliar no diagnóstico de causas de problemas de iluminação.

Os responsáveis pela instalação devem ter consciência que seu trabalho afetará o desempenho posterior de todo o sistema de iluminação, e os responsáveis pela manutenção devem ter em mente que a eficiência na mineração está associada à produtividade das frentes de lavra e à não ociosidade das máquinas de extração e produção.

Freqüentemente o programa de manutenção do sistema de iluminação da mina consiste simplesmente na contínua substituição dos bulbos queimados, e as vezes também da limpeza da luminária durante a troca. Normalmente mesmo este programa corretivo tem uma baixa prioridade dentro das atividades normais de uma mina.

Características deste tipo de manutenção são a existência de bulbos queimados ou inoperantes por dias até que a equipe encarregada da manutenção resolva o problema, e a diminuição do fluxo emitido devido ao acúmulo de pó ou ao desgaste natural da fonte. A diminuição do fluxo luminoso útil pode atingir até 50% do valor inicial.

A decisão de adotar uma manutenção por substituição individual deve decorrer de um estudo comparativo de custos porque a mão de obra pode ser relativamente mais custosa que o preço da fonte. Para lâmpadas fluorescentes o custo de mão de obra para reparos e substituição em geral supera o preço de aquisição da lâmpada [4].

12.2. METODOLOGIAS DE MANUTENÇÃO

A produtividade de uma mina pode ser aumentada com o incremento da disponibilidade das máquinas de produção. Diversos países tem inclusive rígidas normas quanto a condições de iluminação nas frentes, nas faces de extração e nos equipamentos móveis, os quais só podem estar em atividade se o nível de iluminação for o indicado por lei. Inspeções regulares por organismos legais podem interromper a produção e penalizar a empresa, além de checar se os componentes do sistema de iluminação satisfazem todos os requisitos exigidos legalmente.

A busca do aumento de produtividade gerou sofisticados programas de manutenção, treino de pessoal especializado como mecânicos e o desenvolvimento de melhores inventários de peças. A iluminação deve ser parte integrante destes programas sob o risco de se tornar um freio ao aumento da produtividade.

Os elementos chaves num eficiente programa de manutenção para iluminação são os seguintes:

- a. rápida troca dos elementos com defeito existentes junto aos locais de produção; em locais mais adequados é feita detalhada inspeção, identificação e reparo do defeito;
- b. definição de um programa de manutenção preventiva e de um cronograma das operações de rotina a serem executadas;
- c. registro e análise de todos os eventos para posteriores tomadas de decisão;
- d. treinamento prático dos mecânicos para familiarização com as características específicas do sistema de iluminação.

Um programa de manutenção pode utilizar ações preventivas ou corretivas. Um programa preventivo se assenta na substituição dos componentes antes que atinjam sua vida útil estimada, enquanto que num programa corretivo a substituição ocorre apenas depois da falha do componente.

Diversas estratégias podem ser utilizadas numa manutenção preventiva, citando-se a manutenção por substituição modular ("exchange maintenance"), a manutenção por substituição em grupo e a manutenção programada ("scheduled maintenance").

A manutenção por substituição modular é o processo de reparação do sistema pela troca de módulos (conjunto de componentes) defeituosos por módulos perfeitos, sem a análise pormenorizada da falha ocorrente dentro do módulo. Ela se contrapõe ao processo de detalhamento da falha e a troca apenas do componente defeituoso.

As vantagens da substituição modular são a diminuição do tempo de identificação do componente defeituoso porque só se identifica o módulo, o menor tempo de reparo, o menor grau de conhecimento exigido dos técnicos encarregados de avaliar a falha, e a melhoria da qualidade de reparos porque são feitos em locais mais apropriados situados longe das rotas de produção.

A manutenção programada envolve a execução de checagens no sistema e de parte dos serviços tão somente durante as horas ociosas previstas das máquinas, e também durante os turnos de manutenção geral. Numa manutenção programada de sistema de iluminação os pontos essenciais são os seguintes:

- a. inspeção das luminárias a prova de explosão;
- b. limpeza das lentes e checagem quanto a riscos, ranhuras, fraturas ou amarelamento;
- c. inspeção dos cabos de alimentação;
- d. identificação de luzes piscantes ou fracas.

Numa mina a manutenção preventiva encontra dificuldades específicas associadas a imprevisibilidade de acidentes que se contrepõem ao desaste gradual das lâmpadas e luminárias. Os principais acidentes estão relacionados ao impacto de fragmentos e choques mecânicos de ferramentas e maquinário.

12.3. VIDA ÚTIL DE LAMPADAS

Em minas subterrâneas os casos em que se atinge a vida útil estimada da lâmpada são mais a exceção que a regra. Muitos fatores prejudiciais atuam simultaneamente e um preciso diagnóstico de quais fatores são preponderantes em cada situação particular é difícil de obter.

A vida útil estimada para um dado tipo de lâmpada não é o valor atingido por todas as lâmpadas de uma dada instalação mesmo que se tenha condições ideais. De modo geral o termo vida útil estimada se refere a vida da lâmpada mediana ou seja, 50% das lâmpadas falharão ao atingir o tempo indicado como o de vida útil. Para as lâmpadas de mercúrio a depreciação gradual natural em lúmens é maior que para outros tipos de lâmpadas, e portanto o valor de 50% pode não ser o mais adequado. Em geral para estas lâmpadas a vida útil se refere ao intervalo de tempo em que 1/3 das lâmpadas falham.

Em minas subterrâneas as maiores causas de inadequação e falhamento das fontes luminosas estão associadas a:

- a. vibrações das máquinas e equipamentos móveis;
- b. choques mecânicos;
- c. voltagem excessiva (lâmpadas de filamento de tungstênio) ou voltagem abaixo do indicado (lâmpadas de vapor de mercúrio, de sódio a alta pressão ou fluorescente);
- d. transporte e manuseio das lâmpadas e luminárias;
- e. utilização inapropriada do reostato (principalmente vapor de mercúrio e sódio a alta pressão).

A figura 12.1. apresenta diversas curvas relativas a tempo de vida útil de lâmpadas utilizadas em lavra de carvão. O objetivo é a programação da substituição antes que se atinja a porção descendente mais inclinada das curvas, região onde as falhas se intensificam.

Em muitas aplicações mineiras curvas do tipo das apresentadas na figura 12.1. não são aplicáveis porque a vida real é menor que a vida estimada e porque as tendências de falha podem ser diferentes das apresentadas. Nestes casos deve-se estabelecer curvas específicas por meio de registros de substituições usando etiquetas datadas.

12.4. SUBSTITUIÇÃO INDIVIDUAL E POR GRUPO

Um bom programa de manutenção preventiva deve incluir a limpeza periódica das luminárias em intervalos de 6 meses a um ano, e a total substituição das lâmpadas durante um dos períodos de limpeza. A substituição de conjuntos de lâmpadas é um procedimento alternativo à substituição individual sendo conhecido como substituição em grupo ("group relamping").

O processo de substituição em grupo é por definição a substituição programada de todas as lâmpadas de uma instalação num dado momento e antes que falhem. Esta prática é difundida na iluminação de indústrias, de lojas, de escritórios e de praças de esportes e apresenta vantagens em certas aplicações em minas com relação a substituição individual. Esta última só ocorre quando a lâmpada falha. Algumas destas vantagens são as seguintes:

- a. dependendo do local e atividade obtém-se uma diminuição de custos de mão de obra na manutenção porque a substituição é feita ordenadamente, de modo similar a uma linha de montagem com a eliminação do transporte individual de cada lâmpada.
- b. redução dos efeitos da diminuição natural do fluxo luminoso emitido pelas fontes, ou seja, maximização da quantidade de lúmens emitidos por unidade de energia consumida.

- c. a eficiência luminosa das lâmpadas é também aumentada pela sistemática limpeza das lentes e vidros, que são parte integrante de qualquer programa de substituição em grupo.
- d. a programação da substituição durante os períodos normais de manutenção da mina diminui a ocorrência de parada de máquinas devido a falhas de iluminação.
- e. em alguns casos durante a fase final de vida e após o falhamento da lâmpada o reostato pode apresentar um aumento de temperatura que reduz sua vida útil.

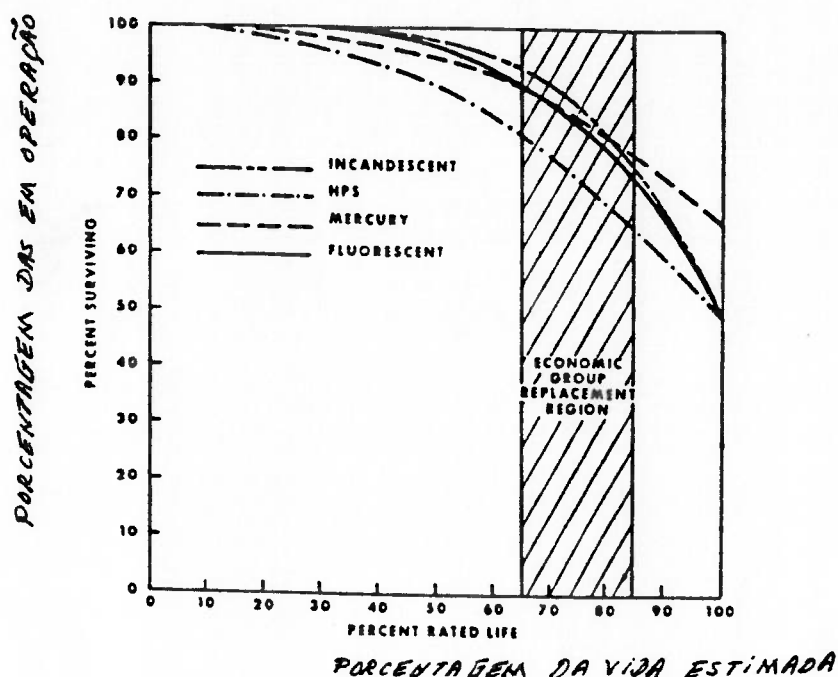


Figura 12.1. Curvas de mortalidade de lâmpadas usadas na mineração de carvão [6]. Nas abscissas temos a porcentagem de vida útil de lâmpadas em operação e nas ordenadas temos a porcentagem de lâmpadas que ainda não falharam. Para as lâmpadas incandescentes, de sódio a alta pressão e fluorescentes a vida estimada é atingida por cerca de 50% delas.

O processo de substituição em grupo é diretamente aplicável para a lavra por frentes longas e também para instalações fixas distantes das faces de produção, onde curvas similares às da figura 12.1. são mais prováveis de existirem. Para máquinas e lavra por câmaras e pilares desvios significantes podem ocorrer devido principalmente a choques mecânicos.

A forma da curva de mortalidade, os custos de mão de obra relativos a substituição individual e em grupo, e os custos das lâmpadas são os fatores mais importantes na análise da viabilidade de utilização da substituição programada em grupo.

Mesmo que a vida útil não seja atingida e as curvas de mortalidade tenham formas diferentes daquelas da figura 12.1 isto não implica necessariamente que este processo não possa ser aplicado. Quando os fatores que reduzem a vida útil são de natureza aleatória (como choques e acidentes) a forma da curva pode se tornar inadequada para a aplicação da substituição programada. Por exemplo se a taxa de falhas não aumentar com o decorrer do tempo de operação a curva não apresentará um aumento de declividade e portanto não será possível estabelecer a data mais apropriada de substituição.

A figura 12.2. apresenta algumas possibilidades de estratégias aplicáveis a substituição em grupo. Outras estratégias são possíveis mas as mais comuns são as ilustradas.

A curva A-V se refere a deterioração natural das fontes luminosas enquanto que a curva A-Q se refere a limpeza das luminárias apenas quando a lâmpada queima. Assim a diferença em ordenadas entre as duas curvas exprime a perda de fluxo útil devido a sujeira nas lentes e vidros. O caminho A-B-D-F-G-I-K-M-R representa a limpeza das luminárias a cada 12 meses. Já o percurso A-B-C-E-F-G-H-J-K-M-O-S representa a limpeza semestral das luminárias. O percurso A-B-C-E-F-G-H-J-L-N-P-U representa a limpeza semestral com a substituição em grupo após 24 meses.

Estas curvas variam dependendo das condições ambientais das minas, dos tipos de fontes utilizadas e de como a energia é fornecida às lâmpadas. A queda de fluxo emitido é maior quando se tem equipamentos a diesel devido a produção de partículas de carvão dos fumos de exaustão, e este efeito é mais pronunciado nas rampas do que nas travessas e galerias horizontais.

Lâmpadas de haletos metálicos apresentam um declínio mais rápido da produção luminosa que lâmpadas a vapor de mercúrio, e portanto a curva A-V seria mais embaixo na figura 12.2.

Operação com voltagens superiores as especificadas reduz a vida útil mas aumenta o fluxo produzido. Operação a voltagens inferiores as especificadas pode gerar uma variada gama de efeitos. Lâmpadas de filamento de tungstênio durarão mais mas lâmpadas de vapor de mercúrio sofrerão redução da vida útil e apresentarão pior emissão de fluxo devido ao escurecimento do tubo. Luminárias abertas na parte superior podem criar por temperatura uma corrente de ar suficiente para impedir que poeira se deposite.

12.5. ALGUNS PROCEDIMENTOS PRÁTICOS RECOMENDADOS

Cada mina é um caso particular mas existem alguns procedimentos operacionais que devem ser seguidos num eficiente programa de manutenção preventiva associado a um adequado projeto de iluminação. Alguns dos principais pontos a serem observados são resumidos abaixo:

- a. numa mina pode-se ter iluminação de capacete, portátil, localizada ou fixa de rede. A iluminação de capacete é obrigatória.
- b. mantenha sua lâmpada de capacete (bem como as demais) sempre limpa pois o acúmulo de poeira pode reduzir em até 50% a emissão de luz.

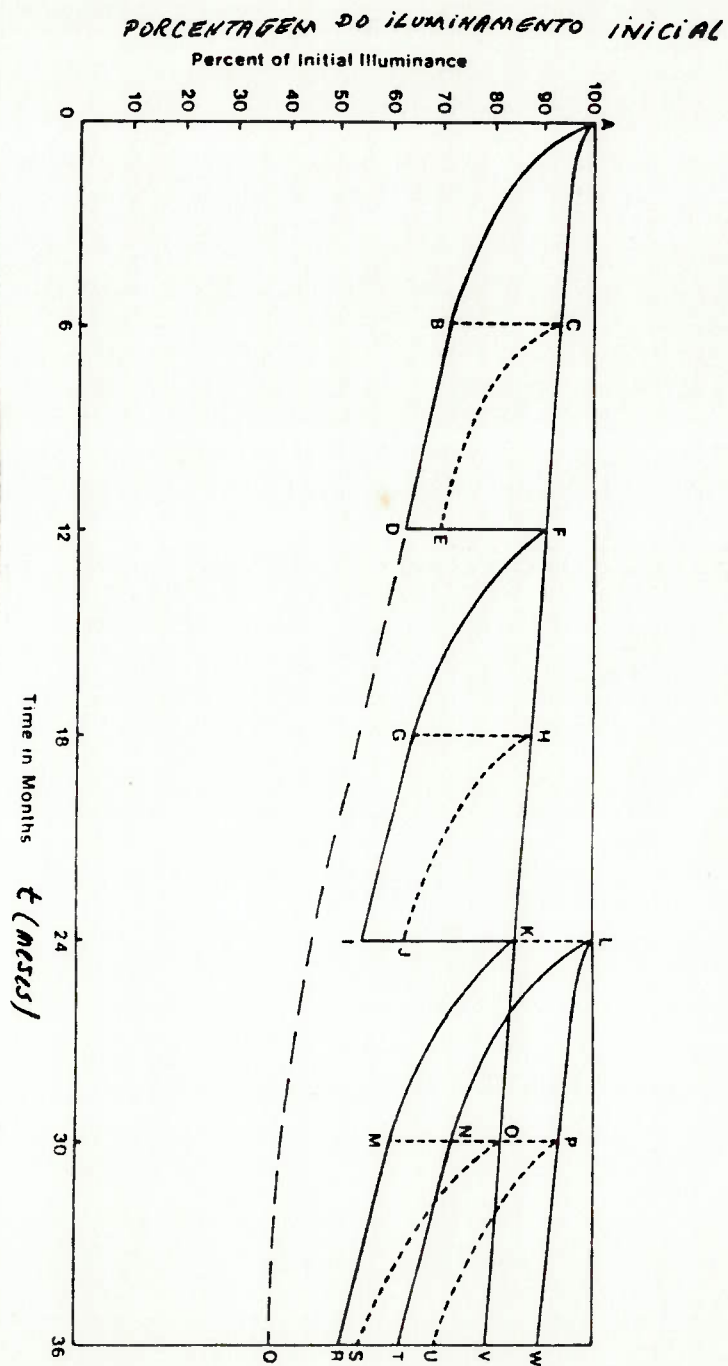


Figura 12.2. Estratégias de manutenção preventiva [4]. A substituição programada ocorre para o ponto de 24 meses de operação.

- c. evite focalizar sua lâmpada diretamente nos olhos dos colegas de trabalho. Se acidentalmente eles focalizarem nos seus olhos desvie imediatamente o olhar do feixe.
- d. se sua lâmpada de capacete tiver feixe ajustável deixe-o o mais aberto possível quando não necessitar explicitamente do feixe concentrado.
- e. sistemas fixos de rede para iluminação geral tem a vantagem que as operações de trabalho podem ser deslocadas sem que se tenha que alterar a iluminação. Todavia em situações como na lavra por frentes longas ou corte e aterro, ou mesmo em garagens subterrâneas, as posições de trabalho estão continuamente se alterando. Neste caso pode ser interessante combinar um sistema fixo com um sistema de iluminação local.
- f. sistemas de iluminação local se caracterizam por apresentar uma concentração de luz apenas onde se está realmente operando, não se focalizando onde não ocorrem operações. Nestes casos tem-se uma economia energética quando o local é ocupado intermitentemente e se utiliza lâmpadas portáteis incandescentes ou fluorescentes.
- g. lâmpadas e holofotes instalados em equipamentos móveis devem estar sempre orientados para o teto, piso ou paredes e nunca para os operadores. Devem ser colocados no ponto mais baixo possível da máquina para evitar ao máximo iluminação ao nível dos olhos. Deve-se ter anteparos ou difusores para que não sejam visíveis diretamente causando ofuscamento.
- h. as paredes, teto e pisos devem estar limpos de poeira para aumentar a refletância e a luminância, além de no caso do carvão se diminuir o risco de explosões de pó.
- i. geometrias rochosas perigosas ou esteios e escoramentos de madeira proeminentes devem ser limpos de pó e pintados de branco para aumento da visibilidade.
- j. numa mina quase nunca se pode localizar e orientar um feixe do modo ótimo, devendo-se sempre evitar orientações a partir da qual se olhe diretamente para fontes luminosas.
- k. o transporte das lâmpadas deve ser numa caixa apropriada pois as embalagens dos fabricantes raramente são adequadas para uma mina.
- l. dentre as incandescentes deve-se preferir as para serviço robusto e de baixa voltagem, pois tem filamento mais grosso e melhor suportado, resistindo mais a choques mecânicos.
- m. junto às faces de extração onde se tenha detonação deve-se utilizar sistemas de luminárias de fácil retirada.
- n. deve-se incorporar amortecedores nos suportes das luminárias tais como pequenos coxins de borracha.

13. MEDIDAS DE PARÂMETROS FOTOMÉTRICOS

13.1. PRINCIPAIS PARÂMETROS MEDIDOS EM MINAS

Nos projetos de iluminação de minas a utilização de fotômetros permite a estimativa de três parâmetros importantes que são:

- a. iluminamento (ou iluminância) - uma medida da quantidade de luz recebida por uma superfície sendo expresso em lux;
- b. a luminância - é uma medida da luz emitida ou refletida por uma superfície sendo expresso em candelas por metro quadrado ou nit;
- c. a refletância - ele indica quão bem a luz é refletida por uma superfície sendo adimensional.

Dos três parâmetros o mais fácil de ser medido é o iluminamento e por este motivo muitos países especificam suas normas em função dele.

O olho humano não percebe o fluxo luminoso indo da fonte para o receptor, mas a percepção visual se faz através da luz refletida pelos objetos e por percepção de diferenças de brilho com a circunvizinhança. Portanto a luminância se relaciona mais diretamente com o que o olho vê e existe uma tendência em se especificar normas mineiras em termos deste parâmetro.

A refletância é o parâmetro que relaciona as duas grandezas anteriores através da fórmula válida para difusores perfeitos:

$$r = \tilde{\pi} L / E \quad (13.1)$$

onde: r = refletância, adimensional

L = luminância em nit

E = iluminamento (ou iluminância) em lux

Como o olho humano não é um instrumento preciso para medidas de caráter científico utiliza-se instrumentos apropriados a avaliação da quantidade de luz. As principais metodologias de medição usadas em minas subterrâneas são a fotometria física, a fotometria fotográfica e a fotometria visual.

Na fotometria física utiliza-se um aparelho denominado fotômetro que possui uma célula fotossensível que tem uma curva de sensibilidade espectral similar a do olho humano. Ele opera com base no princípio de que uma parte da luz pode ser convertida em energia elétrica e que após esta ser amplificada e processada, pode ser medida e relacionada ao nível de iluminação. No caso de minas de carvão é necessário que se use fotômetros intrinsecamente seguros.

Existem muitos tipos diferentes de fotômetros e os mais usuais em levantamentos em minas são aqueles de célula de selênio ou fotodíodo de silício.

A segunda metodologia utiliza uma câmara e na terceira o próprio olho é usado para por comparação julgar o brilho de duas superfícies. Estas metodologias tem sido substituídas pela fotometria física na maioria dos levantamentos de campo, observando-se que a fotometria fotográfica tem importantes vantagens em trabalhos de pesquisa.

As medidas de iluminação em minas são normalmente efetuadas por

um engenheiro eletricitista, um engenheiro de minas, um engenheiro de ventilação, um engenheiro de segurança ou mesmo um técnico supervisionado, nenhum dos quais é especificamente treinado em fotometria. Numa mina as condições de operação estão longe de serem as ideais e muitos fatores contribuem para que desvios superiores a 20% com relação ao valor exato ocorram [4].

Um engenheiro eletricitista pode se surpreender com a falta de precisão num levantamento de iluminação mineira enquanto que um engenheiro de ventilação está mais acostumado aos arredondamentos efetuados nas medidas de fluxo e perda de carga nos circuitos de ventilação, e portanto tem uma percepção mais realista do levantamento.

13.2. MEDIDAS DE ILUMINAMENTO

Nestas medições se objetiva determinar a quantidade de luz recebida por uma superfície. Em minas três são as metodologias mais usadas, o de medida planar direta, o de medidas independentes de luz direta e luz difusa, e o de medida do valor máximo. Com os valores obtidos pode-se traçar curvas isolux úteis para projeto ou relocação de fontes.

13.2.1. MÉTODO DE MEDIDA PLANAR DIRETA

Este método é utilizado quando se deseja o nível geral de iluminamento de uma dada área e não é necessário grande exatidão. Emprega-se um fotômetro físico colocando-se a fotocélula sobre a superfície no local desejado. O valor lido é considerado como o iluminamento no ponto.

O plano de trabalho é considerado como a 75 cm acima do piso e o operador deve se manter abaixado de modo a não interceptar qualquer luz incidente na célula. Em minas a geometria das vias e câmaras é irregular sendo mais difícil se utilizar uma malha regular de pontos como idealmente desejável.

Os valores obtidos são válidos apenas para as condições do levantamento as quais devem ser anotadas. Dentre estas destacamos o tipo de fotômetro, tipo e idade das lâmpadas, voltagem e condições das luminárias, e condições ambientais.

13.2.2. MÉTODO DE MEDIDAS INDEPENDENTES DE LUZ DIRETA E DE LUZ DIFUSA

Nesta metodologia se determina separadamente quantidades de luz atingindo o ponto desejado, uma quantidade se referindo a luz direta da fonte e outra relativa a luz que atinge o ponto após inúmeras reflexões nas paredes, teto e piso.

O iluminamento devido a luz direta é obtido orientando-se a célula diretamente para a fonte luminosa e eliminando-se as luzes de todas outras origens que não a própria fonte em análise. O valor lido é então corrigido para a normal do plano da superfície.

O valor do iluminamento indireto é obtido colocando-se a célula

no ponto desejado e corrigindo-se o valor lido através de uma curva de calibração apropriada.

13.2.3. MÉTODO DA MEDIDA DO VALOR MÁXIMO

Nesta metodologia a fotocélula é colocada no ponto considerado e orientada para a fonte luminosa. O valor obtido é corrigido para a normal à superfície este então sendo considerado como o iluminamento no ponto. Ela é empregada quando se deseja saber como a luz está sendo distribuída por uma luminária o que é obtido pela construção de curvas isolux.

13.3. MEDIDAS DE LUMINÂNCIA

Quando se mede luminância o fotômetro é dirigido para a superfície e o valor medido não é relativo a toda ela mas apenas a uma porção desta normalmente indicada por um círculo centrado no meio do campo visual.

A figura 13.1. ilustra a medida de luminância com o instrumento e a fonte alinhados de modo que se obtenha a máxima luz refletida. As normas americanas para minas de carvão são especificadas em termos de luminância e é permitido a utilização de fotômetros que medem a luminância para uma área entre 3 e cinco pés quadrados (0,28 e 0,46 m²). A figura 13.2. ilustra um fotômetro que por ter um ângulo de trabalho de 26 graus ao ser colocado a uma distância de 5 pés (1,5 m) determinará na superfície uma área de medida de 4 pés quadrados (0,37 m²).

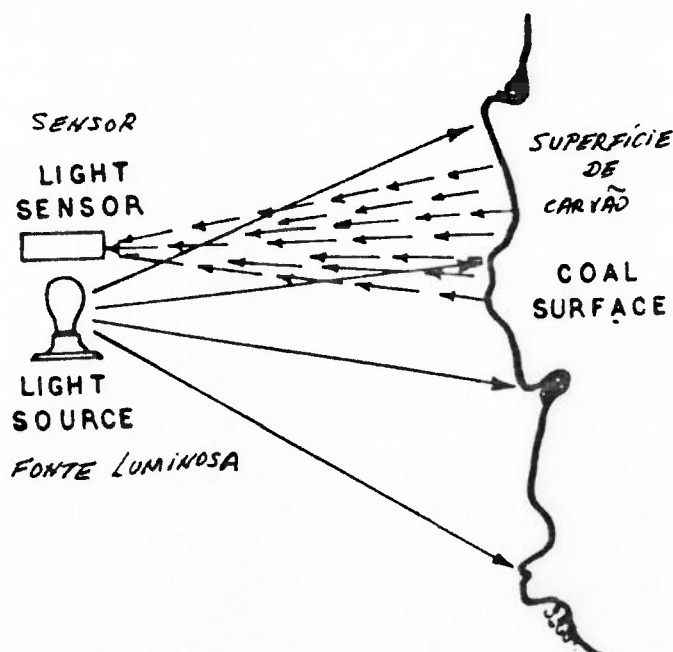


Figura 13.1. Medidas de luminância com fotômetro orientado para superfície de carvão. Valores máximos são em geral obtidos quando fonte e instrumento estão alinhados [22].

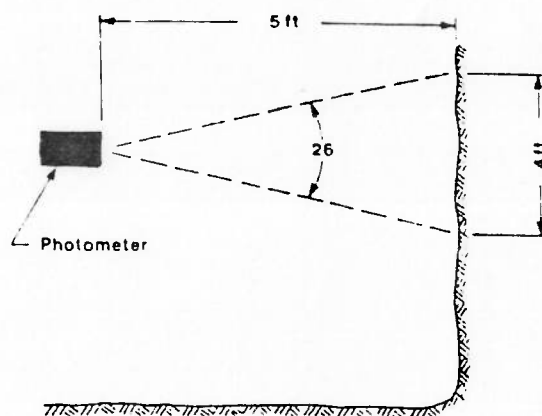


Figura 13.2. Geometria de medição de luminância com fotômetro com ângulo de trabalho de 26 graus, operando a uma distância de 1,5 m da superfície [4].

O "Mine Safety and Health Administration" dos Estados Unidos fiscaliza as minas com um fotômetro do tipo liga-desliga ("go/no go") que acende uma luz verde se o valor medido está acima do mínimo de 0,20 nit e acende uma luz vermelha se abaixo de 0,20 nit. Se as medidas são efetuadas próximas a superfície esta é subdividida em quadrados com área não superior a 0,37 m² devendo-se obter 4 valores para as posições ilustradas na figura 13.3. O valor admitido para o quadrado é obtido pela média aritmética dos 4 valores individuais.

13.4. MEDIDAS DE REFLETÂNCIA

13.4.1. IMPORTANCIA PARA PROJETOS

A refletância pode ser entendida como a eficiência de uma superfície em retransmitir luz, podendo variar de 1 (toda a luz é refletida) a zero (nenhuma luz é refletida). Na prática todas as superfícies tem refletância entre estes valores.

O parâmetro refletância é importante por inúmeras razões dentre as quais destacam-se:

- um grande número de lâmpadas e luminárias vem com especificação em termos de iluminamento e o projetista tem que saber o valor de refletância para poder estimar a luminância que será conseguida para os materiais sob a luminária;
- em certos países os equipamentos tem que apresentar uma refletância acima de um valor mínimo, e medidas tem que ser efetuadas para comprovação do cumprimento da norma;
- a refletância das superfícies rochosas está associada a a eficiência do sistema de iluminação, pois o simples aumento

da refletância da rocha de 10 para 20% mais do que dobra a quantidade de luz útil que penetra no olho. E a quantidade de luz está ligada a custos crescentes da energia elétrica.

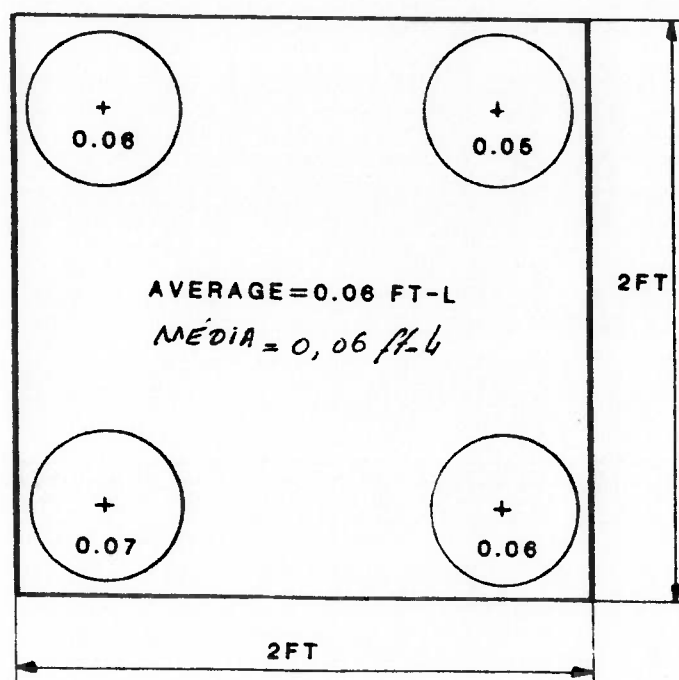


Figura 13.3. Metodologia normalizada nos Estados Unidos para fiscalização de nível mínimo de luminância em minas de carvão. O valor considerado é a média das 4 medidas efetuadas [4,22].

Um projeto de iluminação de minas subterrâneas requer necessariamente o conhecimento do parâmetro refletância das paredes, pisos, tetos e equipamentos, e em geral a porção de luz refletida que entra nos olhos é apenas uma pequena fração da luz incidente nos objetos. A grande absorção de luz pelas superfícies obriga a que o sistema de iluminação compense esta perda ou que a superfície seja modificada de modo a diminuir esta absorção.

As superfícies reais também apresentam variados graus de combinação de reflexão difusa com reflexão especular, e de modo geral a percepção de brilho é maior quando o ângulo de observação é igual ao ângulo de incidência. Numa mina seca a maioria das superfícies apresenta reflexão difusa com uma componente especular mas se as superfícies estiverem muito empoeiradas pode-se ter uma reflexão próxima a difusão perfeita.

A refletância também depende das condições de textura superficial pois uma superfície nervurada ou bandeada pode apresentar diferentes refletâncias em função do fato da luz

incidente atingi-la paralelamente ou normalmente ao eixo das nervuras. A refletância pode variar também em função do comprimento de onda da luz incidente.

As medidas de refletância podem se referir a uma única direção, a uma parte do feixe luminoso ou a toda a luz refletida pela superfície em todas as direções. Estas três condições geométricas também podem ser consideradas para a luz incidente, tendo-se respectivamente a incidência de apenas um raio luminoso, de um feixe de raios ou mesmo luz provindo de todas as direções. Associando-se estas três condições geométricas de incidência e reflexão (direcional, cônica e hemisférica), obtém-se 9 condições de geometria para a medida da refletância [4].

As principais metodologias de medida são por comparação incidência-reflexão, com amostras comparativas, por comparação padrão e por refletometria esférica. A primeira é a mais fácil mas a menos exata e precisa; a segunda fornece um valor aproximado em geral suficiente para o desenvolvimento de projetos; a terceira fornece valores precisos e exatos mas requer um trabalho cuidadoso e tedioso, enquanto que a última é a mais exata mas requer equipamentos especiais.

13.4.2. MÉTODO POR COMPARAÇÃO INCIDÊNCIA-REFLEXÃO

Este método é útil para a determinação da refletância de superfícies perfeitamente difusas. Utilizando um pequeno luxímetro portátil efetua-se duas medidas, uma para o iluminamento e outra para a luminância da superfície. A primeira é executada com o luxímetro colocado junto a superfície ou até a uma distância de 10 cm dela para evitar sombras de irregularidades; na segunda deve-se ter cuidado para não deixar sombras recaírem sobre a célula mas mesmo assim alguma luz que incidiria na superfície é bloqueada.

A refletância é obtida pelo quociente:

$$r = E_1 / E_2 \quad (13.2.)$$

onde: r = refletância;

E₁ = luminância da superfície estimada pelo iluminamento que ela causa na fotocélula, em lux;

E₂ = iluminamento na superfície em análise, em lux.

13.4.3. MÉTODO COM AMOSTRAS COMPARATIVAS

O método se baseia na comparação do brilho da superfície com o brilho de pequenas amostras padronizadas cujas refletâncias são conhecidas. O procedimento prático é ilustrado na figura 13.4. onde a função da máscara é evitar a influência das regiões vizinhas na comparação visual. É importante que a comparação seja efetuada com a mesma luz que será instalada no local de trabalho, pois por exemplo a refletância de uma superfície rochosa amarela é maior com uma luz de sódio que com uma luz incandescente. As rochas muito coloridas apresentam as maiores variações de refletância em função do tipo de iluminação ao passo que para

cores cinzas as variações de refletância são muito pequenos

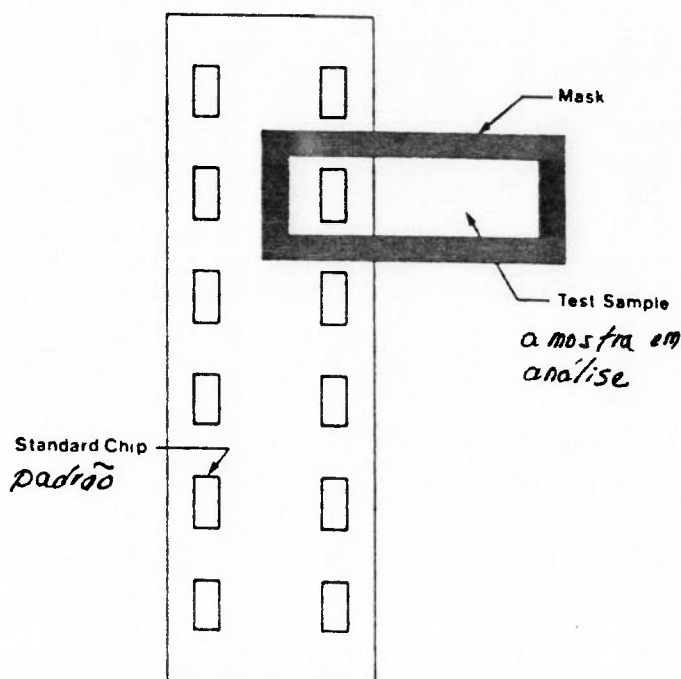


Figura 13.4. Procedimento prático para determinação da refletância por comparação com amostras padrão [4].

13.4.4. METODO POR COMPARAÇÃO PADRÃO

Este método oferece uma boa precisão mas em compensação é mais trabalhoso e as condições de uma mina não são muito favoráveis a sua utilização. As limitações de tempo e a ampla variedade de estruturas superficiais existentes numa mina impedem a obtenção de precisão comparável a de laboratório. Todavia existem procedimentos práticos simplificados que permitem a obtenção de estimativas razoáveis para uma mina.

A figura 13.5. ilustra a execução da metodologia simplificada numa mina onde a fonte de luz é posicionada a 45 graus com relação a normal a superfície. Esta fonte pode ser uma lâmpada de capacidade montada num tripé e as medidas são efetuadas com o fotômetro orientado normalmente a superfície. São feitas duas medidas, uma para amostra padrão de conhecida refletância e outra para a superfície que se quer determinar este parâmetro. A

refletância é obtida pelo quociente entre as luminâncias medidas através da fórmula:

$$r(\text{sup}) = r(\text{padrão}) \times \{ L(\text{sup})/L(\text{padrão}) \} \quad (13.3.)$$

onde:

$r(\text{sup})$ = refletância da superfície em análise;
 $r(\text{padrão})$ = refletância conhecida da amostra padrão;
 $L(\text{sup})$ = luminância da superfície em análise;
 $L(\text{padrão})$ = luminância da amostra padrão.

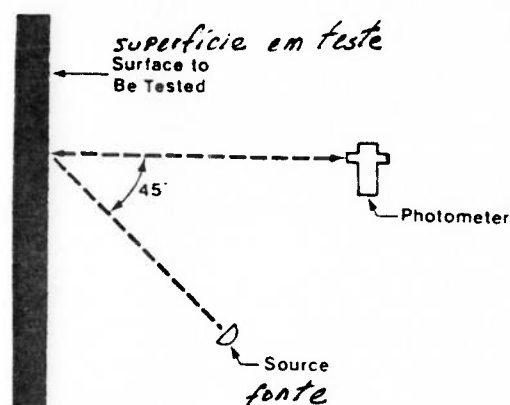


Figura 13.5. Disposição geométrica para metodologia por comparação com amostra padrão [4].

Em algumas situações mineiras a fonte de luz não pode ser perfeitamente controlada, o que ocorre em áreas bem iluminadas. Um caso típico se refere a medidas em uma LHD quando estacionada numa garagem para reparos ou manutenção. A garagem normalmente é bem iluminada e tem as paredes caiadas de branco para aumentar a refletância, e nesta situação pode-se assumir que a fonte de luz é difusa. Como o teto em geral tem a forma de domo esta hipótese é razoável e a garagem simula um refletômetro hemisférico.

Este método pode ser simplificado ainda mais para o caso de se ter apenas um luxímetro manual portátil. Coloca-se um cartão de conhecida refletância contra a superfície da qual se quer medir este parâmetro, medindo-se a uma distância de 5 cm a luz refletida pelo cartão. Retira-se o cartão e uma segunda medida é feita com o luxímetro na mesma posição. A refletância é dada pela fórmula:

$$r(\text{sup}) = r(\text{cart}) \times \{ E(\text{sup})/E(\text{cart}) \} \quad (13.4)$$

onde:

$r(\text{cart})$ = refletância do cartão padrão

E(sup) = iluminamento da superfície em estudo
E(cart) = iluminamento do cartão padrão

13.4.5. REFLETOMETRIA ESFÉRICA

Esta é uma técnica refinada e que não é apropriada para as condições de iluminação em minas. Por meio dela se obtém medidas de refletância bi-hemisféricas com inclusão de todo o fluxo refletido num ângulo sólido de 2π esterorradianos. A medida é efetuada por meio de um refletômetro esférico o qual contém uma esfera integradora com uma abertura circular plana que é colocada sobre a superfície de interesse.

13.5. VALORES EXPERIMENTAIS DA LITERATURA

A tabela 13.1. sumariza uma série de valores de refletância obtidos em laboratório para materiais naturais e artificiais de interesse a mineração. Materiais a esquerda tendem a absorver luz enquanto que materiais a direita tendem a refletir mais a luz. Quanto maior o comprimento das barras maior a tendência para a especularidade da superfície ou maior a variação associada a diferentes amostras da mesma substância. A comparação entre os minerais de minério de magnesita e de carvão ilustra a muito maior facilidade de se iluminar as frentes de extração numa mina de magnesita.

Para as condições mineiras valores de refletância iguais ou superiores a 0,3 podem ser considerados como bons. A tabela 13.2. apresenta alguns valores para refletância difusa associadas a superfícies internas de vias subterrâneas de mineração.

Um aumento de refletância das paredes de 0,35 para 0,60 equivale a dobrar a quantidade de lumens por unidade de área, o que é muito difícil de se conseguir por meio da duplicação do sistema de iluminação fixa [8]. Elevar a refletância das superfícies é o modo mais eficiente e barato de se melhorar as condições de iluminação numa mina.

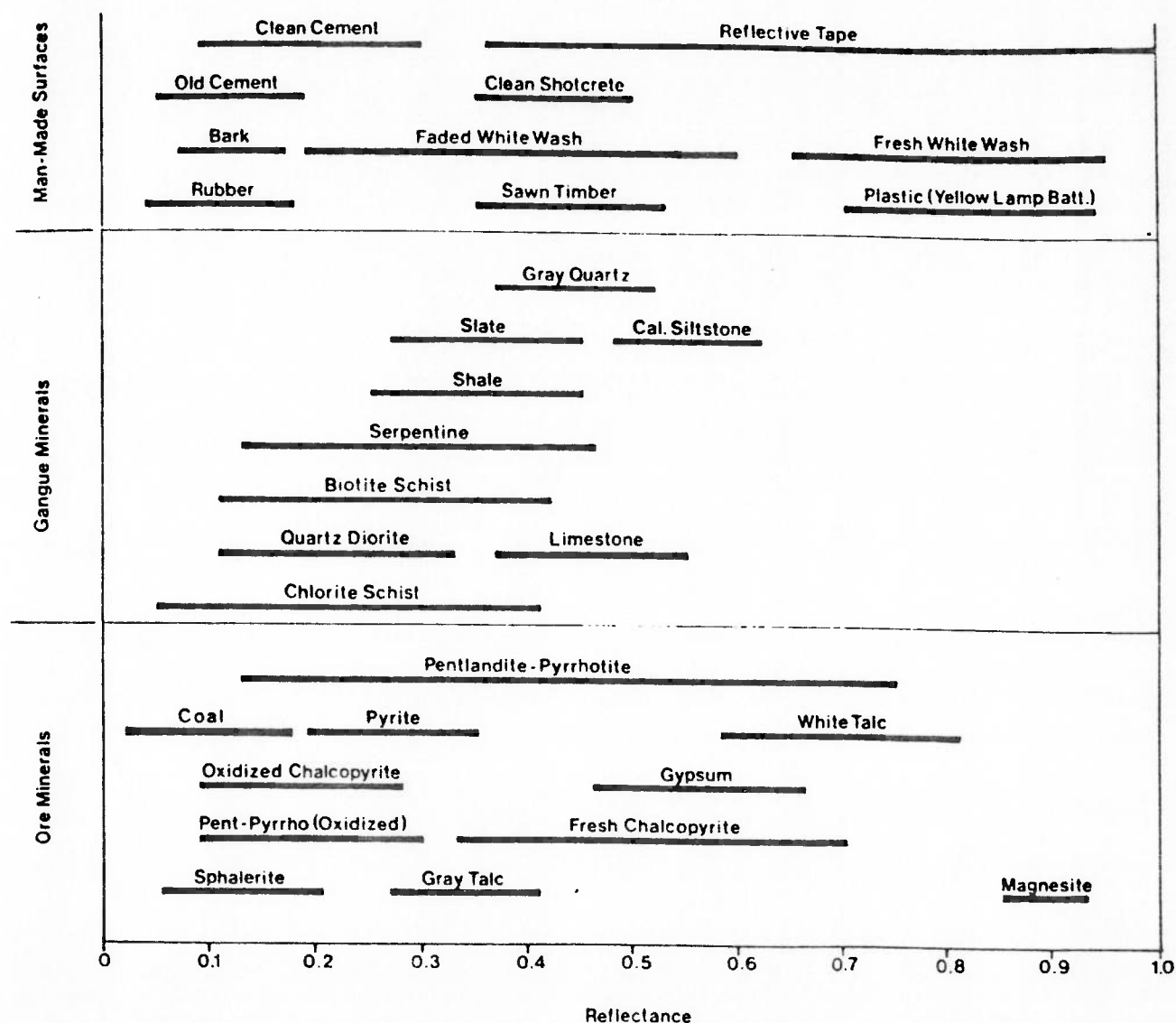
A refletância das superfícies internas das minas varia sensivelmente com a quantidade de poeira depositada. Um dos procesos de se diminuir o problema de poeira nos pisos das vias de transporte em minas de carvão é por meio da formação de fina crosta consolidada por intermédio de sal. A refletância de rocha salina limpa colocada no piso é da ordem de 28% mas com a deposição de partículas de carvão a refletância cai bastante. A deposição de 0,33 kg/m² de pó de carvão reduz a refletância para 10%; a deposição de 0,94 kg/m² de pó reduz para 7% e a deposição de 11,8 kg/m² reduz a refletância para apenas 6% [8].

13.6. PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA PESQUISA EFETUADA

Na pesquisa efetuada foram utilizados os equipamentos disponíveis no LACAEMIN - Laboratório de Contrôlo Ambiental e

Segurança na Mineração do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP. Atualmente o LACASEMIN está adquirindo por meio do PADCT/II fotômetros de precisão além de uma variedade de instrumentos relativos a engenharia ambiental na mina mas estes só estarão disponíveis no segundo semestre de 1992.

Tabela 13.1. Resultados experimentais obtidos com amostras analisadas em laboratório [4].



Os instrumentos disponíveis eram:

- a. luxímetro portátil marca ICEL, modelo LD-500, digital, 3 1/2 dígitos, visor de cristal líquido, peso de 170 gramas, três domínios de resolução, precisão de 2% na faixa de 0 a 2 000 lux, a bateria.
- b. luxímetro portátil a bateria marca Hagner, sueco, modelo EC-1, digital, três domínios de resolução, peso de 200 gramas, com correção angular e visor de cristal líquido.

Com estes instrumentos as metodologias adotadas para as medidas de campo foram a planar direta para iluminamento e a comparativa incidência/reflexão para a refletância.

Tabela 13.2. Valores de refletância difusa para as superfícies internas de vias mineiras [8].

superfície	refletância difusa em porcentagem
carvão	5 a 8
madeiramento	15 a 25
xisto	15 a 30
concreto	30 a 55
pó de gipso (CaSO ₄ .2H ₂ O)	50 a 60
superfície caída	60 a 75

14. PROJETO DE ILUMINAÇÃO DE MINAS

14.1. CARACTERÍSTICAS DO PROJETO MINEIRO

A iluminação de uma mina subterrânea apresenta peculiaridades derivadas do tipo de atividade industrial e das rudes condições ambientais. Com relação a iluminação de uma casa algumas comparações interessantes são as seguintes:

- a. numa casa deve-se apagar as luzes ao sair, numa mina não;
- b. em situações de emergência numa casa se utiliza fósforos e velas, mas nunca numa mina. Nesta se usa lâmpadas portáteis de emergência;
- c. na rede mineira deve-se evitar voltagens superiores a 127 volts a menos que as linhas estejam numa altura superior a 2,5 metros;
- d. ao faltar luz numa casa é possível se locomover devagar e com segurança devido à penumbra oriunda da luz exterior; em subsolo a escuridão é total sendo perigoso qualquer locomoção.

As rudes condições ambientais encontradas numa mina incluem as seguintes:

- a. existência de poeira que diminui a transmissão atmosférica e suja as luminárias;
- b. atuação da umidade e das altas temperaturas favorecendo a corrosão;
- c. ocorrência de choques mecânicos devido a mobilidade dos equipamentos, máquinas e pessoal;
- d. existência de gases e poeiras explosivas;
- e. geometria e dimensões das aberturas que favorecem situações de ofuscamento;
- f. baixas refletâncias das superfícies das paredes, pisos e tetos.

O conjunto destas condições especiais faz com que um projeto de iluminação de uma mina tenha componentes de ciência e de arte. Trotter é da opinião que é melhor um engenheiro de minas aprender os fundamentos de iluminação do que um engenheiro elétrico ou mecânico tentar se adaptar as inusitadas condições mineiras [4].

Em subsolo alguns parâmetros podem ser alterados enquanto outros não, e é difícil a comparação entre os valores de projeto e os reais porque simplesmente não existem medidas fotométricas precisas numa mina. Cálculos muito precisos não tem portanto sentido e é comum que para se enquadrar um ambiente em alguma norma se utilize adotar uma margem de segurança de 100% em vez dos valores comuns de 10 a 20%. Por causa disso um bom projeto de iluminação de mina pode ser feito com uma calculadora não sendo necessário nem justificável recorrer-se aos sofisticados programas existentes no mercado.

14.2. DIFICULDADES INERENTES AO AMBIENTE MINEIRO

As maiores dificuldades na elaboração e execução de um projeto mineiro de iluminação estão associadas à:

- a. dificuldades de instalação;
- b. variações de voltagem;

- c. padronização imperfeita das lâmpadas;
- d. alteração da inclinação e orientação das luminárias;
- e. alteração dos fatores de manutenção;
- f. absorção atmosférica;
- g. variações da produção luminosa com o tempo.

14.2.1. DIFICULDADES DE INSTALAÇÃO

O padrão de distribuição de luz e a área iluminada variam em função do local de colocação das luminárias, e numa mina o local de instalação quase nunca é o especificado no projeto. As luminárias são normalmente colocadas nas paredes ou suspensas dos tetos arqueados e os furadores tem a tendência a perfurar nos locais onde a ancoragem possa ser melhor fixada e não exatamente onde estão as marcações. Além disso as superfícies internas das vias subterrâneas são irregulares e estas irregularidades não estão nas plantas utilizadas pelos projetistas.

14.2.2. VARIAÇÕES DE VOLTAGEM

Os dados fornecidos pelos fabricantes para as diversas fontes luminosas estão associados a uma apropriada voltagem para cada lâmpada. Todavia numa mina as variações de voltagem são muito comuns, principalmente devido ao alçamento de esquipe carregado, à passagem de caminhões elétricos, à entrada em operação do sistema de bombeamento, ao funcionamento dos britadores e aos equipamentos elétricos móveis. Operários treinados podem perceber pela incandescência das lâmpadas de filamento quando o motor do guincho é exigido ao máximo durante a aceleração de ascensão do esquipe carregado.

Excessos de voltagem podem também ocorrer com certa frequência causando um aumento do número de lúmens emitidos e uma diminuição da vida útil das lâmpadas. No caso das fontes a vapor de mercúrio voltagens menores que as especificadas geram menores temperaturas dos eletrodos aumentando a dificuldade de re-início do arco a cada meio ciclo, o que pode causar perda do material emitido pelo eletrodo e o conseqüente enegrecimento das paredes do tubo.

14.2.3. PADRONIZAÇÃO IMPERFEITA DAS LÂMPADAS

A distribuição espacial da luz emitida depende da situação dos componentes de controle interno das luminárias, tais como imperfeições nos refletores, pequenas alterações nas dimensões e variações na localização da fonte dentro da lâmpada. Assim duas luminárias vendidas como idênticas podem gerar distribuições bastante diferenciadas.

No caso de lâmpadas de descarga de alta intensidade ("HID") o reostato pode induzir a lâmpada a operar com uma potência diferente da especificada. A influência do reostato e variações de voltagem podem gerar desvios de 40% com relação a potência nominal da lâmpada.

14.2.4. ALTERAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA LUMINÁRIA

Em geral para as luminárias de lâmpadas HID a sua inclinação após a instalação pode se tornar crítica. Uma alteração de apenas um grau pode gerar uma grande mudança na distribuição da luz emitida e estas normalmente derivam do fato de que o local de instalação não coincide com o local especificado no projeto. Por isso o próprio projetista deve inspecionar a instalação.

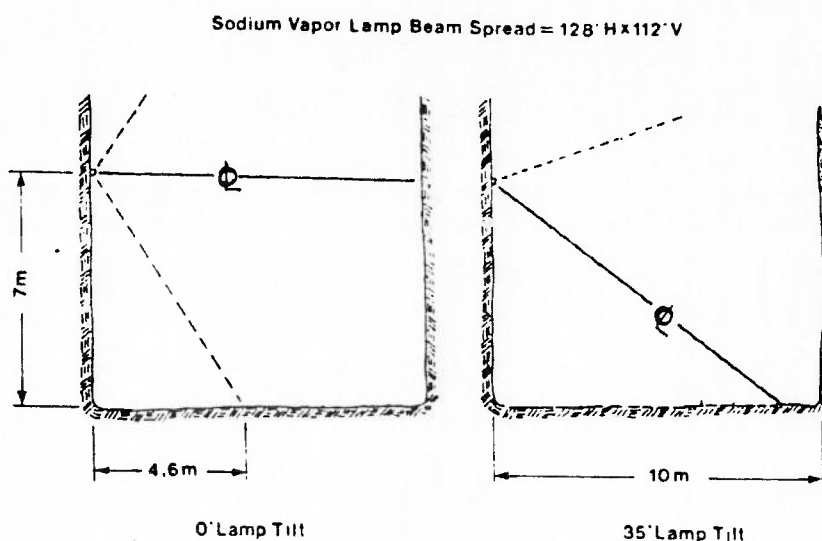


Figura 14.1. Alteração da distribuição espacial da luz emitida por uma fonte em função da mudança do ângulo de inclinação [4].

14.2.5. ALTERAÇÃO DOS FATORES DE MANUTENÇÃO

Fator importante nos projetos mineiros é o empoeiramento das luminárias com o decorrer do tempo e que pode reduzir em mais de 50% o fluxo útil emitido. A poeira reduz o fluxo absorvendo luz e a transformando em calor e também pode influir na distribuição espacial.

A influência da poeira é introduzida no projeto por meio de um fator de manutenção (FM), um número empírico variável de mina para mina e mesmo dentro de uma mesma mina. O valor numérico do fator de manutenção depende da quantidade de poeira existente na mina, do grau de umidade e da presença de água, da velocidade do fluxo de ar e da maior ou menor proximidade de focos geradores de poeira (britadores, realces de detonação, locais de carga, faces extrativas em frente longa por mineradores contínuos, etc).

Minas de carvão são muito empoeiradas e a presença de água transforma o pó em lama. A velocidade do fluxo de ar é importante porque pode impedir que a poeira se deposite em camadas. O fator

de manutenção varia também em função da frequência de limpeza das luminárias, que pode variar desde mensal até apenas quando o bulbo queima. Os fatores de manutenção variam desde 0,9 a 0,3 para os casos mais desfavoráveis.

14.2.6. ABSORÇÃO ATMOSFÉRICA

Numa mina com atmosfera limpa a absorção varia entre 2 a 5% mas em algumas situações críticas ela pode ser bem maior. Bons sistemas de ventilação mantêm a atmosfera razoavelmente limpa mas após detonações ou no encontro de correntes de ar quente úmido com ar frio pode-se ter altos níveis de fumaça ou neblina. Nestas situações pode-se assumir uma absorção que pode atingir valores de dezenas de por cento e baixar o fator de manutenção para valores de 0,5.

14.2.7. VARIACÕES DA PRODUÇÃO LUMINOSA

Mesmo para condições de absoluta limpeza e constância de voltagem o fluxo luminoso emitido por uma lâmpada varia com o tempo. Para algumas lâmpadas como as HID a emissão logo no início da vida útil pode ser maior que o valor indicado pelo fabricante, mas após cerca de 3 meses sempre se tem um decaimento do fluxo. Neste contexto os principais termos usados são:

- a. fluxo luminoso inicial - fluxo emitido pela lâmpada após 100 horas de utilização;
- b. fluxo luminoso de projeto - fluxo emitido após um quarto da vida útil nominal da lâmpada;
- c. fluxo luminoso médio - fluxo médio emitido durante a vida econômica da lâmpada;
- d. fluxo luminoso de manutenção - em geral expresso como uma porcentagem do fluxo inicial e relativo a 70% da vida mediana. Assim para uma lâmpada de sódio de alta pressão de 400 W que tenha vida mediana de 20 000 horas, 70% deste valor representa 14 000 horas. Se para 14 000 horas o fluxo emitido é de 85% do inicial então o fluxo de manutenção é dito de 85%.

14.3. MÉTODO PONTO A PONTO

Neste método se estima o iluminamento ou a luminância no chamado plano de trabalho a partir das distribuições de fluxo das diversas fontes e das leis que relacionam a propagação e a reflexão deste fluxo.

14.3.1. TEORIA BÁSICA

O método ponto a ponto se baseia nas leis do cosseno e do inverso do quadrado da distância, que convenientemente agrupadas dão origem a chamada lei do cosseno ao cubo.

A lei do cosseno é expressa por:

$$E(P) = I / R_p^2 \quad (14.1)$$

onde:

$E(P)$ = iluminamento no ponto P considerado, em lx;
 I = intensidade da fonte na direção do ponto P, em cd;
 R_p = distância entre a fonte puntual e o ponto P, em m.

Esta lei é aplicável para fontes puntuais, com luz atingindo diretamente o ponto considerado e não havendo absorção atmosférica. Ela serve como boa aproximação quando se tem ar limpo, as refletâncias das superfícies das rochas são bem baixas, as medidas são efetuadas a uma certa distância da fonte e as lâmpadas possam ser aproximadas por fontes puntuais.

Como em geral os valores medidos são relativos a um plano horizontal de trabalho e a luz o atinge obliquamente, deve-se introduzir a correção expressa pela lei do cosseno. A fórmula (14.1) se torna:

$$E(P, \theta) = I(\theta) \cos \theta / R_p^2 \quad (14.2)$$

onde:

$E(P, \theta)$ = iluminamento no ponto P do plano de trabalho inclinado de θ com relação a direção unindo a fonte ao ponto P, em lx;
 θ = ângulo entre a normal ao plano de trabalho e a direção fonte-ponto P.

A medida da distância R_p nem sempre é fácil e numa via subterrânea de altura h pode ser mais conveniente se medir distâncias horizontais. A figura 14.2. ilustra uma fonte luminosa colocada na linha média do teto de uma galeria.

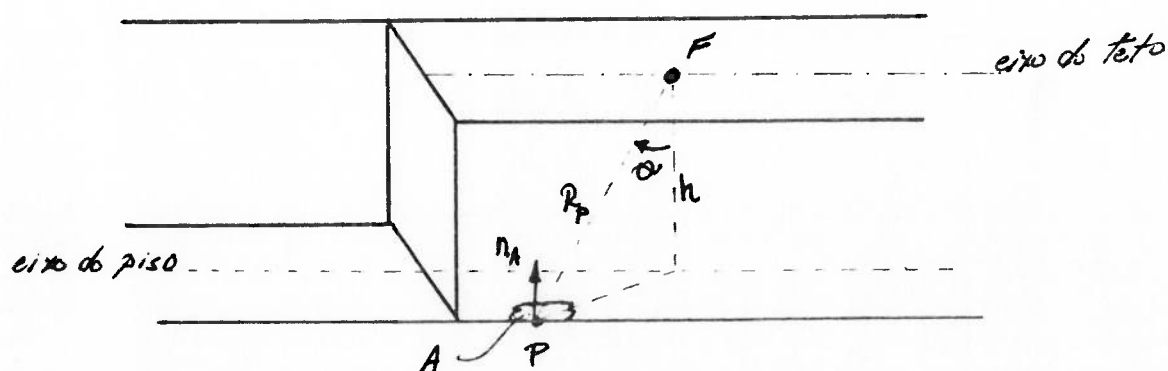


Figura 14.2. Disposição geométrica de galeria de mina adequada para aplicação da lei do cosseno ao cubo.

Da geometria temos:

$$h/R_p = \cos \theta \quad \text{ou} \quad R_p^2 = h^2 / \cos^2 \theta \quad (14.3)$$

Introduzindo (14.3) em (14.2) obtemos:

$$E(P, \theta) = I(\theta) \cos^3 \theta / h^2 \quad (14.4)$$

A expressão (14.4) representa a chamada lei do cosseno ao cubo.

14.3.2. EFEITO DA LUZ DIRETA

Para uma fonte luminosa instalada a uma altura h do piso, para cada ponto deste obtemos um ângulo θ . Com θ e a curva de intensidade luminosa da fonte obtemos os valores de $I(\theta)$ e do cosseno de θ . Com a expressão 14.4. é então possível calcular o iluminamento no ponto considerado.

Muitas normas são definidas em termos de lux incidentes mas a tendência moderna é se usar como critério a quantidade de luz que sai da superfície, ou seja a luz refletida. Quando a superfície for uma superfície lambertiana (difusora perfeita) então é válida a relação entre as diferentes unidades de luz refletida:

$$L' = \pi L \quad (14.5)$$

onde:

L' = luminância em lux;
 L = luminância em nit.

Como a refletância relaciona luz incidente com luz refletida temos:

$$L' = r E \quad (14.6)$$

De (14.5) e (14.6) obtemos:

$$L = r E / \pi \quad (14.7)$$

Finalmente substituindo o iluminamento em (14.7) obtemos:

$$L(P) = r I(\theta) \cos^3 \theta / \pi h^2 \quad (14.8)$$

As expressões (14.4) e (14.8) são as duas expressões teóricas essenciais ao método ponto a ponto, permitindo o cálculo do iluminamento ou da luminância em qualquer ponto do plano de trabalho. Elas permitem o dimensionamento do espaçamento das lâmpadas de modo a se obter valores mínimos dentro das normas e também a estimativa da uniformidade da distribuição da luz.

Como a atmosfera absorve luz é introduzido um fator de absorção (FA) e as expressões se tornam:

$$E(P, \theta) = FA I(\theta) \cos^3 \theta / h^2 \quad (14.9)$$

$$L(P) = (FA/\tilde{I}) r I(\theta) \cos^3 \theta / h^2 \quad (14.10)$$

O fator de absorção atmosférica para minas limpas é da ordem de 0,95 a 0,98 mas em locais críticos pode ser bem menor, devendo ser determinado para cada caso.

As expressões (14.9) e (14.10) são aplicáveis apenas quando se tem luz direta ou quando a luz indireta provindo de reflexões nas demais superfícies é desprezível.

Uma situação típica em que elas são aplicáveis seria o da iluminação de uma via de transporte em mina carbonífera, com as luminárias colocadas no teto e com a maior parte do fluxo orientada para o piso. Nesta situação a maior parte das paredes e teto estaria "na sombra" e a contribuição da luz indireta (via reflexões) proviria da luz refletida pelo piso e em seguida novamente refletida pelas paredes e teto. Para superfícies de carvão esta contribuição de luz indireta é desprezível, e para os casos de escoramento de madeira e caiamento de branco medidas efetuadas indicaram uma contribuição de 10 a 15% [8].

A deposição de pó de carvão nas vias de transporte pode ser muito intensa e uma razoável porcentagem do fluxo direto pode ser perdida em pouco tempo. Medidas efetuadas junto ao ponto de descarga de material no pé do poço de produção indicaram a perda de 17,5% da luz direta no plano de trabalho em pouco tempo [8]. Portanto nestas situações o método ponto a ponto para luz direta é aplicável e a luz indireta pode ser considerada como um bonus minimizador dos efeitos de deposição de poeira.

De modo geral para certas orientações das luminárias e refletâncias das superfícies inferiores a 0,2 pode-se usar o método ponto a ponto considerando apenas a contribuição da luz direta.

14.3.3. CONTRIBUIÇÃO DA LUZ INDIRETA

A grandeza luminância leva em consideração a luz que sai de uma superfície e que nos dá as sensações de brilho e contraste. A colocação de uma fonte luminosa numa abertura subterrânea faz com que a luz seja parcialmente refletida pelo piso, pelas paredes e pelo teto, e estas reflexões continuam indefinidamente. Em espaços confinados por superfícies altamente refletoras o efeito final pode ser um maior número de lúmens refletidos pelas superfícies rochosas com relação aos lúmens emitidos originalmente pela fonte. Nestes casos é importante se considerar a contribuição da luz indireta no projeto e uma estimativa desta contribuição é apresentada a seguir.

Se indicarmos por Φ o fluxo original emitido por uma fonte e se r representar a refletância da rocha, então o total de lúmens gerados por reflexão nas superfícies será dado pela somatória:

$$Lu(S) = r \Phi + r^2 \Phi + r^3 \Phi + r^4 \Phi + \dots \quad (14.11)$$

Ou:

$$Lu(S) = r \Phi \{ 1 + r + r^2 + r^3 + r^4 + \dots \} \quad (14.12)$$

A série da expressão (14.12) é uma progressão geométrica de razão menor que um pois o domínio da refletância é:

$$0 < r < 1$$

O limite desta série é dado por:

$$1 + r + r^2 + r^3 + \dots = 1/(1-r) \quad (14.13)$$

Introduzindo (14.13) em (14.12) obtemos:

$$Lu(S) = r \Phi / (1-r) \quad (14.14)$$

A expressão (14.14) fornece os lúmens oriundos das inter-reflexões pelas superfícies internas e a tabela 14.1. apresenta a influência da refletância sobre esta grandeza.

Tabela 14.1. Valores do fluxo luminoso devido a múltiplas reflexões em função da refletância.

refletância (r)	fluxo luminoso Lu(S)
0,9	9 0
0,6	1,5 0
0,4	0,33 0
0,2	0,25 0
0,1	0,11 0
0,05	0,05 0

Na prática os valores são menores que os apresentados na tabela (14.1) devido a absorção atmosférica e ao fato da área em análise nunca ser totalmente fechada por superfícies refletoras de modo que uma parte da luz escapa do ambiente. Esta tabela mostra também claramente a eficiência de se aumentar as refletâncias das paredes; aumentando-se a refletância de 0,2 para 0,6 (fator de 3) o fluxo associado a reflexão passa de 0,25 para 1,5 (fator de 6).

Para valores da refletância inferiores a 0,2 o benefício oriundo das inter-reflexões é pequeno e pode ser desprezado nos cálculos. Todavia para valores superiores a 0,2 a contribuição é maior e já se justifica sua inclusão nos cálculos.

As expressões (14.9) e (14.10) se tornam:

$$E(P, \theta) = FA I(\theta) \cos^3 \theta / h^2 \quad (14.15)$$

$$L(P) = (FA/\bar{\rho}) (r/(1-r)) I(\theta) \cos^3 \theta / h^2 \quad (14.16)$$

14.4. MÉTODO DOS LUMENS

O método dos lumens foi criado em 1915 por Harrison e Anderson e é também denominado de método do coeficiente de utilização. Ele se baseia nas características dos fluxos de várias luminárias os quais são subdivididos em diversas componentes; posteriormente através de observação em interiores típicos são estimadas as porcentagens de cada componente que incide no plano de trabalho. Estas porcentagens definem os chamados coeficientes de utilização (CUT), que relacionam o fluxo útil com o fluxo total emitido pela fonte.

Este método é útil para se checar se o iluminamento ou a luminância de uma área estão dentro dos limites prescritos na lei e a sua desvantagem é que não fornece informações sobre as variações de iluminamento em diferentes pontos.

14.4.1. FORMULAÇÃO BÁSICA

As expressões matemáticas que sintetizam este método são as seguintes:

$$E = [n \bar{\Phi} / S] (FM FA CUT) \quad (14.17)$$

$$L = [r / (1-r)] [n \bar{\Phi} / S] (FM FA CUT) \quad (14.18)$$

onde:

- E = iluminamento médio no plano de trabalho, em lx;
- L = luminância média do plano de trabalho, em nt;
- n = número de luminárias;
- $\bar{\Phi}$ = fluxo luminoso nominal de cada lâmpada, em lm;
- S = superfície a ser iluminada, em m²;
- r = refletância difusa da superfície;
- FM = fator de manutenção;
- FA = fator de absorção atmosférica;
- CUT = coeficiente de utilização, que exprime o quociente entre lumens no plano de trabalho e lumens nominais da lâmpada.

Existe uma estreita correlação entre n e $\bar{\Phi}$. Sendo n grande $\bar{\Phi}$

pode ser pequeno e o espaçamento das luminárias é menor. Uma regra prática utilizada em minas é de se ter espaçamento tal que nenhuma luminária contribua com mais de 50% do iluminamento no plano de trabalho. Nestas condições bulbos queimados podem ser tolerados por curtos intervalos de tempo.

Em minas a pequena altura das luminárias implica em fatores de absorção também pequenos e a não ser em situações especiais ele pode ser tomado como 0,95 ou 0,98. Situações especiais ocorrem em pontos de carregamento e descarregamento, e junto a máquinas com fumos de exaustão. Nestes casos um valor mais baixo deve ser estimado.

Na prática são possíveis várias combinações que satisfaçam as expressões (14.17) e (14.18), envolvendo altura das luminárias, espaçamento, tipos de lâmpadas, sistemas de distribuição e reflexão do fluxo. O arranjo ótimo pode ser mais rapidamente obtido por meio de programas computacionais e quando varios arranjos são satisfatórios a decisão final se baseia em critério econômico.

14.4.2. FATOR DE MANUTENÇÃO

O fator de manutenção reflete o inconstante desempenho de um sistema de luminárias devido a deposição de poeira. Esta deposição reduz a transparência das luminárias e também a refletância das superfícies. Em ambientes industriais não mineiros, com uma atmosfera limpa e limpeza das luminárias a cada 6 semanas, um valor médio adotado para o fator de manutenção é 0,8. Minas em geral apresentam valores inferiores e o valor de 0,5 é aplicável em muitas situações.

A tabela 14.2. apresenta alguns valores utilizáveis em projeto. Para ambientes muito empoeirados e limpeza apenas quando da substituição de bulbos queimados o fator de manutenção pode atingir ao valor de 0,3. Isto significa que próximo ao fim de sua vida útil menos de um terço da luz emitida por uma lâmpada é efetivamente usada para iluminar o plano de trabalho. Como a taxa de perda de luz útil decai com o tempo, a estratégia de limpeza deve envolver limpeza frequente ou nenhuma limpeza.

Os fatores de manutenção devem preferencialmente ser obtidos para a situação real de cada mina, efetuando-se levantamentos imediatamente antes e depois da limpeza das luminárias. A comparação das respectivas curvas isolux permite ao projetista ter uma estimativa da quantidade de luz perdida devido a poeira e sujeira. Quando isto não for factível então utiliza-se os valores da tabela 14.2.

14.4.3. COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO

Este coeficiente é necessário porque a luminária não direciona todo o fluxo emitido para a superfície em análise, e parte deste incide no teto e nas paredes. Quando um dos critérios de projeto se baseia em níveis mínimos de iluminamento ou luminância no piso, deve-se considerar então apenas a parte do fluxo que incide diretamente no piso.

Tabela 14.2. Fatores de manutenção (FM) para minas subterrâneas [4].

condições ambientais	frequência de limpeza	FM
muita poeira	mensal	0,8
	semestral	0,6
	anual	0,4
	apenas quando da troca de bulbo queimado	0,3
moderadamente empoeirada	mensal	0,9
	semestral	0,8
	anual	0,7
	apenas quando da troca de bulbo queimado	0,6

O coeficiente de utilização (CUT) é o quociente entre lúmens que atingem a área considerada e lúmens emitidos pela lâmpada, e é portanto uma avaliação da eficiência direcional do sistema de iluminação. Ele depende de fatores como a razão entre fluxos emitidos para cima e para baixo pela luminária, a forma da curva de distribuição de intensidade luminosa da lâmpada, as dimensões da área iluminada, e as refletâncias das superfícies.

O coeficiente de utilização pode ser apresentado de várias formas e em geral as tabelas se baseiam no chamado índice de área ("room index") que é definido pela expressão:

$$I(\text{área}) = \{ L \times C \} / \{ L + C \} H \quad (14.19)$$

onde:

L = largura da área a ser iluminada, em m;

C = comprimento da área a ser iluminada, em m;

H = altura da luminária acima do plano de trabalho, em m.

Da expressão (14.19) se percebe que as vias mineiras que são estreitas e longas, e com alturas de luminária pequenas, tem índices relativamente menores que áreas de forma aproximadamente quadrada. Índices de área menores indicam coeficientes de utilização menores pois refletem maiores dificuldades de se iluminar a área de interesse. A tabela 14.3 apresenta alguns valores do índice de área para 3 tipos de luminária. Esta tabela mostra que existem grandes diferenças no CUT devido a diferentes características das luminárias, principalmente quanto a habilidade de direcionar o fluxo luminoso. A melhor luminária utilizada com um alto índice de área coloca apenas 2/3 da luz emitida aonde se

deseja. Um aumento da refletância da rocha de 0,1 para 0,3 acrescentaria apenas 0,02 aos valores da tabela; este pequeno aumento mostra que nos cálculos de iluminação de minas a luz adicional oriunda de reflexões (em superfícies rochosas não tratadas) pode ser normalmente desprezada.

Existem muitas tabelas do coeficiente de utilização para os padrões industriais e comerciais comuns, ou seja salas e salões amplos e de forma retangular. Esta geometria é aproximada pelas grandes câmaras subterrâneas mas não pela maioria das vias que tem pequena altura, pequena largura (entre 3 e 7 m) e grande comprimento. Além disso as secções das galerias podem ser quadradas, circulares, elípticas ou ovaladas. Quando as paredes são tratadas estas formas atuam como refletores e a posição relativa da luminária na secção se torna importante. Quando a altura e posição da luminária está definida os níveis de iluminamento são melhor estimados na mineração pela metodologia ponto a ponto.

Tabela 14.3. Índices de área I(área) e coeficientes de utilização (CUT) para três tipos de luminária. A refletância da rocha foi assumida como 0,10 [4]. A refletorizada direciona a maior parte do fluxo para baixo, a com bulbo difuso emite fluxo em todas as direções de modo quase uniforme, e a fluorescente apresenta uma superfície refletora por cima.

Índice de área I(área)	CUT para diferentes tipos de luminária		
	refletorizada	bulbo difuso	fluorescente
0,6	0,33	0,16	0,23
0,8	0,40	0,22	0,28
1,0	0,45	0,26	0,32
1,25	0,49	0,29	0,35
1,5	0,53	0,32	0,38
2,0	0,57	0,36	0,41
2,5	0,60	0,40	0,43
3,0	0,62	0,43	0,44
4,0	0,64	0,46	0,46
5,0	0,66	0,48	0,47

14.5. ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO

Da análise das fórmulas utilizadas pelos métodos ponto a ponto e dos lúmens pode-se perceber que os níveis de iluminamento e de luminância podem ser incrementados por diversos procedimentos. Entre eles temos o aumento da refletância da rocha, o uso de lâmpadas de maior potência, o agrupamento de várias lâmpadas, o aumento do fator de manutenção (via limpezas mais frequentes), o aumento do fator de absorção (via melhor ventilação para decréscimo de poeira ou neblina), e aumento do coeficiente de utilização (pela melhor distribuição da luz na luminária).

Um dos parâmetros mais influentes é a refletância e é por causa dele que algumas minas são bem mais fáceis de iluminar que outras. Dentre as minas "mais fáceis" temos as de sal, de potássio, de gipso, de talco, de ouro quando a encaixante é quartzito, e em geral as de pegmatito. Via de regra as rochas ácidas, ricas em alumínio e sílica, tem refletâncias mais altas que as rochas básicas, ricas em ferro e magnésio. As minas mais difíceis de iluminar são as de carvão mas são difíceis também minas metálicas associadas a gabros e outras rochas escuras.

Nas minas com rochas escuras o aumento da refletância das superfícies é um importante fator a ser considerado no projeto. O aumento da refletância de superfícies internas de aberturas subterrâneas pode ser obtido por caiiação, por pintura ou por outros procedimentos não associados somente com problemas de iluminação.

Um dos processos mais simples e efetivo é a caiiação, que quando recém aplicada pode gerar uma refletância na faixa de 0,70 a 0,95. Com o tempo este valor diminui e a tabela 14.4. apresenta valores obtidos para algumas minas canadenses para as situações antes de cair e dois anos após a caiiação. As áreas caiadas incluíam estações junto a poços, vias principais de transporte, refeitórios, rampas, garagens, oficinas, salas de britagem, galerias com correias transportadoras, salas de guincho, etc.

Tabela 14.4. Valores de refletância de superfícies mineiras antes da caiiação e após dois anos [4].

mina	refletância	
	antes de cair	dois anos após cair
Brunswick	0,25 a 0,30	0,40 a 0,60
Strathcona	0,25 a 0,32	0,35 a 0,70
Flin Flon	0,13 a 0,20	0,25 a 0,70

Tintas metálicas devem ser evitadas porque tem menor refletância e geram uma alta componente especular, devendo-se optar por tintas brancas sem brilho. Estas tem refletâncias próximas da caiiação recém aplicada, e apesar de relativamente

mais caras que a cal duram mais e apresentam pequena diminuição da refletância com o tempo. A periódica lavagem das paredes pintadas ou caiadas é importante para remoção de pó e sujeira.

A utilização de cimento em geral também melhora a refletância. Um piso cimentado em geral apresenta maior refletância que a rocha encaixante além de melhorar o movimento e diminuir o desgaste de pneus. O concreto projetado nas paredes além de aumentar a resistência estrutural provoca um aumento da luminância. Em ambos os casos periódicas limpezas devem ser executadas.

Em alguns países existem normas definindo valores mínimos de refletância para as partes externas de equipamentos móveis, e no caso dos USA o valor é de 0,30. Este limite mínimo é bem maior que por exemplo o valor de 0,08 relativo a refletância do cinza metálico utilizado em certos equipamentos de abertura de galerias.

O uso de fitas refletoras com refletância entre 0,9 e 1 é altamente recomendável nos equipamentos e nos capacetes individuais, sendo também obrigatório em certos países.

Dentro de certos limites a refletância pode ser alterada por meio da escolha da fonte de luz; emissões na faixa verde-azul típica de vapor de mercúrio tendem a fornecer refletâncias maiores que a luz monocromática amarela das lâmpadas de sódio.

15. NORMAS DE ILUMINAÇÃO PARA MINERAÇÃO

15.1. ILUMINAÇÃO A CÉU ABERTO E EM SUBSOLO

Existe uma diferença fundamental entre as iluminações a céu aberto e em subsolo. Quando ocorre uma interrupção da iluminação superficial o olho em pouco tempo se acostuma a pouca claridade que normalmente permanece. Esta claridade remanescente pode ter origem em luzes distantes, no luar ou na luz das estrelas, e permite que se veja pelo menos as formas dos objetos. Por outro lado a interrupção da iluminação em subsolo gera um ambiente totalmente escuro, ao qual o olho nunca se acostuma apesar de psicologicamente se esperar por isso. Na escuridão total quase nada se pode fazer, perdendo-se a noção de direção, de sentido e de tempo e sendo perigoso qualquer movimentação.

Portanto as prioridades das iluminações superficial e subterrânea são diferentes. Na superfície a prioridade é se iluminar bem os locais de maior perigo como taludes, onde a inspeção é contínua. Talvez a única desvantagem da mineração a céu aberto com relação a iluminação natural seja um certo incomodo visual em minas com minerais de alta refletância (como mármore e giz). Em alguns casos durante certo período do dia trabalhadores utilizam óculos escuros.

Já em subsolo a prioridade maior é a confiabilidade da iluminação e as alternativas em casos de emergência, vindo a seguir então os níveis de iluminamento nos locais de trabalho e trânsito.

Os projetos de iluminação de minas tem inúmeros fatores complicadores mas tem duas vantagens:

- a. a maioria dos trabalhos não é de detalhe e envolve equipamentos e ferramentas de grande porte, não requerendo alto nível de iluminamento;
- b. a maioria dos riscos está associada a movimento de equipamentos, o qual é perceptível mesmo com baixo nível de iluminamento.

Minas a céu aberto apresentam necessidade de iluminação tanto em áreas de extração como nas instalações de infra-estrutura. As áreas de extração podem ser pedreiras, cavas profundas, áreas lavradas em tiras, áreas de dragagem ou de desmonte hidráulico, podendo-se ter grandes extensões ou pequenas áreas numa encosta.

Os equipamentos de mineração podem ter grandes dimensões e caminhões tem limitada visibilidade requerendo junto com as correias transportadoras especial atenção. Caminhões devem ter lâmpadas robustas instaladas em suportes resistentes a impactos e nas áreas externas podem ser colocados potentes holofotes em "shovels" e "draglines". Estes holofotes de alta potência (500W, 1 000 W ou mais) são também utilizados em grandes salões subterrâneos.

Quanto às instalações de apoio a lavra, merecem atenção os pontos de carregamento, as sub-estações elétricas, as estações de bombeamento, as instalações de tratamento e cominuição, as áreas de estoque, as oficinas de manutenção, as salas de controle, as escadas e rampas, os banheiros, os vestiários e os escritórios.

As áreas de britagem, moagem, peneiramento e separação são em

geral poeirentas, barulhentas e com vibrações. A iluminação deve evitar sombras (para diminuir riscos) e ser a prova de pó e umidade (o que facilita a limpeza por jatos de água).

Na iluminação subterrânea as lâmpadas pessoais são consideradas como fonte primária e a iluminação de rede é considerada como fonte secundária. Isto significa que mesmo se tendo uma boa iluminação de rede deve-se ter em subsolo fácil acesso a lanternas pessoais, além da lâmpada portátil de capacete.

Os projetos de iluminação subterrânea devem incluir o fator mobilidade e a taxa de utilização das áreas. A mobilidade engloba tanto a de pessoal como a das frentes de lavra e equipamentos. Quanto a taxa de uso de um local, em geral minas subterrâneas contêm áreas restritas de alta atividade de trabalho e grandes extensões pouco utilizadas.

Em locais de longa permanência de pessoal como oficinas e escritórios, deve-se seguir a prática normal de iluminação. Já em locais de curta permanência o nível geral de iluminamento deve ser baixo para se minimizar os problemas de adaptação visual na chegada; um nível baixo de iluminamento geral significa iluminamento da mesma ordem daquele produzido por lanternas pessoais.

Sempre que possível a rede secundária deve conter fontes difusas de luz para diminuir o ofuscamento, já que muitas vezes devido às dimensões das vias subterrâneas as lâmpadas são colocadas a altura dos olhos. A diminuição da visibilidade por causa de fumaça, poeira e partículas não queimadas de carvão pode ser bastante minimizada com auxílio de uma boa ventilação.

Finalmente em atmosferas explosivas, como aquelas contendo metano e ou pó de carvão, a iluminação deve ser feita com luminárias a prova de explosão.

15.2. RECOMENDAÇÕES GERAIS DE ILUMINAÇÃO

As recomendações relativas às condições de iluminação artificial são em geral especificadas em termos de iluminamento ou luminância. O iluminamento que devem receber as superfícies dos objetos depende da utilização dos mesmos, e observando-se a evolução temporal do número de lux recomendados percebe-se um aumento deste valor. Isto reflete uma maior atenção dada aos problemas de iluminação, o barateamento da energia elétrica e a melhoria tecnológica das lâmpadas disponíveis no mercado.

A tabela 15.1. apresenta valores recomendados de iluminamento encontrados na literatura, e permite que se tenha idéia das ordens de grandeza envolvidas.

Entre as tarefas que exigem altíssimos níveis de iluminamento destacamos: partos de mesa e cadeira odontológica (5000 lx), pronto socorro local (10 000 lx), autópsia local (15 000 lx), mesa de operação (20 000 lx).

Quando se tem iluminação geral mais luz concentrada em pontos convenientes, o nível de iluminação do ambiente não deve ser inferior a 1/10 do valor do campo de trabalho, mesmo que o nível recomendado para o ambiente seja menor.

A tabela 15.2. apresenta alguns valores tirados da "IES - Illuminating Engineering Society", observando-se se ter a mesma

ordem de grandeza dos valores da tabela 15.1.

Tabela 15.1. Níveis de iluminação normalmente recomendados na literatura.

iluminação	E.(lx)	descrição das atividades recomendadas
iluminação geral para áreas sem uso frequente ou tarefas visuais simples	~ 20	feições humanas vagamente distinguíveis, valor mínimo para áreas externas de circulação, pátio de trens
	20 a 50	trabalho bruto com objetos graúdos, depósitos externos, áreas de estacionamento internas
	50 a 100	trabalho bruto sem uso contínuo dos olhos, havendo bom contraste pode-se ter objetos de tamanho regular e baixas velocidades; docas, cais, teatros, salas de concerto, banheiros, quartos de hotéis
	100 a 200	feições humanas bem distinguíveis, trabalho ordinário e tarefas moderadas, áreas de circulação em indústrias e depósitos
iluminação geral para áreas internas de trabalho	200 a 300	tarefas moderadamente críticas e não muito prolongadas, trabalho bruto em bancadas e máquina, processos gerais nas indústrias química e alimentícia, leitura casual
	~ 500	trabalho médio de bancada e máquina, montagem de veículo, tipografias, lojas e escritórios em geral
	500-1000	ocupações árduas e prolongadas mas sem alta velocidade, salas de desenho, trabalho fino de bancada e máquina
	~ 1500	trabalho muito fino de bancada e máquina, componentes eletrônicos, inspeção de peças pequenas e complexas
iluminação localizada para tarefas visuais exatas	> 2000	trabalho de detalhe de grande precisão, relojoaria, inspeção de manchas em tinturaria, solda em indústria de aviões, usinagem de alta precisão, etc

Em resumo podemos considerar três faixas básicas de iluminamento:

- a. 20 a 200 lux - para locais de pouco uso e com iluminação geral
- b. 200 a 2 000 lux - para iluminação de áreas de trabalho internas, as vezes com luz localizada
- c. 2 000 a 20 000 lux - para tarefas difíceis, com iluminação local adicional

Tabela 15.2. Valores mínimos de iluminamento recomendados pela IES americana [58].

E (lux)	atividades
10 a 215	pátio de trens, ...
~ 107	correia transportadora de carvão, britadores
~ 538	fornos, oficinas de máquinas, ...
322 a 538	moinhos de rolo, ...
753 a 1614	escritórios, ...
10 760	inspeção de alta precisão, ...

15.3. A NORMA BRASILEIRA NB-57

O Anexo A apresenta as recomendações da ABNT para a iluminação de interiores, expressas na Norma Brasileira NB-57 adotada em maio de 1991 e com errata em julho de 1991. Na P-NB-57 de 1958 a grandeza considerada era denominada de iluminamento, mas na NB-57 de 1991 a mesma grandeza é denominada de iluminância, ambas dadas em lux. Neste texto utilizamos ambas as denominações como sinônimos.

O Anexo B apresenta para diversas atividades os níveis mínimos de iluminamento exigidos legalmente pelo Ministério do Trabalho, os quais foram definidos através da Portaria 3 214 de 1978 e de sua Norma Regulamentadora no. 15.

A tabela 15.3. apresenta alguns dos valores constantes da NB-57, onde os valores medianos são os recomendados de modo geral. A aplicabilidade dos valores mínimos e máximos está especificada nos itens 5.2.4.2. e 5.2.4.3. da referida norma.

Em ambos os textos, P-NB-57 e NB-57, não se nota nenhuma referência a atividade de mineração em subsolo.

Todas as especificações apresentadas anteriormente estão em função da grandeza iluminamento, mas o que se realmente vê é a luz refletida nos objetos. Os níveis especificados levam em consideração as refletâncias médias encontradas nas diversas atividades, mas as especificações poderiam ser também em termos de níveis de luminância. A tabela 15.4. apresenta alguns valores

relacionando ordens de grandeza de especificações tanto em níveis de iluminamento como em níveis de luminância.

A figura 15.1. apresenta um esquema para iluminação de interiores em termos de luminância. No caso de salas a luminância preferida das paredes é quase independente das tarefas e do nível de iluminação geral e estando o iluminamento entre 500 a 2 000 lux, 100 nit podem ser considerados como valor de referência para a luminância ótima das paredes.

Especificações em termos de luminância são importantes no caso de luminárias quando se considera problemas de ofuscamento.

Tabela 15.3. Alguns valores constantes na NB-57 [57].

atividades	E (lux)		
Escolas:			
salas de aula	200	300	500
quadros-negros	300	500	750
salas de desenho	300	500	750
Escritórios:			
salas de datilografia	300	500	750
salas de conferências	150	200	300
salas de recepção	100	150	200
Fundições:			
área de carregamento e enchimento	100	150	200
moldagem grosseira	150	200	300
limpeza e acabamento	150	200	300
Indústria de automóveis:			
linha de montagem do chassi	200	300	500
montagem de carrocerias	200	300	500
acabamento e inspeção	750	1000	1500
Indústria de cimento:			
moagem e fornos	100	150	200
ensacamento	100	150	200
escalas, painéis e instrumentos	300	500	750
Indústria de material elétrico:			
impregnação	100	200	300
isolação	300	500	750
enrolamento e bobinagem	300	500	700

15.4. A COMISSÃO INTERNACIONAL DE ILUMINAÇÃO - CIE

Durante a Feira Mundial de Paris em 1900, desenvolveu-se o Congresso Internacional da Indústria de Gás no qual se decidiu

estabelecer uma associação internacional para realizar estudos fotométricos dos gases combustíveis usados em iluminação. Assim foi criada a Comissão Internacional de Fotometria a qual logo ampliou seus objetivos para incluir também a construção de fontes luminosas elétricas e suas aplicações práticas.

Tabela 15.4. Luminâncias recomendadas e iluminamentos horizontais correspondentes.

luminância (nit)	iluminamento (lux)	atividade ou situação
1	20	feições humanas vagamente distinguíveis
10 a 20	200	feições humanas satisfatoriamente distinguíveis
100 a 400	2 000	condições ótimas de visão para trabalho normal em interiores
1 000	20 000	luminância da tarefa com refletâncias acima de 0,15

Em agosto de 1913, em sua reunião de Berlim, decidiu-se pela criação da "CIE - Commission Internationale de l'Eclairage / International Commission on Illumination".

Os objetivos iniciais da CIE eram continuar os trabalhos da Comissão de Fotometria e englobar os novos problemas práticos associados a iluminação elétrica. Atualmente os principais objetivos da CIE são:

- ser um fórum internacional de debates para todos os assuntos associados a arte e ciência da iluminação;
- promover o estudo de temas de iluminação e o intercâmbio de informações entre os diversos países;
- preparar e publicar definições e recomendações aprovadas internacionalmente no campo da iluminação.

A atuação da CIE se apoia em Comitês Técnicos (TC) e em Grupos de Estudo (SG), sendo que cada Comitê Técnico é indicado para um país membro. O trabalho de cada TC é revisto anualmente e analisado em detalhe a quatro anos nas Sessões Plenárias da CIE. Atualmente a CIE conta com cerca de 30 TC e um SG, e também 30 países membros, além de 10 indivíduos de outros países que tem a designação de membro associado.

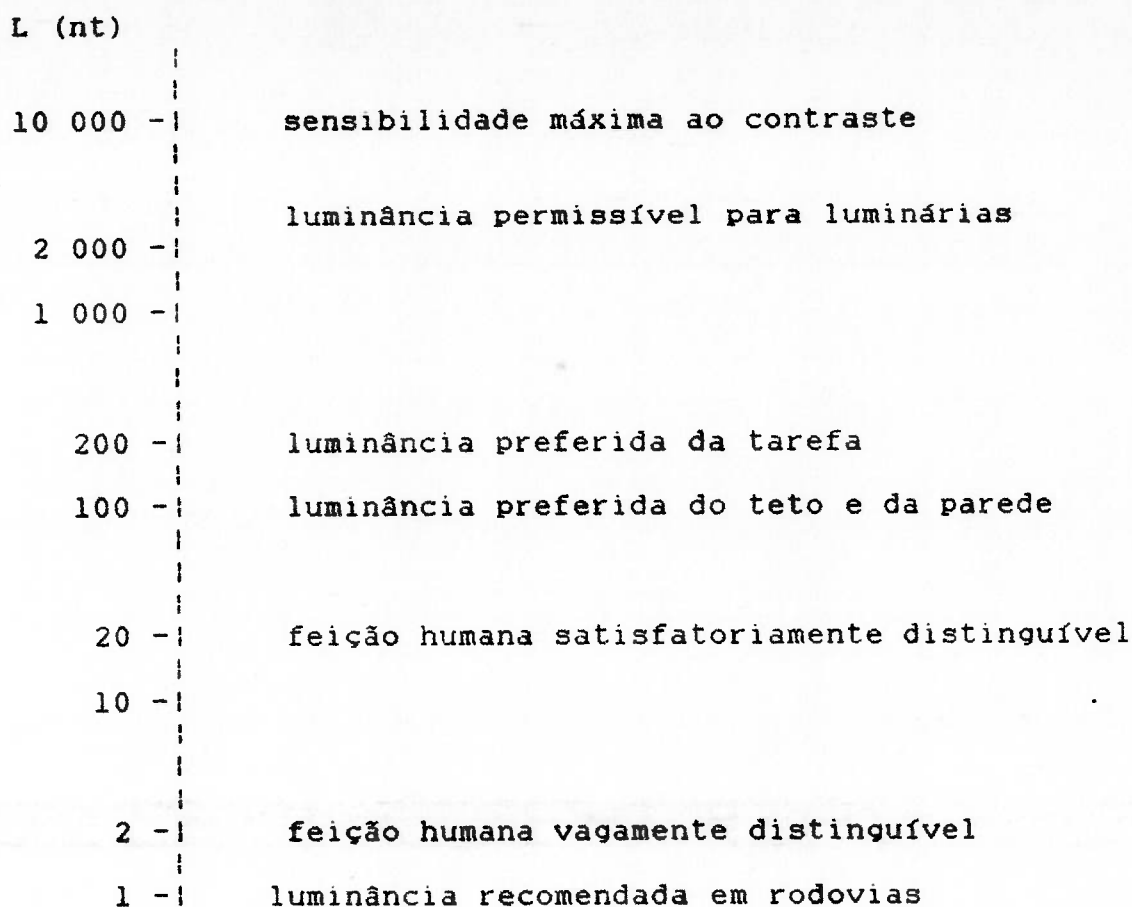


Figura 15.1. Esquema de luminância para iluminação de interiores.

15.5. OS COMITÊS TÉCNICOS PARA ILUMINAÇÃO DE MINAS

Em setembro de 1931, na 8a. Sessão Plenária da CIE ocorrida em Cambridge, o inglês W. Maurice apresentou um trabalho intitulado "A standart of illumination for mines". Após análises e discussões a CIE concluiu que a iluminação mineira tinha características e problemas próprios, e criou o "Comitê de Estudos 29 - Iluminação de Minas".

A iluminação de minas tem características próprias pois quase tudo envolve movimento, o que é muito diferente de um operário em pé ou sentado numa fábrica. Também não se pode considerar como igual à iluminação geral de uma fábrica porque a mobilidade requer luminárias instaladas nas máquinas e nos operários, as quais devem ser duráveis num ambiente agressivo e não devem introduzir novos riscos. O mineiro tem que ver bem para executar sua tarefa e estar em segurança, já que trabalha num ambiente perigoso e visualmente difícil.

O Comitê de Estudos 29 tinha como objetivo inicial "estudar normas e métodos usados na iluminação de minas de carvão, tanto individual como geral". Ele preparou um questionário internacional que foi respondido por oito países e a partir do qual foi possível ampliar seus objetivos, redefinidos na 9a.

Plenária de 1935 em Berlim, e que incluíam medidas de iluminação em minas e o estudo da influência da iluminação e ofuscamento sobre a segurança e a eficiência.

Durante cerca de 32 anos ele foi um ativo Comitê, mas na 15a. Sessão Plenária ocorrida em 1963 em Viena, a proposta de transforma-lo em Comitê Especialista não foi aprovada pela Comissão Executiva da CIE. Os principais motivos da não aprovação eram o declínio da mineração de carvão na Europa e USA, e a dificuldade de se ter ativa cooperação dos Comitês nacionais.

Deste modo em 1967, na 16a. Sessão da CIE em Washington, foi extinguido o então denominado Comitê de Estudos S.3.1.5. - Iluminação de Minas, cujas atividades foram absorvidas pelo Comitê Especialista E.3.1.2 - Iluminação de Interiores.

Todavia em 1971 em Barcelona o polonês A. Peretiatkowicz propôs a criação de um novo grupo de estudos orientado aos problemas da iluminação mineira. Os Comitês nacionais foram consultados e foram favoráveis, principalmente face a intensificação da lavra de carvão devido a crise energética de 1973.

Finalmente em 1975 em Londres, o Comitê Executivo da CIE criou o Comitê Técnico 4.10 - Iluminação de Minas, e para o qual 16 países designaram representantes. Seus primeiros objetivos eram: preparar recomendações internacionais para iluminação em subsolo, avaliar a prática mundial de iluminação mineira e preparar vocabulário e definições pertinentes.

A primeira reunião do Comitê Técnico 4.10 ocorreu em 1978 na Polônia e contou com 12 delegados de 5 países; sua segunda reunião anual ocorreu no Japão em 1979 e contou com 22 delegados de 12 países.

Eram então membros do TC 4.10 os seguintes países: Austrália, Bulgária, Canadá, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Holanda, Hungria, Inglaterra, Itália, Japão, Polônia, República da África do Sul, República Federal da Alemanha, România, Tchecoslováquia, URSS e USA.

O programa de trabalho do TC 4.10 incluía:

- a. analisar e preparar recomendações para minas a céu aberto;
- b. estudar a aplicação de medidas fotométricas em minas;
- c. investigar e opinar sobre lâmpadas pessoais;
- d. investigar os requerimentos para iluminação subterrânea;
- e. padronizar a terminologia.

A execução deste programa estava nas mãos de três Sub-comitês a saber:

Sub-Comitê 4.10. A - Medidas de parâmetros fotométricos em minas

Sub-Comitê 4.10. B - Iluminação a céu aberto

Sub-Comitê 4.10. C - Fontes luminosas para minas

Atualmente estes sub-comitês tiveram seus nomes alterados respectivamente para TC 5-01, TC 5-02 e TC 5-03, com as seguintes características [26,30]:

Comitê Técnico TC 5-01 - Iluminação de minas subterrâneas

Coordenador: R. Hemp - RSA

Objetivo: Elaborar proposta definitiva para níveis de iluminação em minas subterrâneas.

Comitê Técnico TC 5-02 - Medidas de parâmetros luminosos em minas subterrâneas

Coordenador: B Weis - Alemanha

Objetivo: Elaborar guia para inspeção e medição da iluminação em subsolo.

Comitê Técnico TC 5-03 - Iluminação em minas a céu aberto

Coordenador: P.K. Bandyopadhyay - Índia

Objetivo: Elaboração de manual para projeto de iluminação em minas a céu aberto.

O Anexo T apresenta os países membros dos Comitês Técnicos para iluminação de minas bem como seus representantes.

15.6. RECOMENDAÇÕES DA CIE PARA A ILUMINAÇÃO DE MINAS

Quando os trabalhos dos Comitês Técnicos evoluem a um ponto onde se tem concordância dos países membros é então elaborado um relatório com recomendações. Estes relatórios são distribuídos aos países membros e não tem caráter de obrigatoriedade mas são considerados como referência para que os países membros desenvolvam suas próprias normas. Apesar de não desenvolverem pesquisas independentes os Comitês Técnicos colaboram com várias entidades como a IES, e com universidades e laboratórios de pesquisa do mundo todo.

As recomendações para minas subterrâneas envolvem aspectos de nível de iluminação, uniformidade de distribuição, ofuscamento e campo visual. A seguir são resumidas algumas das principais recomendações já elaboradas [4,29,31].

15.6.1. TIPOS DE ILUMINAÇÃO

Quanto à iluminação nos locais de trabalho e nos locais de permanência temporária são considerados três tipos de sistemas de iluminação:

- a. iluminação geral - relativa à iluminação de todo o realce ou dos locais aonde existam trabalhadores em atividade ou em deslocamento.
- b. iluminação local - aonde não existe iluminação geral ou aonde esta não assegure níveis adequados ao tipo de operação sendo realizada num local específico.
- c. iluminação pessoal portátil - deve assegurar condições mínimas de segurança para a movimentação de trabalho e evacuação durante uma situação emergencial.

Quanto a iluminação geral os espaços subterrâneos podem ser subdivididos em 4 grupos:

Grupo 1 - áreas onde a iluminação é obrigatória.

O sistema de iluminação pode ser baseado na rede elétrica da mina ou em máquinas mecanizadas móveis. Este grupo engloba todos os locais onde se tenha trabalho humano contínuo, ou aonde a passagem ou permanência temporária envolvam riscos ou situações críticas. Neste último casos enquadram-se:

- vias de acesso e vias principais de deslocamento (estações de poços, galerias de transporte com deslocamento de pessoal,

- etc);
- estações de carregamento e galerias com correias transportadoras com deslocamento de pessoal;
 - câmaras e salas (oficinas, garagens, estocagem, serviços de manutenção, etc);
 - instalações elétricas e mecânicas (subestações, geradores, compressores, refrigeradores, bombas de água, ventiladores, etc);
 - realces de produção, faces de extração e de avanço;
 - áreas com iluminação de emergência.

Grupo 2 - áreas onde a iluminação geral é aconselhável mas não obrigatória.

Nestes locais a iluminação geral deve ser introduzida a partir da rede elétrica da mina. Neste grupo se enquadram locais com trabalho eventual ou temporário, ou locais pelos quais a passagem não envolva riscos altos. Como exemplos temos:

- faces onde a lavra está paralizada em toda a extensão mas aonde algum equipamento ainda é operado;
- regiões de realces afastadas das frentes;
- galerias com correias transportadoras sem deslocamento de pedestres;
- rampas ou planos inclinados sem acesso ou passagem de pedestres;
- vias secundárias de acesso a equipamentos de pequeno porte;
- portas de ventilação junto a vias de transporte e deslocamento de pessoal;
- vias de deslocamento de pedestres (de interligação ou acesso a equipamentos isolados).

Grupo 3 - áreas onde a iluminação baseada na rede elétrica da mina não se faz necessária.

Incluem-se aqui as áreas de baixo tráfego, poços com deslocamento de pessoal ou áreas onde continuamente haja pessoal mas exista iluminação adequada suprida por faróis e holofotes de máquinas e equipamentos mecanizados (tais como mineradores contínuos).

Grupo 4 - áreas onde um sistema geral de iluminação de rede é desaconselhável.

Neste grupo estão englobadas áreas não apropriadas para passagem ou permanência de pessoal (tal como um túnel não usado para acesso ou transporte), áreas onde o sistema de iluminação possa aumentar os riscos (como estratos profundos com presença de metano), ou ainda em dutos para ventilação e retorno de ar.

15.6.2. PARAMETROS DE PROJETO

Muitos países utilizam como parâmetro básico o nível de iluminamento devido a facilidade de medição dos lux incidentes por meio de pequenos luxímetros de uso generalizado. O iluminamento causado por uma fonte pode ser obtido a partir das curvas de intensidade luminosa e de isoiluminamento fornecidas pelo fabricante, e a luminância pode ser calculada desde que se

conheça a refletância da superfície. Portanto quando se trabalha com especificações em termos de luminância é necessário que se tenha medidas precisas de refletância.

O Comitê Técnico 4.10 da CIE, em sua reunião anual ocorrida na Polônia em 1980, recomendou certos procedimentos para serem utilizados pelos países membros como padrão de referência no esforço individual de cada um na definição de suas próprias normas. As principais recomendações foram:

- a. é preferível especificar níveis de luminância do que níveis de iluminamento; a luminância fornece uma medida da luz refletida que em última análise é a luz que nos permite ver os objetos. Como a refletância nas minas é em geral muito baixa, valores de iluminamento carecem de maior significado principalmente nas minas de carvão.
- b. os níveis mínimos de luminância dependem das tarefas e das condições de trabalho.

Portanto a CIE recomenda que o parâmetro básico em projetos e especificações para a iluminação de minas seja a luminância no campo visual, o que é mais lógico do ponto de vista do projetista mas implica em um desafio para os fabricantes de instrumentos. Estes deverão produzir instrumentos que meçam a luminância em subsolo e que devem ser portáteis, robustos, práticos e baratos, de modo a se tornarem tão utilizados quanto os atuais luxímetros.

Os valores recomendados pela CIE são os seguintes:

- a. valor reduzido - 0,05 nit
Aplicável onde o tráfego é leve e a mecanização é mínima, e a iluminação é desejável por questões de segurança.
- b. valor normal - 0,20 nit
Valor obrigatório onde se tem máquinas e equipamentos mecanizados normalmente em operação ou em deslocamento.
- c. valor aumentado - 10 nit
Aplicável às câmaras e salões onde se tem pessoal mas não se tem execução de serviço de precisão.
- d. valor aumentado - 20 nit
Aplicável aos salões e câmaras onde se tenha trabalhos de precisão.

A figura 15.2. apresenta de forma prática a relação entre as grandezas luminância (em nit) e iluminamento (em lux), para diversas refletâncias de superfícies lambertianas. Com esta figura pode-se relacionar rapidamente requerimentos de luminância e iluminamento sem necessidade de utilizar a fórmula:

$$L = r E / \pi \quad (15.1)$$

onde:

- L = valor da luminância em nit;
- E = valor do iluminamento em lux;
- r = refletância da superfície lambertiana, adimensional entre zero e um.

15.6.3. UNIFORMIDADE

A recomendação da CIE é para que a luminância no campo visual de um mineiro não varie mais do que 5 vezes numa distância de 1 metro, medida ao longo da área observada, desde que a refletância

não se altere (devido a tipo e cor da superfície mineral). Em outras áreas a uniformidade da luminância não deve superar a razão de 10:1.

Ou seja:

no primeiro caso - $L(\max)/L(\min) < 5:1$

no segundo caso - $L(\max)/L(\min) < 10:1$

Todavia estes valores são considerados por alguns membros como restritivos demais, que acham suficientes os quocientes de 10:1 e de 50:1 respectivamente [29].

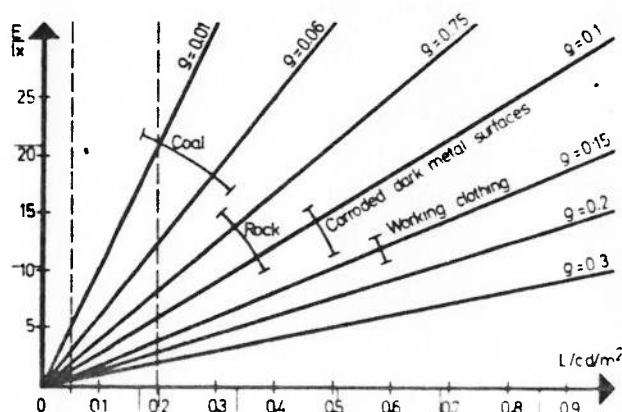


Figura 15.2. Relações lineares entre as grandezas luminância e iluminamento para diversas faixas de refletância de superfícies encontradas em minas subterrâneas [29].

15.6.4. OFUSCAMENTO E CAMPO VISUAL

A CIE admite como aceitáveis luminâncias de até 3 000 nit no campo visual do mineiro e causadas por iluminação de rede. Nas frentes e faces de extração são admitidas luminárias com luminância superior a 3 000 nit desde que localizadas acima da linha de visão. Em aberturas horizontais a altura mínima estabelecida é de 2,5 metros entre o piso e a linha central da fonte luminosa.

15.6.5. METODOLOGIA DE ILUMINAÇÃO

Sob o ponto de vista econômico a preferência recai sobre as lâmpadas de descarga, com as fluorescentes sendo indicadas para espaços de pequena altura e as de sódio ou mercúrio podendo ser

utilizadas quando for possível coloca-las a uma altura superior a 2,5 metros do piso. Lâmpadas incandescentes devem ser usadas apenas onde as de descarga não forem apropriadas, tal como para sinalização.

O sistema de iluminação deve iluminar toda a face de lavra de acordo com os requerimentos de luminância, uniformidade e ofuscamento. Quando existe máquina autopropulsora a luz deve ser suficiente para a identificação de toda ela, podendo a parte posterior ser identificada por uma luz colorida. Quando a máquina parar temporariamente de operar as suas luzes não devem ser desligadas.

15.6.6. LAMPADAS PORTÁTEIS DE CAPACETE

O aumento da iluminação geral tem gerado uma cada vez menor necessidade das lâmpadas de capacete, mas elas ainda devem ser obrigatórias em qualquer parte de uma mina subterrânea. Elas são muito úteis para a iluminação de vias de acesso, para auxílio em trabalhos executados a pequena distância, para os casos de emergência e queda de potência da rede geral, e para evacuação segura de áreas de risco.

Devem ter um tempo mínimo de operação sem recarga de 10 horas, devendo gerar um fluxo mínimo de de 20 lúmens após 8 horas de uso. Devem apresentar também uma fonte "reserva" tal como duplo filamento ou duplo bulbo.

15.7. NORMAS ESTRANGEIRAS

A maioria das normas existentes em cada país são relativas a minas subterrâneas de carvão, mas em muitos deles estudos tem sido efetuados para extensão ou adaptação destas para minas metálicas, não metálicas e a céu aberto. As normas para carvão são de modo geral as mais restritivas visto ser esta uma lavra complicada sob os pontos de vista da ergonomia, da higiene e da segurança.

As normas individuais de cada país são razoavelmente específicas quanto a caracterização do que constitui um sistema de iluminação seguro, ou seja quanto a aspectos de queda de potência, choques elétricos, instrumentação de segurança intrínseca em atmosferas explosivas (gases ou poeira), etc. Todavia quanto a níveis de iluminação nos diversos locais de uma mina há uma grande variedade de procedimentos entre os países. Esta ampla variedade envolve tanto aspectos técnicos (quais os parâmetros são tomados como referência) como aspectos legais (normas obrigatórias, padrões sugeridos ou mesmo ausência de referência específica).

Em função destes aspectos os países podem ser subdivididos em 4 grupos [4,29,31]:

Grupo 1 - países que não especificam nem valores mínimos nem valores recomendados (específicos para a mineração), indicando que quando necessária a iluminação deve ser suficiente e adequada.

Exemplo: Austrália, Canadá.

- Grupo 2 - países que não especificam valores mínimos, mas que sugerem valores para servirem de referência a indústria mineira e aos projetistas.
Exemplo: Reino Unido
- Grupo 3 - países que especificam valores mínimos de iluminação em função do local na mina, bem como metodologias de medida e técnicas de monitoramento e fiscalização.
Exemplo: Bélgica, Hungria, Polônia, Alemanha, Tchecoslováquia.
- Grupo 4 - países que especificam valores mínimos de luminância em função do local na mina, e que portanto seguem as recomendações da CIE pelo menos quanto ao parâmetro básico de referência. Além disso apresentam rígidos procedimentos quanto a monitoramento e fiscalização.
Exemplo: USA.

Para os países dos grupos 3 e 4 as especificações são parte integrante da legislação mineira ("Mining Act") e portanto o seu não cumprimento pode gerar multas e interdição de áreas ou da própria mina.

A seguir são resumidos os principais aspectos das normas e das sugestões de vários países quanto a iluminação de minas subterrâneas.

15.7.1. AFRICA DO SUL

As normas sul-africanas de iluminação de minas se encontram no capítulo 15 do " Mines and Work Act No. 27 " de 1956, e enfocam basicamente lâmpadas de segurança, lâmpadas portáteis e iluminação de rede, havendo pouco detalhamento de níveis de iluminação [27]. Neste último aspecto os principais pontos existentes são:

parágrafo no. 15.1 - nenhuma pessoa trabalhará ou se locomoverá, ou permitirá que outra pessoa se locomova ou trabalhe, em qualquer parte não iluminada da mina a não ser que porte uma lâmpada.

parágrafo no. 15.2 - deverá existir iluminação fixa de rede:

15.2.1. durante as horas de serviço nas estações, locais de embarque e desembarque, e em outros locais similares em poços verticais ou inclinados, poços secundários e planos onde se tenha alçamento e guinchos.

15.2.2. 'a noite, em todos os locais onde trabalhos superficiais estejam sendo executados. Chama-se de noite ao período compreendido entre meia hora antes do poente e meia hora depois do nascente.

parágrafo no. 15.3 - Principais pontos:

15.3.1. nos locais onde operem equipamentos de locomoção, bombeamento, alçamento ou ação semelhante, e pessoas estejam trabalhando ou se movendo nas proximidades, deverá existir iluminação de modo que as partes

móveis externas destes equipamentos sejam bem visíveis.

- 15.3.2. durante a noite a céu aberto e durante todo o tempo em subsolo, a parte frontal de qualquer comboio móvel puxado por locomotiva ou equivalente, deverá possuir uma luz efetiva brilhante iluminando na direção do deslocamento.

Notamos que estas normas são razoavelmente específicas quanto a locais e situações, mas são numericamente vagas quanto a níveis fotométricos pois se apoiam em termos como "claramente visível" e "luz efetiva brilhante". Notamos também que não é exigido que todos os locais da mina sejam iluminados por sistema de rede, muitas vezes bastando a lâmpada de capacete.

Apesar da África do Sul ser membro do TC-4.10 da CIE desde seu início, apenas em 1980 foi criado seu Comitê Nacional o qual se compõe de 16 elementos pertencentes à indústria de mineração, à Câmara de Minas e à indústria de iluminação. Desde sua criação ele tem se ocupado principalmente das minas de ouro onde trabalham cerca de 74% dos mineiros de subsolo [27].

Nos seus trabalhos de atualização e pormenorização das normas o Comitê Nacional subdividiu os locais em:

- a. locais onde não há desmonte por explosivo, e é conveniente e prático se ter iluminação fixa face a frequente presença de homens trabalhando;
- b. locais onde por razões econômicas, práticas ou de segurança sistemas de iluminação não podem ser fixos. Aqui se incluem:
 - b1. áreas onde regularmente ocorrem desmontes ;
 - b2. galerias de ventilação onde não se tem locomoção regular, e travessas e galerias abandonadas. Pessoas entrando nestas áreas deverão portar lâmpadas individuais.

Tendo feita a classificação dos locais segundo o critério exposto, o Comitê Nacional tem procurado definir os níveis de iluminamento e ofuscamento adequados. O parâmetro escolhido foi o iluminamento porque parece mais prático mas se terá de estabelecer valores típicos da refletância para variadas situações em subsolo.

Nas áreas sem desmonte regular e com sistema de iluminação fixo não é obrigatório o uso de lâmpada de capacete, e se usou o código de normas do " South African Bureau of Standarts " denominado de " Code of Practice for Interior Lighting - Part I: Artificial Lighting. SABS 0114 ".

Nas áreas onde se tem desmonte regular tais como realces e frentes de galerias de desenvolvimento, o critério de análise tem sido diverso principalmente por não existirem locais equivalentes no código SABS. Nestes locais existe apenas a lâmpada de capacete, o que é indesejável do ponto de vista da segurança porque a visão periférica é quase nula nestas situações.

Apesar de ainda não existir fonte de luz adequada para os realces, o Comitê Nacional acha importante que se tenha iluminação geral mesmo que baixa, e que ela deve ser difusa para não causar ofuscamento. Isto é importante porque os realces são estreitos, com dimensões variando entre 0,94 e 2,22 m, com valor médio de 1,38 m.

Alguns valores mínimos recomendados de iluminamento são os

seguintes [1]:

- estações de poços, áreas com máquinas - 54 a 65 lux;
- junções e áreas com risco - 43 lux;
- vias de transporte - 5 a 11 lux.

Estudos preliminares efetuados pelo Comitê Nacional para Iluminação de Minas geraram um esboço com sugestões de valores relativamente mais altos tais como:

- estações de poços - 100 a 160 lux;
- locais com máquinas - 50 a 200 lux;
- vias de transporte - 20 lux.

O "Chamber of Mines" através de sua Divisão de Segurança na Mineração elaborou a publicação denominada "Mine Safety Management System - MSMS" na qual recomenda iluminação de emergência em diversas áreas [28]. Locais considerados incluem plantas de processamento, vias de acesso para saída de edifícios, plataformas elevadas, escadas e rampas, área de risco como estações de britagem, ambulatório e salas de controle e comando. Esta iluminação deve ser ativada nos casos de interrupção de funcionamento da iluminação normal de rede.

15.7.2. ALEMANHA

Os valores normalizados se referem a níveis médios de iluminamento em certas áreas, portanto não se tendo valores mínimos como ocorre com a maioria das normas de outros países. Estes valores estão apresentados na NRF DIN 22434 'Allgemeinbeleuchtung in Bergbau unter Tage' [4]. Os valores normalizados são:

- área de poços - 30 a 40 lux
- pontos de carga e descarga - 40 lux
- máquinas - 80 lux
- vias de transporte - 15 lux.

15.7.3. AUSTRÁLIA

A legislação australiana considera a importância da iluminação nas frentes de lavra mas não define com precisão valores numéricos a serem aplicados. Todavia é explicitamente proibido utilizar luminárias com componentes externos de alumínio devido ao perigo de faíscas.

15.7.4. BÉLGICA

As normas belgas estão apresentadas na NBN 314 - 1966 "Code de bonne pratique de l'éclairage des charbonnages", e abordam valores mínimos de iluminamento, técnicas de medida e medidas práticas para um boa iluminação. Os valores do iluminamento mínimo dependem do local e do tipo de atividade e alguns deles são:

- estações de poços - 20 a 50 lux
- pontos de carga e descarga - 20 lux
- ao redor de máquinas - 25 lux

- vias de transporte - 10 lux.

15.7.5. CANADÁ

No Canadá cada província tem seu próprio regulamento mineiro e a maioria delas segue as normas definidas pela província de Ontário. Isto se deve a longa história de mineração de Ontário bem como ao nível de pesquisa ali desenvolvido. Esta província segue as recomendações do "Canadian Electrical Code", que na parte V apresenta o "Use of Electricity in Mines". Este último define que os circuitos de iluminação deverão ser instalados e mantidos em acordo com a parte I do Código canadense de eletricidade "Essential Requirements and Minimum Standarts Governing Electrical Installations for Buildings, Structures and Premises"[4]. Todavia não há definição de padrões fotométricos.

Apresentamos a seguir os três únicos par'agrafos que tratam de iluminação no "The Occupational Health and Safety Act", 1978, capítulo 83 dos Estatutos de Ontário, e que incluem as "Regulations for Mines and Mining Plants".

Na Parte XI, Ambiente de Trabalho, temos os par'agrafos:

- no. 252. Numa mina subterrânea deverá existir iluminação de rede nos seguintes locais:
- a. em todas as estações de embarque e carregamento de poços onde operários trabalhem ou se locomovam;
 - b. onde a natureza da operação ou do equipamento puder se tornar perigosa com iluminação insuficiente.
- no. 253. O nível de iluminação numa usina de tratamento de minérios onde operários trabalhem ou se locomovam deve satisfazer os requisitos constantes do "CSA - C 92.1 - Industrial Lighting", de 1975.
- no. 254. Num local de trabalho onde só se tenha iluminação artificial e onde a falha deste sistema regular possa causar situações de risco para as pessoas no prédio, deve-se ter iluminação de emergência que:
- a. se acenda automaticamente quando falhar o sistema regular;
 - b. seja independente da fonte luminosa regular;
 - c. forneça iluminação adequada durante a evacuação do prédio;
 - d. seja testada tão frequentemente quanto o necessário para garantir que o sistema funcionará numa emergência, mas não menos frequentemente que o recomendado pelo fabricante.

Apenas uma província canadense fornece valores numéricos como referência para minas subterrâneas, os quais são para iluminamento mínimo a 1 metro acima do piso ou no próprio piso.

São eles:

- áreas de trabalho não específico em túneis, poços, planos inclinados e rampas - 21 lux
- frentes de desenvolvimento - 53 lux
- estações de poços - 53 lux
- salas com compressores - 53 lux
- salas com guinchos - 269 lux
- escritórios - 269 lux

- oficinas elétricas - 269 lux
- oficinas de manutenção, depósitos - 269 lux
- salas de primeiros socorros - 538 lux.

Todo equipamento para iluminação deve ter um certificado federal "EM&R" ("Energy, Mines and Resources").

15.7.6. ESTADOS UNIDOS

Reconhecendo os sérios problemas de segurança existentes nas minas de carvão o Congresso americano promulgou em 1969 o "Health and Safety Act", no qual ficou designada a Secretaria do Interior para pesquisar e definir padrões de iluminação em minas de carvão.

As análises feitas pelo "Bureau of Standarts" indicaram como primeiras conclusões que as normas deveriam [4]:

- a. considerar como parâmetro fotométrico básico a luminância;
- b. envolver a noção de visão periférica pois esta era importante para a segurança dos mineiros;
- c. definir um valor de luminância mínimo pois este também ajudava a diminuir os problemas de adaptação visual.

A utilização do parâmetro luminância permitia uma maior flexibilidade ao projetista para considerar as variações de refletância da mina, e a importância da visão periférica requeria um sistema de iluminação geral (além do específico e localizado para cada tarefa).

O primeiro valor mínimo sugerido foi de 0,06 fL ("footLambert") o qual é insuficiente para muitas das tarefas executadas em subsolo. Luz adicional é fornecida pelas lâmpadas de capacete que geram cerca de 0,35 nit para tarefas próximas, mas seu fecho é de 5 a 30 graus não fornecendo adequada iluminação para os lados.

Em 1970 foram publicadas as primeiras sugestões de normas que se baseavam nos valores extremos de 0,06 e 20 fL, correspondendo respectivamente a luz mínima necessária para se distinguir um objeto e condições de ofuscamento em subsolo. Após audiências públicas e revisões a "Mine Safety and Health Administration - MSHA" publicou em 1976 o Código Federal de Normas que apresenta em sua parte no. 75.1719 as normas e requerimentos associados a iluminação de minas subterrâneas de carvão. Quatro grandes linhas de especificação podem ser distinguidas [32,35]:

- a. níveis de iluminação requeridos e áreas da mina enquadradas nestes níveis;
- b. padrões elétricos a serem seguidos quando da instalação de sistemas de iluminação;
- c. procedimentos de medição fotométrica para fins de fiscalização do cumprimento das normas;
- d. ações a serem tomadas para aumento da visibilidade na mina.

A. Requerimentos quanto a níveis de iluminação

O código especifica como parâmetro fotométrico básico a luminância e afirma que: " a luminância das superfícies existentes no campo visual normal do trabalhador, em áreas de lavra que requerem iluminação, não poderá ser inferior a 0,06 fL ".

Esta norma vem em unidade que não pertence ao sistema

internacional mas é simples sua conversão. A luminância de uma superfície difusora perfeita pode ser dada em lúmens por metro quadrado ou seja lux, enquanto que o termo "footlambert" com símbolo fL, se refere a lúmens por pé quadrado. Portanto:

$$\begin{aligned} 1 \text{ pé} &= 0,304 \text{ m} & 1 \text{ pé quadrado} &= 0,0929 \text{ 03 m}^2 \\ 1 \text{ m}^2 &= 10,764 \text{ pés quadrados} \end{aligned}$$

Então:

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2 = 1 \text{ lm}/(10,764 \text{ pé}^2) = (1/10,764) \text{ fL}$$

Assim:

$$1 \text{ lux} = 0,0929 \text{ fL} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ fL} = 10,764 \text{ lux}$$

Portanto no sistema internacional a norma seria transcrita como requerendo um nível mínimo de luminância de:

$$L' = 0,06 \times 10,764 = 0,645 \text{ lux}$$

Os valores definidos nas normas não representam uma receita para a otimização de projetos de iluminação, mas somente os requerimentos mínimos em termos de prioridade visual numa mina. Muitas vezes deve-se usar valores mais altos a fim de se maximizar os benefícios da iluminação, e além disso a grande variabilidade das condições mineiras e o estágio atual de conhecimento não justificam um maior detalhamento da norma.

Esta norma em termos de luminância envolve as seguintes considerações:

- a. é a luminância e não o iluminamento que se correlaciona fisicamente com o que é visto;
- b. com a luminância a norma em tese é uniforme e independente da refletância, havendo flexibilidade para adaptações as variações de refletância do mundo real;
- c. medidas de luminância são mais difíceis que medidas de iluminamento, e projetos de iluminação requererão conhecimentos precisos das refletâncias;
- d. o valor de 0,645 lux parece ser adequado a execução da maioria das tarefas mineiras, onde em geral não é necessário a percepção de pequenos detalhes; além disso operações feitas próximas do operador contam com a luz suplementar dos capacetes;
- e. o valor de 0,645 lux é suficientemente baixo para que não sejam críticos os problemas de adaptação visual ao se sair de áreas iluminadas e entrar em áreas mais escuras;
- f. com 0,645 lux de iluminação geral muda-se da visão tipo "túnel" (associada a lâmpada de capacete) para uma visão periférica total, a qual é muito importante para a segurança porque permite a detecção de movimentos mais facilmente;
- g. pelo fato de ser em footLambert a norma implicitamente assume que a superfície refletora é um difusor perfeito, e portanto a luminância (L) em nit é dada por:

$$L' = \pi L \quad L = 0,646 / \pi \quad L = 0,20 \text{ nit}$$

O valor de 0,2 nit é aquele recomendado pela CIE para os locais

- pontos de carregamento - 30 lux
- pontos de transferência até 4 metros da queda do minério - 30 lux
- galerias e vias distantes da base do poço:
 - . onde homens normalmente trabalham controlando tráfego, painéis de comando, acoplamentos - 20 lux
 - . onde homens regularmente passam operando máquinas - 2,5 lux
 - . vias com correias transportadoras, com trilhos ou para veículos com pneus - 2,5 lux
 - . pontos de subida e de descida de trabalhadores em veículos e correias - 30 lux
- escritórios em subsolo - 60 lux

Como todas as minas inglesas de carvão tem problemas de grizú todas as lâmpadas de capacete devem ser também de segurança. As normas inglesas são muito rígidas quanto aos aspectos de segurança intrínseca e equipamentos elétricos de segurança, existindo rigoroso processo de certificação. Esta certificação é aceita por muitos outros países quando da compra de produtos ingleses. Em todas as minas é proibido a utilização de alumínio devido a possibilidade de faíscas.

15.7.9. JAPÃO

As restritas informações que dispomos são aquelas contidas na referência [36]. O iluminamento nos planos de trabalho dentro das instalações mineiras são discutidos no "Mine Safety Regulations", tendo-se como valores mínimos gerais

- locais com trabalho de precisão - 300 lux
- locais sem trabalho de precisão - 150 lux
- locais com trabalho bruto e pesado - 70 lux.

A legislação apresenta valores específicos para distintos locais das minas, distinguindo entre as metálicas e as de carvão. A iluminação individual portátil é considerada como a fundamental enquanto que a iluminação de rede é considerada como a secundária.

15.7.10. POLÓNIA

As normas polonesas estão expressas no documento "PN-73G-02600-Electrical Lighting of Underground Workings - Fundamental Requirements and Testing" [4]. A iluminação básica é a de rede com a individual portátil sendo considerada como um suplemento.

O critério adotado é o de iluminamento mínimo, com definição de fatores de uniformidade e metodologias de teste e medição, sendo também abordado o problema do ofuscamento.

As normas polonesas são muito específicas quanto ao local considerado e quanto ao tipo de atividade ali executada. Três grupos de normas podem ser considerados:

- a. normas para locais de transporte de material, pessoal e minério;
- b. normas para áreas de trabalho;
- c. normas para faces e frentes de produção.

A. Normas para locais de transporte

São definidas 4 classes de minas em função da produção e da intensidade do tráfego como ilustrado na tabela 15.5. Após se classificar a mina o nível de iluminação mínimo é encontrado na tabela 15.6.

Tabela 15.5. Classes de mina para fins de iluminação [4].
Não estão incluídos os mineiros chegando ou saindo do turno e se deslocando em carros de passageiros.

classe	produção (t/turno)	tráfego de pessoal por turno	combinação pessoal-produção por turno	
			produção	pessoal
I	> 4 000	> 300	> 2 000	> 150
II	2000-4000	150-300	1000-2000	100-150
III	1000-2000	100-150	-	-
IV	< 1 000	< 100	-	-

Tabela 15.6. Níveis de iluminamento em áreas de transporte [4].

local	nível de iluminamento (lx)			
	I	II	III	IV
estações de poços	50	25	15	-
estações de passageiros	30	15	-	-
vias de transporte	2	1	0,5	-
intersecções, bifurcações, estreitamentos, entradas para realces	4	2	1	-
estações de carregamento	30	15	-	-

B. Normas para áreas de trabalho e faces de avanço

A tabela 15.7. apresenta valores de iluminamento para diversos locais de trabalho em subsolo e a tabela 15.8. apresenta valores relativos a faces de avanço. Para as faces os valores mínimos se referem a diferentes posições (teto, piso, paredes). Todos os valores de iluminamento são para a componente normal e portanto os fotômetros não precisam ter correção cossenoidal.

Tabela 15.7. Iluminamentos para áreas de trabalho [4].

local	E (lx)
oficinas com trabalho de precisão (enrolamento de fios, etc)	100
oficinas com trabalho de média precisão (montagem de peças grandes)	40
oficinas sem trabalho de precisão (soldagem, etc)	15
sala de guincho	100
depósitos de peças de locomotiva e de recarga de baterias	50
estacionamento de locomotivas	10
área de distribuição de explosivos	50
paiol de explosivos	10
depósito geral (óleo, graxa, peças)	25
local de primeiros socorros	50
câmara de espera junto a estação de poço	25

Tabela 15.8. Iluminamentos para faces de produção [4].

local	E (lx)		
	piso	face	piso
frentes longas com suporte mecanizado	3	2	-
frente longa com altura acima de 2,5 m e sem suporte mecanizado	3	2	1
frente longa com altura menor que 2,5 m, sem suporte mecanizado	2	1	0,5
entrada de frente longa	5	-	-
frente curta	3	5	3
entrada de frente curta	2	-	-

15.7.11. TCHECOSLOVAQUIA

As normas tchecas estão no documento "CSRS CSN 360050 - Osvetlovani hlubinných dolu", onde o parâmetro básico é o iluminamento produzido pelo sistema fixo. Alguns valores são [4]:

- estação de poço - 15 a 40 lux
- pontos de carga - 20 lux
- vizinhança de máquinas - 20 lux
- galerias de transporte - 5 a 10 lux
- faces - 5 a 10 lux.

As normas reconhecem ser difícil e caro operar com altos níveis de iluminação em minas não mecanizadas e que usam explosivos. Nestes casos para trabalho manual é admitido o valor mínimo de 0,05 nit (que corresponde a 3,9 lux para carvão com refletância difusa de 0,04).

15.7.12. OUTROS PAÍSES

Para todos os membros do Comitê Técnico de iluminação de minas subterrâneas (Anexo T), enviamos cartas pedindo cópia das normas dos respectivos países. Este procedimento não se mostrou muito profícuo pois:

- a. alguns não responderam;
- b. outros enviaram gentilmente as normas mas sem tradução em inglês ou francês. Na bibliografia recomendada apresentamos o material recebido da Hungria e da Tchecoslováquia.
- c. outros responderam que não eram mais os representantes oficiais de seus países.
- d. alguns prometeram enviar brevemente as normas sendo discutidas mas não recebemos nenhum material posteriormente.

15.8. NORMALIZAÇÃO NO BRASIL

15.8.1. NORMAS EXISTENTES DO DNPM

O Anexo C apresenta as definições relativas a iluminação de minas constantes nas Normas Regulamentares de Mineração publicadas pelo DNPM em 1988. Se observa que do ponto de vista da engenharia quase nada consta, não havendo quantificação dos níveis de iluminamento e de luminância, nem de como estas medidas devem ser feitas. Além disso nada é especificado quanto a tópicos como: voltagens de rede e os problemas de choques, as frequências e os problemas de "piscamento" de luzes fluorescentes, aterramento, instalação de luminárias, circuitos intrinsecamente seguros e luminárias a prova de explosão, equipamentos anti-ofuscantes, proteção das fontes de luz quanto a choques mecânicos, umidade e poeira, dimensionamento de cabos, fios e interruptores, manutenção e iluminação de emergência.

Notamos também a ausência de informações de como as normas seriam fiscalizadas, quais seriam as punições aos infratores e que entidades dariam aprovação para os equipamentos a serem usados em atmosferas explosivas. Sabemos que existem organismos no Brasil capacitados para a certificação quanto a ambientes

explosivos mas em termos de mineração as normas estão muito defasadas. Mesmo na "IEC - International Electrical Commission" nada há de definitivo e o problema de explosividade em minas é alvo de estudos iniciais.

15.8.2. SUGESTÃO PARA NORMALIZAÇÃO

Como vimos minas a céu aberto e em subsolo oferecem distintos ambientes quanto a iluminação e portanto as normas devem ser subdivididas nestes grupos. Além disso as minas subterrâneas deverão ser agrupadas em metálicas, não metálicas e de carvão.

Se deverá sugerir numa etapa inicial os valores recomendados pela CIE, e indicar os equipamentos e metodologia de medida de parâmetros fotométricos. Deverá ser feito um levantamento preliminar das condições das minas brasileiras, se comparando as condições das minas exemplares com os casos de pior situação.

Sugestões práticas devem ser desenvolvidas pelos órgãos técnicos competentes e numa segunda etapa deverão ser publicadas normas mais detalhadas e rígidas. A publicação de norma só deverá ocorrer quando houver grupos tecnicamente capacitados para regularmente inspecionar as minas, emitirem pareceres e sugerir soluções alternativas. Caso contrário a norma só servirá para ser burlada e desmoralizar os esforços genuínos que porventura estejam sendo desenvolvidos. A norma deve também de algum modo indicar as penalidades aos infratores sob pena de se tornar apenas uma sugestão.

Um programa de implantação de normas de iluminação deveria portanto ter quatro grandes linhas de atuação:

- a. definição de parâmetros fotométricos: valores, locais associados;
- b. definição de metodologia de medição: número mínimo de medidas para se ter significância estatística, apresentação e interpretação dos resultados, locais de medida, certificação de equipamentos de medidas com especificação de suas características (precisão, exatidão, sensibilidade), etc;
- c. apoio ao desenvolvimento de lâmpadas e luminárias: equipamentos a prova de poeiras, gases, umidade e explosão; seleção de grupos de certificação de qualidade;
- d. desenvolvimento de metodologias de projeto de iluminação de minas: objetivos incluem segurança, eficiência, economicidade, praticidade e formação de recursos humanos especializados.

16. CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO EM MINAS SUBTERRÂNEAS BRASILEIRAS

16.1. SELEÇÃO DAS MINAS A SEREM ANALISADAS

O objetivo básico deste trabalho de pesquisa é a análise da situação de várias minas subterrâneas brasileiras quanto ao fator iluminação. Nesta análise procurou-se observar aspectos relativos aos níveis de iluminação em variados locais em subsolo, o estado de conservação dos sistemas de rede e de iluminação individual, os tipos de lâmpadas e luminárias utilizadas, as características de refletância dos minerais de minério e de estéril nas superfícies internas das minas, e custos envolvidos na instalação e manutenção.

A escolha das minas a serem visitadas considerou as distintas características existentes em lavra subterrânea, procurando-se uma representação adequada das diversas situações extremas encontradas no Brasil. Deste modo as minas foram selecionadas com base em características bem diversas quanto ao tipo de minério, à forma de acesso ao corpo mineralizado, ao método de lavra, ao tipo de transporte e remoção do subsolo, ao grau de mecanização das operações, a profundidade dos realces, ao tamanho do empreendimento, às condições de segurança, conforto termo-corporal e ergonomia.

As minas previamente selecionadas foram as seguintes:

- a. de sal - mina de Taquari-Vassouras, Sergipe;
Suas principais características são a alta refletividade dos sais (halita, silvinita, carnalita e taquidrita), a alta higroscopia da taquidrita, a presença de metano (que é explosivo), o acesso por poços, o alto grau de mecanização, a extração por meio de mineradores contínuos, a profundidade relativamente alta dos realces, os sérios problemas de mecânica de rochas devido a fluência da taquidrita, a lavra por câmaras e pilares, e as condições termo-corporais decorrentes do sistema de ventilação.
- b. de calcáreo - mina do Baltar, São Paulo;
Suas características principais são a alta mecanização, a interação entre a lavra subterrânea e céu aberto, o acesso por rampas inclinadas de 12,5%, a lavra pelo método de subníveis com perfurações longas, o grande tamanho do empreendimento e a proximidade de rio em superfície.
- c. de zinco e chumbo - mina de Morro Agudo, Minas Gerais;
Suas principais características estão relacionadas ao método de lavra por pilar e salão, com problemas de estabilidade do maciço e pilares, o acesso por rampa e a geometria irregular do corpo de minério.
- d. de carvão - minas de Leão I, Leão II, Esperança, São Geraldo, CBCA, Charqueadas, Nova Próspera, Caetano Sônego e Verdinho;
As minas de carvão são dos piores locais para se ter uma iluminação adequada e cada mina tem seus

problemas particulares. Assim as minas do Verdinho e da CBCA tem vias subterrâneas de dimensões reduzidas o que gera problemas de mobilidade de equipamentos e colocação apropriada das fontes de luz, sendo minas "escuras e úmidas". Já as minas de Charqueadas e São Geraldo são relativamente amplas, secas, sem enxofre e iluminadas nas suas principais áreas. Algumas minas são mecanizadas, como as de Leão I e Esperança, enquanto que outras são semi-manuais como as do Verdinho e CBCA; além disso algumas utilizam uma lavra cíclica com as etapas de perfuração, carga, detonação, remoção, transporte e estabilização do teto, enquanto que outras utilizam mineradores contínuos.

- e. de cobre - minas do Camaquã (São Luiz e Uruguai) e de Caraíba; As minas de Camaquã estão praticamente esgotadas e são interligadas entre si, sendo portanto minas cuja lavra procura as últimas partes econômicas para extração. Minas antigas e próximas a exaustão tem em geral problemas específicos associados principalmente com a falta de investimentos.
- f. de fluorita - minas de Santa Catarina, Poço São Pedro e Floral; As minas de fluorita também são minas em fase final de lavra e são minas pequenas. Os filões são estreitos e quase verticais, sendo lavrados por métodos de baixa produção tais como armazenamento temporário ("shrinkage") e corte e aterro ("cut and fill"), este último em progressão ascendente ou descendente.
- g. de ouro - Morro Velho, Fazenda Brasileiro e Morro do Ouro; A mina de Morro Velho é uma mina muito antiga, muito profunda e seus sérios problemas estão relacionados ao balanço térmico e as tensões nos pilares. O fluxo geotérmico obriga a existência de diversas usinas de refrigeração em subsolo e as tensões tectônicas, litostáticas e induzidas pelas aberturas tem causado colapso de pilares e subsidência. A mina de Fazenda Brasileiro é uma mina moderna e recente onde os principais problemas geomecânicos estão associados ao tamanho dos vãos das vias subterrâneas. A mina Morro do Ouro é uma mina a céu aberto mas apresenta duas características que a tornam interessante para inclusão nesta pesquisa. Ela opera continuamente e portanto existe todo um sistema de iluminação para o período noturno, e obteve o segundo lugar num concurso de segurança em mineração promovido em âmbito mundial pela "NOSA-National Organization for Safety Administration". A RPM foi considerada uma mina 5 estrelas e portanto apresentando máxima preocupação com itens como iluminação, sinalização e código de cores. Atualmente existe uma crescente preocupação com as condições de iluminação de equipamentos de grande porte atuando a céu aberto, e alguns países já apresentam especificações quanto a este fator.

As 21 minas acima mencionadas foram contactadas mas nem todas puderam ser analisadas e incluídas formalmente neste trabalho. A primeira grande dificuldade com que nos defrontamos se referia a distribuição geográfica das minas, com algumas estando razoavelmente próximas permitindo varias visitas numa mesma viagem de campo, enquanto que outras tiveram que ter visita individual. A visita a minas "próximas entre si" apresentava o problema de conjugação de cronograma porque nem sempre a disponibilidade operacional das minas era adequada ao planejamento da viagem. Outros fatores que também impossibilitaram certas visitas foram acidentes (interrompendo a produção) e a desativação temporária da mina face a crise econômica.

Assim do grupo inicialmente selecionado não foram incluídas na pesquisa as seguintes minas:

- a. mina de Charqueadas - esta mina está temporariamente paralisada e sua diretoria não aconselhava a visita; todavia como passamos por ela durante viagem ao Rio Grande do Sul marcamos uma visita com o próprio pessoal de manutenção. Devido a problemas de transporte chegamos à mina somente às 14 horas e às 13 horas ocorrera um problema no guincho do poço o qual só seria solucionado a noite. Como nossa programação era corrida não pudemos retornar no dia seguinte.
- b. mina do Verdinho - não foi possível a visita porque ela só foi autorizada no dia de nosso retorno de viagem de campo e não era mais possível alterar a data do voo.
- c. mina Nova Próspera - estivemos visitando apenas a boca do poço principal, interdita 15 dias antes devido a completo desmoronamento de seu colar. O acidente foi grande com a completa destruição das instalações de superfície que foram "tragadas" pelo poço. Não houve vítimas fatais porque o evento ocorreu às 13 horas do feriado de 15 de novembro de 1991, mas a mina ficará sem produção pelo menos por 6 meses.
- d. mina modelo Caetano Sônego - a mina está desativada e preparada para visitas do público, tendo se conservado muitas das características geométricas dos realces e dos meios de transporte. Todavia foram totalmente alteradas as características de iluminação, higiene e segurança existentes. Assim não teria sentido um levantamento de dados de iluminação.
- e. minas de Morro Velho e Fazenda Brasileiro - contatos com técnicos que trabalhavam na mina de Morro Velho indicaram que seria necessário uma extensa visita porque as características da mina como profundidade e extensão das galerias impediriam um levantamento rápido de dados; a mina de Fazenda Brasileiro também exigiria uma extensa visita exclusiva para ela e optamos então por visitar durante uma semana a mina de potássio de Taquari-Vassouras, cujo minério era completamente distinto em termos de refletância dos demais incluídos nesta pesquisa.
- f. mina Floral - esta mina de fluorita é semelhante às minas Santa Catarina e Nossa Senhora do Carmo e optamos por visitar outras minas com características diversas.

Deste modo as minas incluídas explicitamente nesta pesquisa foram as seguintes:

1. mina de sal de Taquari-Vassouras, em Sergipe;
2. mina de calcáreo do Baltar, em São Paulo;
3. mina de chumbo e zinco de Morro Agudo, em Minas Gerais;
4. minas de carvão do Leão I e do Leão II, no Rio Grande do Sul;
5. minas de cobre do Camaquã (São Luiz e Uruguai), no Rio Grande do Sul;
6. minas de fluorita Santa Catarina e Poço São Pedro, em Santa Catarina;
7. minas de carvão Esperança, São Geraldo e CBCA, em Santa Catarina;
8. mina Morro do Ouro da RPM, em Minas Gerais.

Portanto estão incluídas nesta pesquisa 13 minas envolvendo 5 estados brasileiros e 7 tipos de minérios. O levantamento de dados de campo foi efetuado num período de cerca de 2 anos, com a primeira visita ocorrendo em dezembro de 1989 na mina de Taquari-Vassouras, e a última efetuada na mina CBCA em dezembro de 1991. Uma resumida descrição geral destas minas é apresentada nos anexos abaixo relacionados:

mina de Taquari-Vassouras - Anexo D;
mina do Baltar - Anexo E;
mina de Morro Agudo - Anexo F;
mina do Leão I - Anexo G;
mina do Leão II - Anexo H;
minas do Camaquã (São Luiz e Uruguai) - Anexo I;
mina Santa Catarina - Anexo J;
mina Poço São Pedro - Anexo K;
mina Esperança - Anexo L;
mina São Geraldo - Anexo M;
mina CBCA - Anexo N;
mina Morro do Ouro - Anexo O.

Estes anexos visam apenas dar uma breve descrição da mina visitada e as informações neles contidas de modo algum pretendem abordar de modo extenso as características geológicas ou a metodologia de lavra. A maioria das informações foi cedida pelo próprio corpo técnico das empresas e portanto variam em quantidade e qualidade. Algumas empresas forneciam pouquíssimos dados enquanto que outras permitiam cópia até de mapas e informações de relatórios internos. Em alguns casos recorremos a bibliografia para obtenção de algumas informações que julgamos pertinentes, ou mesmo a colegas do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP que estiveram envolvidos em projetos nas próprias minas.

16.2. DIFICULDADES DE MEDIÇÃO

As medições em instalações de superfície foram sempre mais fáceis e tranquilas que as em subsolo. Na maioria das vezes em subsolo se utilizava um veículo de transporte como um jipe ou caminhão sendo necessário parar o veículo quando se efetuava as medidas. O tempo de medição não podia ser longo devido a passagem de outros veículos e a continuidade da produção e muitas vezes as medidas foram efetuadas em cima do próprio veículo. Quando o deslocamento era feito a pé então podia-se efetuar medições mais precisas e em locais escolhidos tais como cruzamentos, pontos de

transferência de correias, portas de ventilação e alimentadores.

Em superfície se utilizou o luxímetro Hagner importado e em subsolo se empregou o luxímetro ICEL nacional. Medições comparativas indicaram que o luxímetro ICEL fornecia leituras entre 5 e 10% menores que as correspondentes do Hagner. Esta variação não prejudica a análise das medidas em subsolo porque na iluminação de minas as margens de segurança e de imprecisão são sempre muito maiores que 10%.

O termo mina engloba genericamente tanto a mina propriamente dita (a escavação) como a usina e as instalações de superfície. Portanto um adequado gerenciamento das condições ambientais de uma mina deve considerar de maneira global o parâmetro iluminação, ou seja, num projeto de iluminação de mina devem ser considerados todos os tipos de instalação de superfície e de subsolo.

No âmbito desta pesquisa nos concentramos preferencialmente em locais dentro ou junto à escavação, não tendo-se efetuado medições dentro de usinas de tratamento de minérios (silos, salas de flotação, setores de cominuição e separação, etc). As exceções ocorreram quando por exemplo se tinha britagem primária em subsolo como na mina do Baltar.

Uma outra dificuldade encontrada estava associada às próprias medições e à obtenção de informações correlatas. O tema iluminação faz parte da engenharia ambiental e está associada a higiene e segurança ocupacional, existindo uma latente cautela com os objetivos de nosso trabalho de campo. Havia a preocupação que utilizássemos nossa inspeção técnica com finalidades que posteriormente denegríssem a imagem das empresas ou que fizéssemos denúncias a sindicatos ou órgãos de classe. Neste contexto agradecemos a todas as empresas que acreditaram nos propósitos desta pesquisa e esperamos que os resultados dela oriundos lhes possam ser úteis.

16.3. RESULTADOS OBTIDOS COM AS PESQUISAS DE CAMPO

16.3.1. NÍVEL DE CONHECIMENTO DO TEMA

Durante nossas visitas técnicas tivemos contato com engenheiros de minas, engenheiros civis, engenheiros mecânicos, engenheiros elétricos, geólogos e técnicos de mineração. Em nenhuma situação havia alguém especializado em iluminação de mina e não obtivemos nenhuma informação de um antigo projeto de iluminação da mina. Num único caso (numa conversa informal) houve referência a um projeto original desenvolvido por projetista estrangeiro, e que após a partida dos técnicos a empresa retirou metade das lâmpadas porque achou que as havia em excesso!

Não havendo nem projeto era de se esperar que as atividades associadas como manutenção e análise de custos também fossem inexistentes. Apenas uma empresa nos forneceu gentilmente uma estimativa de custos com o item iluminação, estimativa esta efetuada no própria mina e baseada num consumo de energia. O valor obtido portanto não incluía compra de lâmpadas e luminárias, tempo de sua substituição e mão de obra, limpeza e inspeção dos sistemas, mudança de rede e locais de instalação,

etc. O valor estimado foi de 0,02% do custo mensal de lavra, indicando que a "importância" do tema iluminação parece estar associada a sua pequena influência nos custos totais.

Das visitas técnicas pode-se constatar não existir nenhum programa preventivo de manutenção e limpeza, nem noção formal dos benefícios que estes poderiam proporcionar.

16.3.2. VALORES MEDIDOS

Os resultados das medições são sumarizados utilizando-se os quatro grandes grupos de locais considerados pela CIE, ou seja (item 15.6.1):

- grupo 1 - áreas onde a iluminação é obrigatória, ou seja locais onde se tenha trabalho humano contínuo, ou aonde a passagem ou permanência temporária envolvam riscos ou situações críticas tais como:
- vias de acesso e vias principais de deslocamento (estações de poços, galerias de transporte com deslocamento de pessoal, etc);
 - estações de carregamento e galerias com correias transportadoras com deslocamento de pessoal;
 - câmaras e salas (oficinas, garagens, estocagem, serviços de manutenção, etc);
 - instalações elétricas e mecânicas (subestações, geradores, compressores, refrigeradores, bombas de água, ventiladores, etc);
 - realces de produção, faces de extração e de avanço;
 - áreas com iluminação de emergência.
- Grupo 2 - áreas onde a iluminação geral é aconselhável mas não obrigatória, ou seja locais com trabalho eventual ou temporário, ou locais pelos quais a passagem não envolva riscos altos.
- faces onde a lavra está paralizada em toda a extensão mas aonde algum equipamento ainda é operado;
 - regiões de realces afastadas das frentes;
 - galerias com correias transportadoras sem deslocamento de pedestres;
 - rampas ou planos inclinados sem acesso ou passagem de pedestres;
 - vias secundárias de acesso a equipamentos de pequeno porte;
 - portas de ventilação junto a vias de transporte e deslocamento de pessoal;
 - vias de deslocamento de pedestres (de interligação ou acesso a equipamentos isolados).
- Grupo 3 - áreas onde a iluminação de rede elétrica da mina não se faz necessária, tais como as áreas de baixo tráfego, poços com deslocamento de pessoal ou áreas onde continuamente haja pessoal mas exista iluminação adequada suprida por faróis e holofotes de máquinas e equipamentos mecanizados (tais como mineradores contínuos).
- Grupo 4 - áreas onde um sistema geral de iluminação de rede é desaconselhável. Neste grupo estão englobadas áreas não

apropriadas para passagem ou permanência de pessoal (tal como um túnel não usado para acesso ou transporte), áreas onde o sistema de iluminação possa aumentar os riscos (como estratos profundos com presença de metano), ou ainda em dutos para ventilação e retorno de ar.

Além destes grupos consideramos um quinto grupo contendo locais e instalações em superfície, tais como escritórios, laboratórios, oficinas, etc. A tabela 16.1. sumariza as medições efetuadas.

TABELA 16.1. Valores de iluminamento (iluminância) para os diversos locais pesquisados. A denominação das minas corresponde aos anexos em que se encontram descritas. O traço (-) indica não existência de iluminação enquanto que NM indica medição não efetuada (inexistência de local ou não se esteve no local), e I indica existência de iluminação inadequada (sem ter-se podido medir o nível exato de iluminação). A unidade é o lux, os valores máximos e mínimos se referem a toda a mina, e um único valor reflete o fato de se ter apenas uma medida (devido às condições encontradas).

***** GRUPO 1 - OBRIGATORIA *****										
vias principais de acesso como poços, rampas, estações, etc										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	1	0	15	NM	-	20	11	0	1	1
	15	67	110			80	78	80	45	20
galerias principais de transporte com deslocamento de pessoal (como correias transportadoras, caminhões, etc)										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	0	-	0	NM	29	38	8	0	NM	0
	22		10		64	190	66	65		20
oficinas, garagens, salas de manutenção, etc										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
48	17	NM	150	NM	24	45	NM	112	NM	20
143	72		260		192	115				80

Continuação da Tabela 16.1.

câmaras de britagem										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
NM	30 31	NM	NM	NM	21	NM	NM	NM	NM	NM
refeitórios										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
NM	134 155	NM	NM	NM	60 184	NM	30 110	1	35 70	NM
pontos de carga e transferência de correias										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	15 40	30 40	28 60
subestações (geradores, compressores, ventiladores, bombas, etc)										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	18 63	0 95	8 10	NM	NM	NM	57 115	NM	NM	NM
realces e faces de extração										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	-	-	NM	NM	-	2 34	5 28	-	NM	NM

Continuação Tabela 16.1.

salas de comando de guinchos, britadores, ventiladores, etc

MINAS

D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
178	215	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	271									

***** GRUPO 2 - ACONSELHAVEL *****

faces com produção temporariamente paralisada mas onde algumas máquinas ainda são operadas

MINAS

D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	-	-	-	NM	-	-	-	-	NM	NM

zonas de realces bem afastadas das frentes em produção

MINAS

D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	-	-	-	NM	-	-	-	-	NM	NM

galerias com correias mas sem passagem de pedestres

MINAS

D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	2	NM	NM	NM	-	NM	NM	-	NM	NM
	16									

rampas e planos inclinados sem passagem de pedestres

MINAS

D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
NM	-	-	NM	NM	-	NM	NM	NM	NM	NM

Continuação Tabela 16.1.

***** GRUPO 4 - DESACONSELHAVEL *****										
aerodutos e chaminés para ar de retorno										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
-	-	-	-	NM	-	-	-	-	-	-
***** GRUPO 5 - OUTRAS INSTALAÇÕES EM SUPERFÍCIE OU NÃO *****										
escritórios, ambulatórios, etc										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
227	330	NM	NM	NM	750	NM	NM	NM	NM	NM
259	650				1100					
laboratórios, vestiários, salas de comando de britagem/moagem										
MINAS										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
118	NM	210	NM	NM	135	NM	NM	NM	NM	NM
180					160					

A tabela 16.2. apresenta os valores de refletância medidos para as diversas superfícies das minas visitadas.

TABELA 16.2. Valores de refletância, expressos em porcentagem.

tipo de superfície	refletância
mina D	
halita branca	21,4 a 25,0
halita escura	7,1
silvinita branca	26,7 a 30,0
silvinita vermelha	11,5

Continuação Tabela 16.2.

mina E	
estéril (dolomito)	11,0 a 12,5
concreto projetado limpo	20,0 a 27,2
concreto projetado sujo	15,4 a 20,0
mina F	
minério sulfetado (Pb,Zn)	1,8 a 4,0
mina G	
carvão	0 a <10
mina I	
parede (estéril, caiada e limpa)	35,4 a 43,1
parede (estéril, caiada, meio suja)	33,3 a 36,5
parede (estéril, caiada, suja)	25,7 a 30,4
parede de madeira (caiada e limpa)	45,7 a 58,1
parede (câmara de britagem, estéril)	0 a <15,4
mina J	
parede (quartzo-monzonito, caiada)	36,0 a 41,7
parede (granito encaixante, não caiada)	14,4 a 18,5
mina K	
parede (estéril, caiada)	29,5 a 35,7
parede (estéril, não caiada)	11,1 a 17,6
mina M	
paredes (carvão)	4,0 a 4,4
mina N	
parede (carvão)	2,9 a 6,4
parede (carvão, caiada e suja)	5,9 a 12,5

16.4. ANÁLISE DOS VALORES MEDIDOS

Os valores medidos são um reflexo natural da inexistência de projeto específico de iluminação e de programas de manutenção preventiva. Numa mesma mina se encontra regiões adequadamente iluminadas e regiões sem qualquer iluminação, sendo a disparidade entre minas ainda maior. Exemplos típicos são as vias de acesso e

as galerias principais de transporte onde o espaçamento das lâmpadas não é um valor racionalmente determinado mas deriva do julgamento subjetivo de quem fez a instalação. Este espaçamento poderia ser facilmente estimado usando-se a metodologia ponto a ponto, utilizando-se as características geométricas da via e os valores de refletância das paredes. Os níveis de iluminação adotados no projeto deveriam ser aqueles recomendados pela CIE.

A variação do iluminação com a distância também não satisfaz via de regra ao quociente máximo de 10:1 sugerido pela CIE.

A refletância apresenta valores variando desde alguns por cento (carvão e sulfetos) até dezenas de por cento (silvinita, paredes caiadas). A caiadação de uma superfície de mina subterrânea via de regra eleva a refletância acima de 30% e é um efetivo modo de se melhorar as condições de iluminação em subsolo. Todavia não é um processo sistematicamente utilizado apesar de ser facilmente executável. Além disso as paredes caiadas não apresentavam limpeza sistemática.

17. CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi a primeira iniciada pelo LACASEMIN - Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP. Ela teve entre outras finalidades a de iniciar um intercâmbio técnico entre o LACASEMIN e empresas de mineração, a partir do qual outras pesquisas e trocas de informações se efetivaram. Por exemplo o oferecimento de cursos de especialização "in loco" para empresas (tais como para as minas RPM e Ipueira III, e a CETESB), além de apoio e consultoria nas áreas de poeiras fugitivas, vibrações e sobre-pressão atmosférica devido a detonações por explosivos (em cavas a céu aberto, minas subterrâneas, pedreiras, túneis ferroviários, barragens e implosões de edifícios), ventilação geral diluidora (envolvendo aspectos de gases, aerodispersóides e conforto termo-corporal).

Deste modo paulatinamente está se desvanecendo uma latente desconfiança existente nas empresas e presente quando se deseja interagir nas áreas de segurança e higiene do trabalho.

Dos levantamentos efetuados pode-se constatar que:

1. a iluminação de minas e suas relações com saúde ocupacional, com produtividade e com segurança no trabalho são temas pouco conhecidos e considerados não prioritários na mineração.
2. as condições de iluminação em minas subterrâneas brasileiras não são satisfatórias no que tange à níveis recomendados, a tipos de lâmpada e luminária, à qualidade de instalação e estado de conservação. Não encontramos informações de nenhum projeto específico nem programas de manutenção preventiva em execução.
3. em alguns locais de algumas minas a iluminação era adequada e algumas equipes de segurança tinham luxímetros. Isto indica que apesar da iluminação não ser a mais apropriada existia uma aceitação da importância do tema.
4. em todas as minas visitadas houve interesse no recebimento de mais informações sobre o assunto e sobre os resultados da pesquisa.

Uma continuação lógica desta pesquisa deveria envolver ações que revertessem o quadro acima, ou que pelo menos auxiliassem esta reversão. Dentre as múltiplas ações destacamos as seguintes que deverão ser perseguidas:

- a. elaboração de um manual prático;
- b. elaboração de um livro texto;
- c. preparação de questionário específico sobre iluminação;
- d. oferecimento de curso de extensão universitária;
- e. inclusão de iluminação em galeria didática;
- f. curso de pós-graduação;
- g. delineamento de experimentos sobre iluminação em minas;
- h. participação em comissões internacionais.

A. MANUAL PRÁTICO

Na elaboração de um manual prático voltado aos técnicos de campo dever-se-á incluir uma introdução às relações entre iluminação, segurança e produtividade, um resumo conceitual das principais grandezas e unidades, e linhas gerais de projeto e manutenção. O manual deverá ser acessível não só a engenheiros mas também a geólogos e técnicos de nível médio, devendo ser distribuído a todas as empresas que participaram desta pesquisa. Deverá enfatizar que os custos de uma boa iluminação são baixos (<1%) ao passo que os custos de uma iluminação inadequada são altos (pois afeta a moral, a produtividade, o número e severidade dos acidentes).

B. LIVRO TEXTO

Desde seu início esta tese foi escrita tendo-se como objetivo sua transformação posterior em livro texto para engenheiros de minas. Vários capítulos apresentam conceitos e definições fundamentais e uma ampla gama de tópicos são apresentados mesmo que superficialmente.

A principal mudança estrutural necessária para se obter um formato de livro texto é a inclusão de exemplos, questões e problemas propostos. Este material foi preparado concomitantemente com esta tese, tendo sido utilizado em aulas de graduação nas disciplinas PMI-597 Engenharia Ambiental em Minas e PMI-537 Ventilação, Higiene e Segurança na Mineração. Com a utilização de um bom processador de textos como o Wordstar 6.0 para Windows 3.1. esta transformação poderá ser executada sem grandes dificuldades.

Contatos já efetuados com engenheiros e técnicos da Fundacentro/Ministério do Trabalho indicaram haver interesse na publicação deste livro. A idéia de se preparar este livro teve origem nos seguintes fatos:

- a. inexistência de livro texto em português;
- b. a premissa de Trotter [4] de que é melhor um engenheiro de minas se envolver com a iluminação da mina do que um especialista em iluminação se especializar em mineração.

C. PREPARAÇÃO DE QUESTIONARIO ESPECIFICO

Do princípio da elaboração deste pesquisa até as últimas visitas de campo muito foi aprendido com relação ao que observar dentro da mina, ao que perguntar e como perguntar. As futuras visitas técnicas deverão ser precedidas do envio de um formulário geral de modo que se possa padronizar informações e mais facilmente atualizar os dados a cada 3 ou 5 anos. Neste intervalo de tempo a geometria das minas subterrâneas pode ter sido bastante alterada, tendo sido também alterada as características do sistema de iluminação. Este questionário deverá ser distribuído a todas as minas subterrâneas que tenham ou não sido visitadas.

Para as minas que desejarem se envolver em futuras pesquisas as

visitas técnicas deverão ter seu tempo estendido para cerca de uma semana, de modo que se possa fazer um levantamento de detalhe específico para cada mina. Este levantamento pormenorizado deverá ser orientado por um formulário específico para cada mina, o qual levará em consideração o tipo de minério, o método de lavra e outras peculiaridades da mina.

Os levantamentos de detalhe deverão utilizar uma planta da mina, de modo que se possa indicar os locais de acordo com as classes propostas pela CIE. Um código de cores baseado na ideia usada pelo USBM para seu luxímetro "go/no go" apresentaria em verde os valores em acordo com a norma e em vermelho os valores inferiores ao recomendado.

Para cada local se deverá obter dados relativos a tipo de fonte e luminária, voltagem e potência, bem como das condições de limpeza e conservação da lâmpada, da luminária e dos suportes. Outras informações se referirão à porcentagem dos bulbos inoperantes, do piscamento e do consumo de lâmpadas.

Outros dados interessantes para futuras pesquisas seriam relativos ao número de mineiros daltônicos e dos códigos de cores e sinalização em vigor em cada mina específica. Um formulário para pesquisas de campo é apresentado pela MAPAO [7].

D. CURSO DE EXTENSAO UNIVERSITARIA

Um curso de extensão universitária foi oferecido a diversas empresas, inclusive a minas não envolvidas nesta pesquisa como Ipueira III (cromita) e Caraíba (cobre). Este curso é hoje parte integrante do conjunto de cursos oferecidos pelo LACASEMIN e que são:

- a. Controle ambiental em minas a céu aberto: material particulado e vibrações. (já ministrado)
- b. Ventilação de minas. (a ser ministrado em 1992)
- c. Instrumentação em minas subterrâneas.
- d. Engenharia ambiental na mineração: gases, poeiras e conforto termo-corporal.
- e. Iluminação de minas.

E. GALERIA DIDATICA

Em espaço anexo ao LACASEMIN se construirá uma galeria artificial totalmente instrumentada, com sistemas de ventilação, sistemas de suporte estrutural, medidores de gases, etc. Pretende-se instalar um sistema de iluminação com diversos tipos de lâmpadas e luminárias, bem como painéis explicativos do funcionamento básico de cada uma, características, vantagens e desvantagens.

Esta galeria servirá a alunos de graduação, pós-graduação, de extensão e técnicos da área de mineração, que poderão ter um contato inicial com os fundamentos da iluminação em subsolo. Uma porção da galeria terá inclusive sua superfície interna pintada de branco, numa imitação da calação de minas escuras.

F. CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

Após a conclusão desta pesquisa pretende-se oferecer um curso de iluminação de minas subterrâneas a nível de pós-graduação no Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP. Este curso poderá fazer parte do conjunto de cursos oferecidos na pós-graduação "in loco" que já está implantada pelo Departamento.

G. DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Após a preparação do manual prático e do livro texto será elaborado um projeto de pesquisa envolvendo a execução de testes nas minas, principalmente nas frentes e realces. Esta nova pesquisa deverá ser financiada por órgãos competentes e visará essencialmente a comparação de realces com e sem iluminação de rede nos aspectos de produtividade, acidentes e ambiente de trabalho.

H. PARTICIPAÇÃO EM COMISSÕES

Durante a execução desta pesquisa foram efetuados contatos com diversos especialistas estrangeiros, principalmente no que concerne a normas. Através de um destes contatos fomos convidados pelo Dr. R. Hemp a participar de um dos Comitês Técnicos da CIE, do qual ele é o presidente. Após a conclusão desta pesquisa deveremos formalizar nossa inclusão neste Comitê.

A efetivação de uma ou mais destas ações anteriormente descritas deverá auxiliar na melhoria das condições de iluminação em minas brasileiras, dando continuidade prática a esta pesquisa, e permitindo um maior intercâmbio técnico entre a Universidade e as empresas mineradoras na área da engenharia ambiental.