

ANÁLISE DE FATORES ARQUITETÔNICOS UTILIZANDO MÉTODO ESTATÍSTICO

Patricia Romeiro da Silva Jota, Mirna Suely dos Santos Bracarense

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG
DPPG - Departamento de Pesquisa e Pós-graduação
DES/DAEE/CDPAEE – Centro de Demonstração e Pesquisa em Eficiência Energética
Av. Amazonas 7675, 30510-000, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil
prsjota@des.cefetmg.br <http://www.des.cefetmg.br/coord/Prsj.htm>

RESUMO

Este trabalho apresenta o método estatístico “Fatorial de dois Níveis”, para avaliação quantitativa do aclaramento produzido no interior do ambiente construído, em função de alguns fatores arquitetônicos simulados em modelos reduzidos. Um dos objetivos deste trabalho é identificar a melhor combinação dos fatores: área da janela, localização da janela e a presença de beiral de modo a ocorrer uma distribuição mais uniforme de luz natural, proporcionando um conforto luminoso e eficiência energética no ambiente construído.

O modelo em escala é um dos instrumentos que os arquitetos utilizam para uma melhor compreensão e análise da distribuição de luz dentro nos ambientes. O experimento foi composto por vários testes realizados em ambientes externos sob condições naturais de luminosidade e com a ajuda de dois luxímetros. Utilizamos o método estatístico “Fatorial de dois Níveis”, analisando os efeitos simples e a interação entre os fatores escolhidos, além da dispersão entre os aclaramentos internos avaliados em cada teste do experimento. Esta metodologia utilizada é um meio eficiente para avaliação e análise de experimentos, tendo um bom resultado em estudos de arquitetura. Além da descrição do modelo reduzido e da metodologia adotada no experimento, relatamos alguns dos dados obtidos e os resultados alcançados.

ABSTRACT

This paper presents a statistical method called “2-level Factorial Design” used for a quantitative evaluation of the natural lighting inside buildings produced by some architectural factors simulated in scaled models. Our goal in this experiment is identify the better combination of the factors: window area, window location and overhang achieving the better distribution of light inside buildings to have visual comfort and energy efficiency.

Scale model is one of the instruments that architects can use for a better comprehension and analyses of daylight distribution inside buildings. The experiment has been composed by many tests run outdoors under natural light conditions with the aid of two luximeters.

We used the 2-level Factorial Design for the analyses of the simple and interaction effects of the chosen factors, besides the deviation analyses among the daylight levels inside buildings evaluated in each test of the experiment. This methodology adopted is an efficient way for evaluation and analyses of experiments and have good results in architectural studies. Besides the description of the model and the methodology in the experiment, we reported some of the data obtained and the achieved results.

1. INTRODUÇÃO

Este estudo apresenta a análise de alguns fatores arquitetônicos que interferem nos níveis de iluminação natural no interior de um ambiente. Pretende-se caracterizar estes fatores observando a uniformidade na distribuição de luz interna, o conforto luminoso e eficiência energética no ambiente construído.

Nos países de clima tropical, altos níveis de iluminação natural no interior dos ambientes construídos podem acarretar em desconforto visual pelo excesso de ofuscamento produzido, além do aumento da carga térmica aumentando o consumo de energia para o resfriamento através de ar condicionado e ventiladores.

Na concepção do projeto de arquitetura, devemos buscar aplicar os conceitos para uma Arquitetura Bioclimática, onde o conforto do usuário e a eficiência energética sejam metas a serem alcançadas. Podemos trabalhar no desenvolvimento de um projeto de arquitetura vários fatores que irão propiciar melhores condições de conforto térmico e luminoso, tais como a escolha de uma boa orientação na implantação da edificação, tirar partido dos ventos dominantes e da luz solar para um bom dimensionamento das aberturas, uso de materiais e técnicas construtivas mais adequadas ao nosso clima.

Em Belo Horizonte existe o Código de obras, decreto lei 84 datado de 21-12-1940, que legisla sobre as normas que devem ser seguidas para a aprovação dos projetos arquitetônicos na Prefeitura. No tocante às aberturas para iluminação e ventilação, as regulamentações relativas ao seu dimensionamento tomam como parâmetros as razões entre áreas de piso e tipo de utilização do ambiente e a existência ou não de beiral. Quanto a altura de verga sobre a janela, regula somente a altura máxima em 1/6 da altura do pé-direito do ambiente.

No Estado de Minas Gerais, o órgão responsável pela construção de escolas públicas é o DEOP (Departamento Estadual de Obras Públicas) que recomenda a orientação sul, a existência de um beiral em torno de 200 cm e ventilação cruzada nas salas de aula.

Desta forma, optamos na escolha dos fatores (dimensionamento e níveis) a serem avaliados no experimento: a área de janela, localização da janela na parede em função da altura de verga e a existência ou não de beiral, partimos das posturas exigidas no código de obras de Belo Horizonte e recomendações do DEOP. A coleta de dados gerados pela combinação dos três fatores em dois níveis, foi realizada com a utilização do modelo reduzido em escala efetuando o experimento sob condições naturais de iluminação no Campus do CEFET-MG.

2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Muitos métodos tem sido utilizados para os cálculos dos valores de luz natural nos ambientes construídos, tendo o aspecto quantitativo e qualitativo como objeto de análise. Iremos trabalhar no nosso experimento com o aspecto quantitativo do problema e partindo do conceito geral do Fator de luz Diurna (fd) como a razão entre o aclaramento medido em cada ponto interno (E_i) e o aclaramento externo simultâneo (E_o) ao tomado em cada ponto interno, que é expresso em porcentagem pela equação 01, (Del Carlo, 1973, Hopkinson, 1963).

$$fd = E_i / E_o \times 100\% \quad (\text{Eq.01})$$

Muitos são os fatores relacionados com os níveis de luz natural dentro dos ambientes, escolhemos a área da janela, localização da janela na parede em função da altura da verga e a presença ou não do beiral. Estes três fatores em dois níveis (baixo e alto) foram combinados e realizaram-se as medições dos aclaramentos internos e os externos simultâneos foram feitas, utilizando um modelo reduzido em escala feito com papelão "Paraná". O modelo reduzido é um meio barato e eficiente de efetuar estudos de arquitetura durante a fase de concepção do projeto. O modelo foi feito na escala 1/20 simulando um

ambiente quadrado de 700 x 700 cm, com um pé-direito de 280cm, tendo um beiral removível de 200 cm e paredes removíveis com as aberturas, conforme pode ser visto na figura 1.

Optamos pela orientação sul da fachada com janela e o experimento foi realizado em área externa no Campus do CEFET-MG. As condições externas foram de céu parcialmente encoberto, típico do verão em Belo Horizonte. As coordenadas geográficas encontradas pelo GPS 12 x L modelo Garmim foram latitude 19°56'18" sul e longitude 43°59'59,6 oeste.



Figura 1: Modelo reduzido utilizado nos experimentos

3. MÉTODO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE EXPERIMENTO

Os experimentos são utilizados para se estudar maiores detalhes sobre um processo ou sistema. O experimento projetado é um teste ou uma série de testes onde alterações são feitas nas variáveis controláveis do sistema com o objetivo de se observar e identificar as razões das mudanças nas respostas obtidas.

A figura 2 apresenta o sistema tratado neste artigo. Deseja-se, através do projeto do experimento aqui proposto, estabelecer a relação entre algumas variáveis controláveis e o aclaramento interno obtido. Basicamente, as variáveis incontroláveis deste sistema são aquelas que alteram o nível de iluminância na abertura do modelo estudado. Para minimizar o efeito destas variáveis, a resposta (saída do sistema) foi tomada como sendo o Fator de luz Diurna (f_d) que é a razão entre o aclaramento medido em cada ponto interno (E_p) e o aclaramento externo simultâneo (E_o). Este aclaramento externo leva em consideração as variáveis incontroláveis como nuvens, etc. Assim, mantendo as variáveis controláveis constantes, a razão f_d deve se manter constante. Desta forma, pode-se alterar as variáveis controláveis e verificar qual o efeito das mesmas na razão f_d .

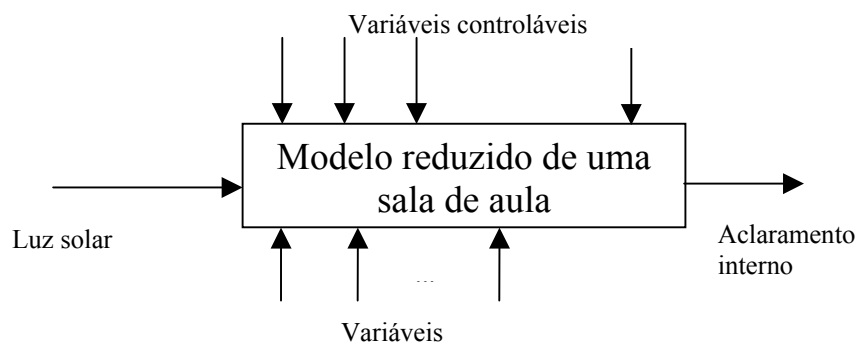


Figura 2: Sistema estudado

Normalmente, o estudo de variáveis é feito alterando-se um fator por vez (1FAAT – 1 factor at a time) (Barker, 1994). Neste caso, toma-se a medida de f_d com todas as variáveis na mesma condição (teste referência) e depois altera-se um fator por vez. O efeito, do fator sob estudo, é calculado tomando-se a diferença do teste referência daquele com o fator alterado mantendo-se todos os outros constantes. Este tipo de teste é bastante utilizado, porém, os dados são facilmente falseados, devido a interação entre fatores.

Outra técnica a ser utilizada é o “Fatorial de dois Níveis”. Esta técnica trabalha com todas as combinações entre os fatores. Neste tipo de projeto, as observações não são analisadas separadamente, e o experimento fornece uma independência matemática (ortogonalidade) do efeito dos fatores sob estudo. O número de experimentos t_c é 2^K , onde K representa nº de fatores e 2 o número de níveis, neste trabalho $k=3$ e portanto, teremos 8 testes formando o experimento.

3.1 Yates order

Nesta análise estatística, cada fator varia entre dois valores e todas as combinações destes valores serão analisadas, conforme pode ser visto na tabela 1. Temos três fatores (A, B e C) neste experimento representados por letras maiúsculas, cada um deles em dois níveis, representados por sinais ‘-’ e ‘+’ significando respectivamente os níveis baixo e alto, conforme pode ser visto na tabela 1 que mostra todas as combinações de fatores e os seus respectivos níveis. O fator A, por exemplo, está em nível baixo quando a janela tiver área igual a 817 cm^2 e nível alto para 980 cm^2 . A segunda coluna indica a ordem de Yates, que é um identificador do teste a ser realizado. O $t_c = (1)$ indica que todos os fatores estão no nível baixo, o $t_c=a$ indica que o fator A está no nível alto e os demais no nível baixo, e assim por diante. Os experimentos vão sendo feitos seguindo-se a indicação do t_c . Normalmente os testes são feitos fora da ordem de Yates, ou seja, de forma aleatória. Após o teste, a tabela é construída colocando-se todos os testes na ordem esperada.

Tabela 1: Ordem de Yates e níveis dos fatores (dados em cm^2 , cm e cm)

Order	t_c	A (janela)	B (beiral)	C (verga)
1	(1)	817	-	0
2	a	980	+	0
3	b	817	-	200
4	ab	980	+	200
5	c	817	-	0
6	ac	980	+	0
7	bc	817	-	200
8	abc	980	+	200

Deseja-se verificar o efeito dos três fatores estudados no fator de luz diurna dentro do ambiente estudado. Porém, sabe-se que este índice se altera a cada ponto medido. Deseja-se portanto, além de se ter uma referência média deste aclaramento interno, analisar a dispersão destes valores ao longo da sala. A figura 3 ilustra os pontos escolhidos para se efetuar as medições. Analisaremos portanto, além do índice médio de fator de luz diurna (fd) interno, a dispersão entre as medidas nos 16 pontos de medição, calculados pelo desvio padrão entre o fd do ponto e o fd médio do ambiente.

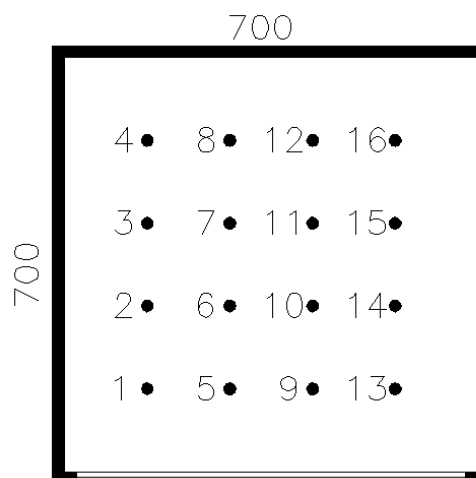


Figura 3: Diagrama da sala e pontos de medição

4. RESULTADOS OBTIDOS

A partir da tabela 1 podemos construir a tabela de interações entre os fatores. A interação entre o fator A e o B, interação AB, será a multiplicação dos níveis como uma simples operação algébrica (- x - = +) como é indicado na tabela 2. Assim, teremos quatro novas colunas que são todas as interações entre as variáveis. A tabela 2 apresenta ainda o resultado do fd_{total} obtido em cada um dos experimentos. Para obter estes valores de fd_{total} , tomou-se a média simples dos valores de fd em cada ponto de medição (16 pontos) em três medições repetitivas (realizadas em três dias diferentes).

Tabela 2: Interações e fd_{total}

Ordem	tc	Efeito simples			Efeito das interações				Saídas observadas	
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC	fd_{total} (%)	Desvio padrão (s)
1	1	-	-	-	+	+	+	-	3,9	3,6
2	a	+	-	-	-	-	+	+	2,9	2,5
3	b	-	+	-	-	+	-	+	1,3	1,0
4	ab	+	+	-	+	-	-	-	1,3	0,8
5	c	-	-	+	+	-	-	+	3,6	3,4
6	ac	+	-	+	-	+	-	-	3,7	3,2
7	bc	-	+	+	-	-	+	-	1,3	1,0
8	abc	+	+	+	+	+	+	+	1,7	1,1

Utilizando esta tabela, podemos agora verificar o efeito simples de cada fator. Nesta análise, para calcular o efeito do fator B soma-se todas as saídas onde o fator B possui nível alto e faz-se o mesmo com os níveis baixos. Calcula-se em seguida o valor médio e subtrai-se o efeito do nível alto do nível baixo, como está exemplificado na tabela 3.

Tabela 3: Cálculo do efeito simples do beiral no fd e na dispersão

Efeito do beiral em fd		Efeito do beiral na dispersão	
B+	B-	B+	B-
1,3	3,6	1,0	3,6
1,3	2,9	0,8	2,5
1,3	3,6	1,0	3,4
1,7	3,7	1,1	3,2
$\Sigma 5,6$	$\Sigma 13,8$	$\Sigma 3,9$	$\Sigma 12,7$
y	1,4	y	1,0
Diferença: $1,4 - 3,5 = -2,1$		Diferença: $1,0 - 3,2 = -2,2$	

A tabela 3 apresenta o cálculo detalhado do efeito simples do beiral no fator de luz diurna médio e da dispersão entre os valores nos pontos de medição. Percebe-se claramente que o fator de luz diurna decresce com o aumento do beiral ($y(B+) < y(B-)$), como era esperado, porém, o nível de aclaramento é menos variável, ou seja, o desvio padrão entre as medidas é menor. Com isto podemos dizer que o beiral diminui o ofuscamento pois ele permite o aproveitamento da luz natural de uma forma mais homogênea, porém em menor quantidade. Sem o beiral, obteve-se um fator fd médio em torno de 3,5% enquanto que este cai para 1,4% quando da implantação do beiral.

A mesma análise pode ser feita para os outros fatores. Analisando-se a janela, observou-se que na faixa adotada (segundo normas da PBH) o aumento da janela não causou aumento no nível de iluminância interno, porém, colaborou na uniformidade de distribuição da luz. A verga, tendo o seu nível alto, fez com que o peitoril da janela fosse colocado no nível do plano de trabalho, melhorando a iluminância interna e aumentando muito pouco na dispersão entre os valores de fd.

A figura 4 mostra as medidas realizadas nos 16 pontos, durante três medições (realizadas em três dias diferentes). Os pontos 1, 5, 9 e 13 da figura 3 são plotados nesta figura na distância 1,4m da janela. Assim totaliza-se $4 \times 3 = 12$ medidas para cada distância da janela. Observa-se que a dispersão maior

ocorre nos pontos mais próximos da janela e a medida que afasta-se dela a dispersão diminui, mostrando um menor impacto das variáveis incontrolláveis no experimento.

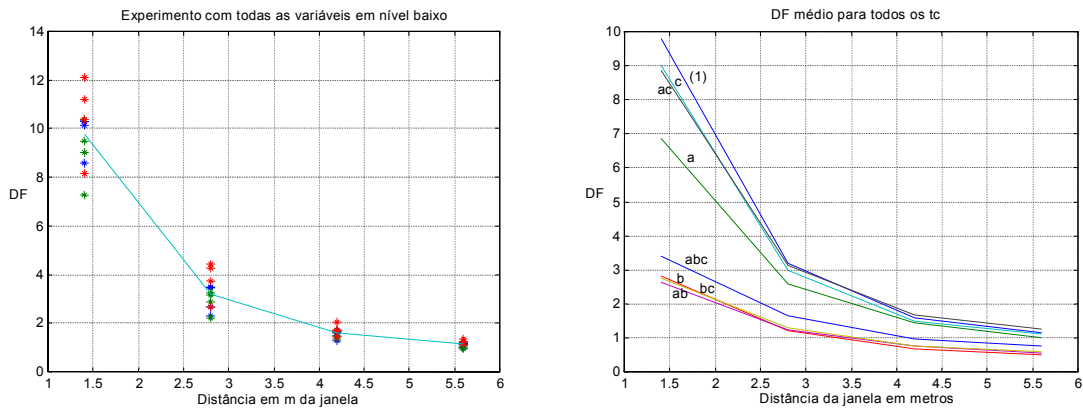


Figura 4: (a) Valores medidos para tc = (1) e a curva média obtida (b) Curvas médias para cada tc

A figura 4 apresenta todas as curvas médias obtidas e demonstra claramente o efeito do beiral. Neste experimento, o efeito deste fator é bastante óbvio (o que pode não ocorrer para todos os fatores) e todas os experimentos onde o beiral está em nível alto (existe beiral) o nível de aclaramento interno é menor, porém é muito mais uniforme, oferecendo um menor ofuscamento do que as demais combinações de fatores e facilitando a implantação do sistema suplementar de luz artificial durante o dia.

5. EFEITO DOS FATORES COMBINADOS

A figura 5 apresenta o resultado das interações entre os fatores A e B para o fator de luz diurna. Os gráficos demonstram claramente que o efeito do aumento da janela para o beiral em nível alto é desprezível. O aumento da janela com o beiral grande eleva o fd, enquanto que sem o beiral o efeito foi oposto.

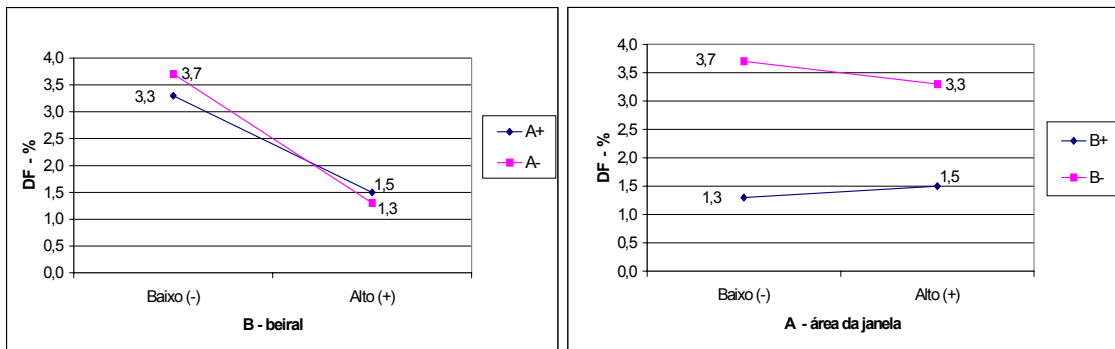


Figura 5 a e b: Interação entre os fatores A (janela) e B (beiral) no índice fd

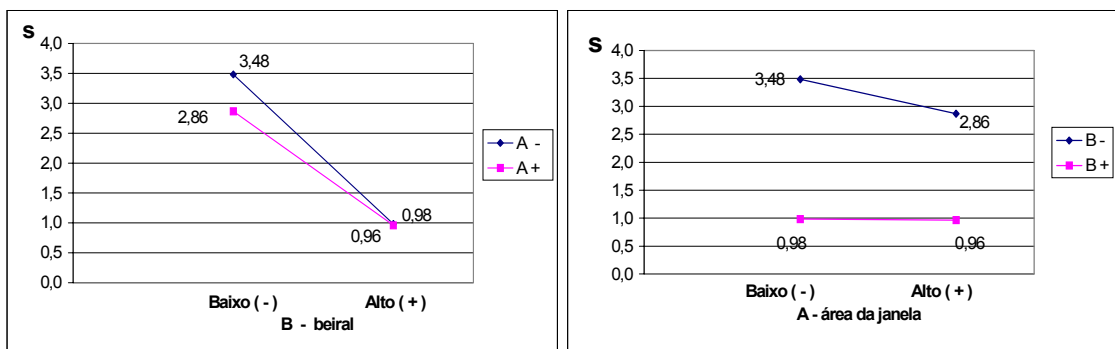


Figura 6 a e b: Interação entre os fatores A (janela) e B (beiral) na dispersão

A figura 6 apresenta os resultados para a dispersão entre as medidas dentro do ambiente estudado. O aumento da janela praticamente não afeta o desvio padrão entre as medidas quando o beiral é grande. Sem o beiral, o efeito da janela é sentido.

Pode-se verificar que os fatores B e C não interagem entre si com relação à dispersão entre as medidas, figura 7a, pois as retas são paralelas, indicando a falta de interação entre os fatores. O mesmo ocorre para o fator de luz diurna que também apresenta resultado similar. Para a verga grande, o aumento da janela praticamente não afeta o resultado, com respeito à dispersão, figura 7b. Quanto ao fator de luz diurna, o aumento da verga aumenta o fd se a janela for maior, porém, reduz se a janela for menor (Jota, 2001).

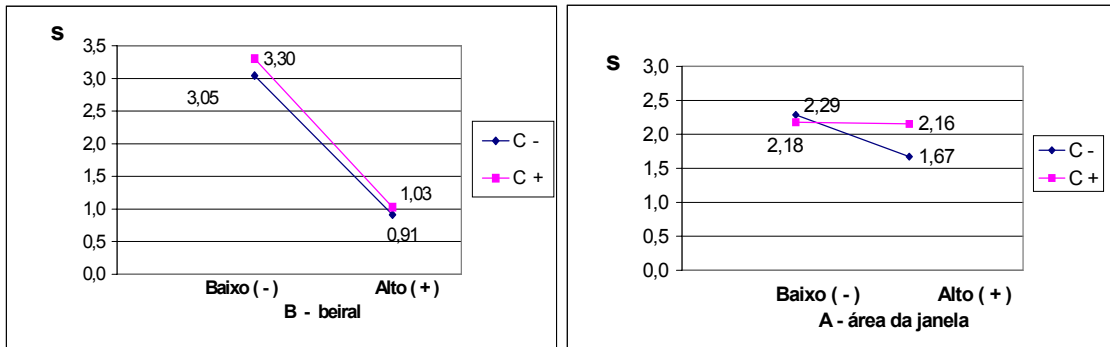


Figura 7: (a)Interação BC no desvio padrão; (b)Interação AC no desvio padrão.

6. EFEITO DA ARQUITETURA NA ILUMINAÇÃO COMPLEMENTAR

A integração da luz natural com a artificial é possível utilizando-se a técnica denominada IASPI, (iluminação artificial suplementar permanente). A dificuldade encontrada no projeto integrado é o fato de combinar dois tipos distintos de iluminação sendo praticamente impossível de se conseguir uma uniformidade. A IASPI recomenda que seja escolhida uma iluminância adequada que contrabalance o desconforto causado pelo céu visível através da janela.(quanto maior a luminância da abóbada celeste, maior deve ser a iluminância do sistema suplementar). Assim, uma escolha de variáveis arquitetônicas que possibilitem a entrada da iluminação natural de forma intensa irá exigir um maior nível de iluminação do sistema suplementar. Sistemas arquitetônicos que apresentam um aproveitamento menor, pode ter um sistema suplementar mais uniformemente distribuído.

Como vimos, a escolha e dimensionamento dos fatores arquitetônicos definirá a necessidade de complementação da iluminação natural de forma diferente. Observou-se que o uso do beiral proporciona uma maior uniformidade da iluminação natural, embora em níveis menores, figura 8a. A falta do beiral permite uma entrada de luz maior e exigirá um sistema complementar diferenciado, figura 8b.

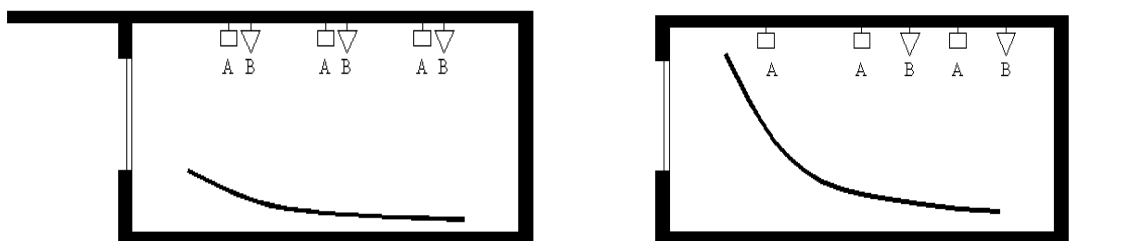


Figura 8: (a) Curva média de fd com beiral; (b) Curva média de fd sem beiral.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise quantitativa do efeito de três variáveis arquitetônicas no nível de aclaramento interno de um ambiente. Seguindo as normas vigentes no Estado de Minas Gerais e no município de Belo Horizonte, projetou-se uma sala de aula. As variáveis tamanho da janela, existência de beiral e altura da verga sobre a janela foram analisadas em dois níveis, conforme as normas.

Utilizando o método “Fatorial de dois Níveis” um projeto de experimentos foi realizado utilizando um modelo reduzido. A análise dos resultados forneceu o efeito separado de cada fator e os efeitos de interações entre fatores. As análises demonstraram que os fatores beiral e verga são independentes entre si, porém, as interações tamanho da janela e beiral e tamanho da janela e verga não podem ser desprezadas.

No momento da concepção do projeto arquitetônico e do projeto de iluminação, o arquiteto e o engenheiro eletricitista devem compreender como os fatores se comportam para que o projeto seja feito de forma adequada. A concepção do sistema de iluminação suplementar será diferente dependendo das escolhas arquitetônicas e portanto, o uso da energia também irá se alterar.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HOPKINSON, R. G. *Architectural Physics – Lighting*, Department of Scientific and Industrial Research – Building Research Station – London, (1963), 360.
- BANSAL, N. K., HAUSER, G., MINKE, G. *Passive Handbook of Building – Passive Building Design*, Elsevier Science B. V. – Amsterdam, London, N. Y. ,Tokio, (1994).
- BARKER, T. B. *Quality for Experimental Design*, Second Edition, revised and Expanded – Marcel Deckker, Inc. – N. Y. ,Basel, Hong Kong. (1994), 473.
- DEL CARLO, U. *Iluminação Natural – Estudo através de Modelos*, UNICAMP – Faculdade de Engenharia de Limeira, Seção Gráfica do IPT. São Paulo, (1973), 78.
- MAGALHÃES, M. A. Medidas de luz natural através de aberturas laterais – Variações decorrentes do uso de vidro, Anais do III Encontro Nacional *I Encontro Latino-Americano - Conforto do Ambiente Construído*, Depto. De Tecnologia da Construção, FAU – UFRJ (1995).
- JOTA, P.R. S., BRACARENSE, M.S.S. - Saving energy using the sun as a lighting source, 2001 WSES/IEEE CSCC, Atenas, Grécia (2001)