

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE CONFORTO AMBIENTAL COM O CONCEITO DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA PROJETOS ESCOLARES

Valéria A. C. Graça (1); Doris C. C. K. Kowaltowski (2)

(1) CEFET-SP, R. Leonardo da Vinci, 230, Cotia, SP, valeria_collet@uol.com.br

(2) UNICAMP, Dept. Arq. e Constr., C.P. 6021, Campinas, SP, doris@fec.unicamp.br

RESUMO

Avaliações pós-ocupação realizadas nos prédios de escolas do Estado de São Paulo mostraram que os edifícios possuem uma série de problemas relacionados ao conforto ambiental o que permite considerar que os parâmetros atuais de projeto necessitam de uma revisão criteriosa. Esta pesquisa apresenta um método de avaliação e otimização de projetos arquitetônicos de escolas para a rede pública estadual de São Paulo, considerando a formulação de parâmetros de conforto ambiental que são utilizados na fase de anteprojeto. O objetivo da avaliação/otimização de projeto foi maximizar diversos aspectos de conforto ambiental e qualificar as diversas soluções de projeto existentes. O método de avaliação foi aplicado em 35 projetos de escolas. Os resultados mostraram a existência de conflito entre os diferentes parâmetros de conforto ambiental e a importância do uso da otimização para a avaliação de projetos. Observou-se que não é possível maximizar os quatro confortos ao mesmo tempo, mas sim encontrar um conjunto de soluções de compromisso. A aplicação mostrou, também, a relevância do método como um importante instrumento de avaliação e processo de decisão.

ABSTRACT

Post occupancy evaluations of school buildings in the State of São Paulo have shown that schools present various problems related to environmental comfort, and that design criteria should be revised. This paper presents a design evaluation method based on optimization of comfort parameters applicable at the preliminary design stage and appropriate for public schools in the State of São Paulo. The main goal was to maximize specific aspects of environmental comfort (thermal, illumination, acoustics and functionality) and characterize specific design solutions of existing typical designs. The method was tested on 35 school designs. Conflicts between different comfort parameters were evident in the results but the optimization method was shown to be an efficient design evaluator. Final results showed that a set of compromise solutions exists, and that an optimal solution for all four aspects of environmental comfort is not possible. Testing the method proved that optimization can be a powerful instrument when applied to the design process as a decision making tool.

1. INTRODUÇÃO

O projeto arquitetônico de escolas para ensino da rede estadual é padronizado atualmente pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE). O programa arquitetônico é estipulado pela modulação em função de salas de aula. A partir da padronização o projetista organiza o espaço dentro de um determinado terreno considerando a legislação local vigente (FDE, 1998). A padronização gerou um modelo de projeto que considera um bom projeto como aquele que atende as restrições e diretrizes constantes em catálogos de especificação de ambientes e nas normas técnicas de elaboração de projetos de escolas de ensino fundamental e ensino médio no âmbito do Estado de São Paulo. No processo de projeto as condições de conforto ambiental não são sistematicamente consideradas como um princípio de projeto abrangendo parâmetros de conforto mais rigorosos que abrangem o ambiental. Através de avaliações pós-ocupação de edifícios escolares da rede estadual de São Paulo, verificam-se problemas referentes a condições de conforto ambiental. Estes problemas podem ser resultado de decisões realizadas no início do processo projetivo quando são definidas a forma geral do edifício e sua implantação. A aplicação de critérios de avaliação pode ser um meio para melhorar o processo do projeto. Este trabalho apresenta uma proposta de metodologia de avaliação de projeto com base na otimização de parâmetros de conforto ambiental aplicável ao processo criativo de projetos de escolas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para a formulação de metodologia de avaliação/otimização de projetos de escolas da rede estadual de São Paulo, foram formados por uma amostra de trinta e nove projetos: vinte e cinco se encontram representados no livro *Arquitetura Escolar e Política Educacional: Os Programas na Atual Administração* (FDE, 1998) e catorze projetos se encontram representados no relatório final da avaliação pós-ocupação realizada pela UNICAMP à escolas de Campinas (KOWALTOWSKI et al, 2001).

Estes projetos foram analisados quanto à influência do terreno em relação à síntese da forma. Procurou-se delimitar o tamanho mínimo da largura, do comprimento e da relação destas duas medidas do terreno da amostra, de modo a permitir uma certa flexibilidade de decisões em projeto. Considerou-se que terrenos com dimensões menores que as estipuladas na tabela 1 não fariam parte do conjunto de soluções viáveis para a aplicação da metodologia de avaliação. A maioria dos projeto implantados nesses terrenos sofrem grandes restrições devido ao tamanho do terreno o que prejudica a tomada de decisões otimizadas no anteprojeto.

A definição das soluções viáveis de projeto, realizada com a limitação do terreno, foi seguida da formulação de parâmetros de conforto ambiental para a fase de anteprojeto. Notou-se que nesta fase de projeto as principais decisões realizadas pelos projetistas tratam da implantação geral dos ambientes educacionais. Por este motivo foram considerados como parâmetro de conforto luminoso a orientação das salas com disposição das aberturas para o conforto térmico adicionou a ventilação; de conforto acústico a proximidade entre ambientes ruidosos (pátio) e sala de aula; de conforto funcional a proximidade entre ambientes que afetam diretamente a rotina da escola como sala de aula e banheiro.

Realizada a definição dos parâmetros de conforto ambiental para a fase de anteprojeto, foram analisadas as variáveis encontradas nas soluções viáveis de projeto para cada parâmetro. A modelagem matemática destas variáveis de projeto passou por várias decisões:

- Primeiro, foi necessário definir uma maneira de qualificá-las de modo a permitir, posteriormente, uma unidade de quantificação única para todos os confortos. Optou-se pela utilização da escala semântica e pela qualificação feita por especialistas das variáveis de conforto e da qualificação das variáveis de conforto funcional através de medidas retiradas dos projetos considerados.
- Segundo, a partir destas decisões fez-se necessário transformar o diferencial semântico (péssimo, ruim, bom, muito bom e ótimo) um dado qualitativo em um dado quantitativo. Considerou-se a teoria dos sistemas nebulosos (Fuzzy sets) como alternativa para esta modelagem. Sendo utilizado o grau de pertinência para transformar a escala semântica em dado quantitativo. No caso das repostas dos três especialistas foi considerada a média das repostas.

Elaborando-se o modelo matemático de cada conforto ambiental, foi realizada a avaliação dos projetos objeto desta pesquisa. Cada projeto possui um conjunto composto de quatro avaliações. Ainda foi necessário definir a função objetivo da metodologia de avaliação/otimização. Ou seja o que seria considerado para a seleção de um conjunto de projetos ótimos. Considerou-se nesta fase que a função objetivo do modelo se faz pela maximização do conjunto de conforto ambiental, portanto os projetos considerados não-inferiores possuem pelo menos uma variável de projeto superior quando comparado à outro projeto.

Com a elaboração da metodologia de avaliação/otimização de projeto foi possível reduzir o número de soluções de projeto considerando-se apenas os projetos que possuem solução de compromisso. Estes projetos são considerados soluções ótimas do conjunto de projetos avaliados.

3. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFORTO AMBIENTAL

As escalas semânticas foram quantificadas através de valores utilizando-se o grau de pertinência, conforme se visualiza na figura 1.

Foram qualificadas sete configurações de salas de aula considerando-se as posições das aberturas. Estas configurações podem se apresentar em oito tipos de orientação solar e ventilação predominante. Representando um total de 56 variáveis de projeto visualizadas nas figuras 2. e 3. Para qualificar estas variáveis de projeto foram realizadas entrevistas com três especialistas da área de conforto térmico. As

entrevistas foram direcionadas através de questionário considerando a escala de valores semântica como se verifica no exemplo da figura 4. A escala semântica utilizada para qualificar as variáveis de projeto foi quantificada através do grau de pertinência obtido pela média das respostas dos três especialistas, conforme se verifica na figura 4. Cada escola foi quantificada através da média dos valores de grau de pertinência das variáveis de projeto obtidos na tabela 2. Por exemplo: na escola BAIRRO ROCIO localizada em Iguape, observa-se a existência de três salas de aula com orientação Nordeste e três salas de aula com orientação Sudoeste. Todas as aberturas se localizaram em parede oposta ao corredor conforme se verifica na fig.5.

Foram qualificadas por três especialistas as variáveis representadas na figura 6, onde o bloco azul representa a sala de aula, o bloco verde o pátio e o bloco branco o corredor. Para qualificar estas variáveis foram considerados que: as portas das salas de aula estariam fechadas e voltadas para o corredor, as janelas na parede oposta ao corredor e abertas e a área de recreação no pavimento térreo. Observou-se que todos os especialistas consideraram que não há diferença na qualificação de cada variável quanto ao pavimento (térreo, primeiro ou segundo andar) de localização das salas de aula. A escala semântica para o parâmetro acústico foi quantificada através do grau de pertinência obtido pela média das respostas dos especialistas, conforme se verifica na figura 6. Cada escola foi quantificada através da média dos valores de grau de pertinência das variáveis de projeto obtidos na tabela 3.

Foram qualificadas por três especialistas as variáveis de projeto representadas na figura 7. Para qualificar estas variáveis de projeto foram realizadas entrevistas com três especialistas, como se verifica na figura 8. As variáveis qualificadas pelos especialistas através do diferencial semântico foram quantificadas através do grau de pertinência obtido pela média das respostas, conforme se verifica na tabela 4. Cada escola foi quantificada através da média dos valores de grau de pertinência das variáveis de projeto obtidos na tabela 4.

Na análise feita através dos 35 projetos, observou-se que a distância entre sala de aula e banheiro variou de 10.80 a 111.00. Não se verificou relação entre o número de salas de aula e as distâncias máximas. Para transformar estas medidas em grau de pertinência de acordo com a escala semântica, foi considerado a relação do tempo gasto para a locomoção de um ambiente para outro e o tempo da atividade realizada no ambiente conforme tabela 5. Através da tabela 5. pode-se transformar medidas físicas em grau de pertinência e avaliar os projetos quanto ao conforto funcional.

4. OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO DA AMOSTRA

A otimização de projeto é realizada para que se possam comparar projetos que pertencem ao conjunto de soluções viáveis, isto é, soluções que atendam as restrições do modelo matemático, e selecionar a “melhor” alternativa. O conjunto de soluções viáveis foi analisado através do modelamento matemático dos parâmetros de conforto térmico, acústico, luminoso e funcional. Os dados recolhidos em cada escola formam um conjunto discreto de avaliação das variáveis de projeto expressos em grau de pertinência, representados na tabela 6.

Observou-se que num único projeto poderiam ocorrer diferentes configurações de sala de aula, portanto a avaliação global de cada parâmetro foi realizada pela média da qualificação das variáveis de projeto. Nesta pesquisa o objetivo é avaliar projetos e tomar decisões otimizadas, considerando-se o conjunto de parâmetros de conforto ambiental na fase de anteprojecto. Verifica-se na tabela 6 que não existe uma solução que maximize todos os confortos ao mesmo tempo. Este fato permite considerar o conceito de otimização multicritério para comparar e selecionar as melhores soluções de projetos. Isto é, identificar e excluir as soluções inferiores, formando o conjunto de soluções de compromisso. Portanto, faz-se necessário estipular um critério que identifique quais são as soluções inferiores e quais são as soluções de compromisso.

Nota-se que existem projetos com grau de pertinência inferior em todos os confortos à outra solução, como é o caso do exemplo da Escola Cel. Firmino G. da Silveira que possui grau de pertinência de conforto térmico, luminoso, acústico e funcional respectivamente composto por (0.10,0.24,0.45,0.57) que é inferior ao conjunto formado pela Escola Bairro Limoeiro (0.25,0.33,0.67,0.77).

Assim o critério para identificar as soluções inferiores é: soluções que possuem **todas** as avaliações de parâmetros de conforto com valor inferior à outro projeto. Pode-se definir por eliminação, o critério de

maximização de projeto que identifica as soluções de compromisso da seguinte maneira: soluções que possuem pelo menos uma avaliação de parâmetro de conforto superior à outro projeto

Verificando-se todos os projetos que são objeto desta análise e seguindo o critério de maximização, forma-se um conjunto discreto de soluções de compromisso representado na tabela 7. Estas soluções também são chamadas de “ótimo de Edgeworth-Pareto” do conjunto finito das soluções viáveis de projeto (STADLER E DAUER, 1992). Observa-se, pela tabela 7 que o conjunto de soluções de compromisso mostra de forma clara que a análise de anteprojetos e a decisão por um único parâmetro de avaliação poderia desconsiderar soluções melhores em outros parâmetros. Por outro lado na formação do conjunto “ótimo de Edgeworth-Pareto” observa-se que uma solução inferior necessita de ajustes maiores que as soluções de compromisso, por esta razão é importante se considerar a otimização multicritério no início do processo de projeto para que as melhores soluções sejam selecionadas, o que pode contribuir para a racionalização do processo e para elaboração de projetos com melhor qualidade relacionadas ao conforto ambiental.

5. CONCLUSÃO

A aplicação de metodologia de avaliação, com o conceito de otimização, proporciona uma melhoria na área de projetos em dois pontos importantes: primeiro na metodologia de projeto e segundo na avaliação pós-ocupação. O projetista que se utiliza do conceito de otimização em sua metodologia de projeto, soluciona o problema de uma maneira mais racional, uma vez que tende a selecionar variáveis de projeto que já passaram por um processo de qualificação. A utilização da metodologia de projeto ,com o conceito de otimização, também permite ao projetista uma argumentação coerente de suas decisões o que melhora sua comunicação com o usuário na explanação de sua proposta de projeto. Acredita-se que a aplicação desta metodologia no desenvolvimento de novos projetos e na APO pode contribuir para a melhoria do ambiente escolar, alertando os projetistas da importância de se considerar em conjunto os quatro confortos ambientais através do conceito de otimização.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO (FDE). Arquitetura escolar e política educacional: os programas na atual administração do Estado. São Paulo,1998.

KOWALTOWSKI, D C.C.K. et al. Relatório científico - projeto de pesquisa: Melhoria do conforto ambiental em edificações escolares de Campinas, S.P., FEC-UNICAMP, 2001.

STADLER W. E e DAUER J., Multicriteria optimization in engineering: a tutorial and survey. In: Seebass, R. (editor) Structural Optimization: status and promise progress on astronautics and aeronautics. USA: Manohar P. Kamat,1992, p.209

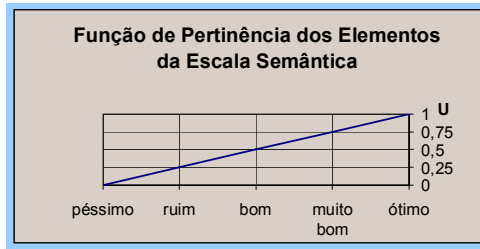


Fig. 1 Grau de pertinência de cada elemento da escala semântica.

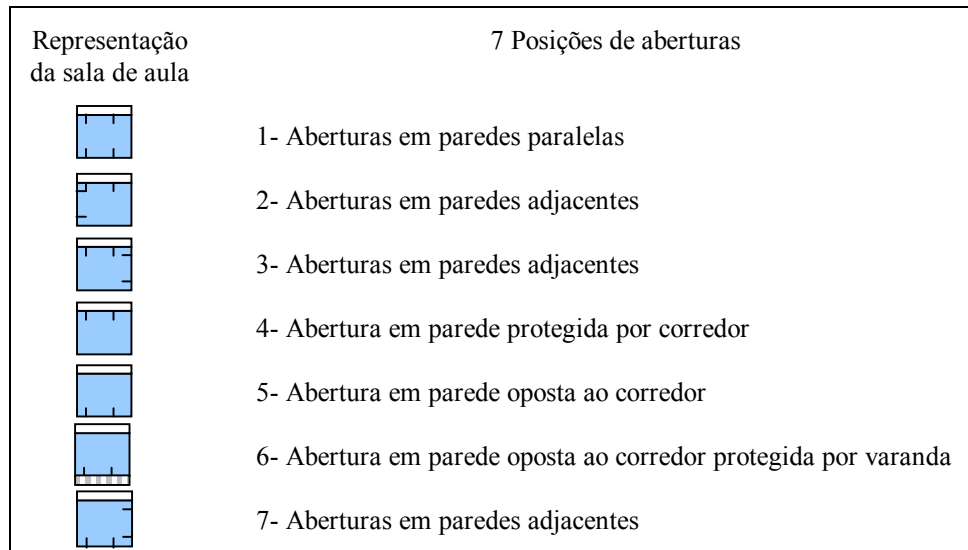


Fig. 2 Configurações das salas de aula e suas aberturas.

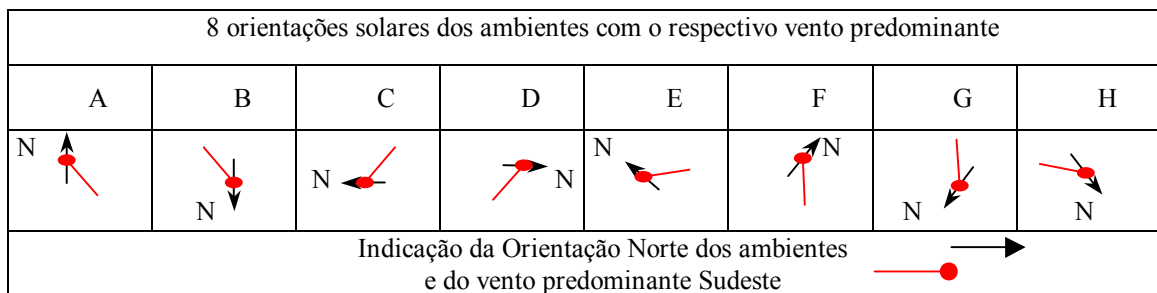
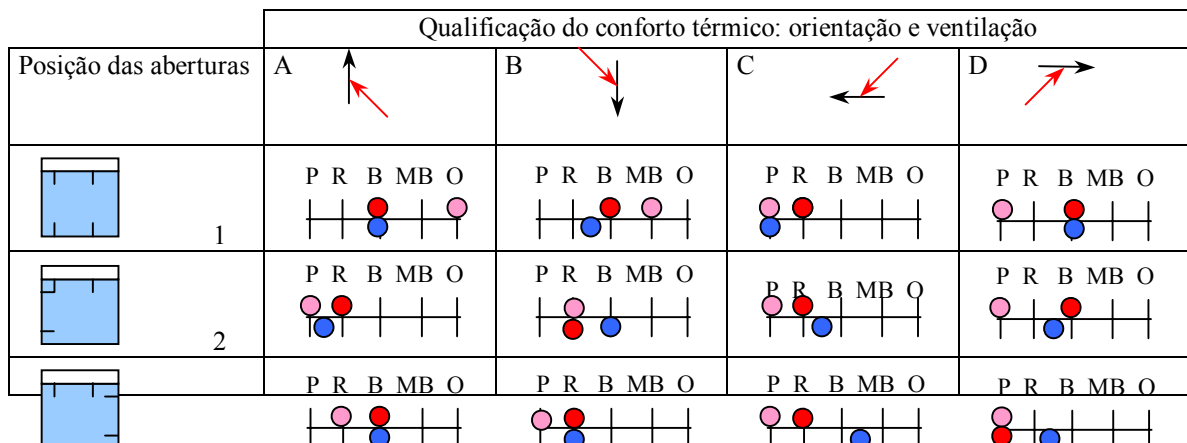


Fig. 3 Posições das orientações e ventos predominantes



3			
---	--	--	--

Fig. 4 Qualificação de algumas variáveis de conforto térmico.

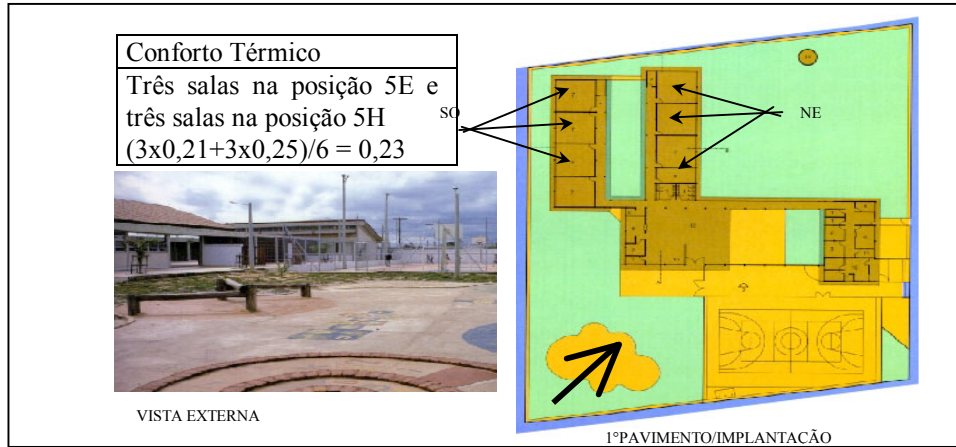


Fig. 5. Exemplo de avaliação de conforto térmico do projeto

variável	Pav.	GP	variável	Pav.	GP
	1	T 1 P R B MB O 2		5	T 1 P R B MB O 2
	2	T 1 P R B MB O 2		6	T 1 P R B MB O 2
	3	T 1 P R B MB O 2		7	T 1 P R B MB O 2
	4	T 1 P R B MB O 2		8	T 1 P R B MB O 2

Fig. 6 Qualificação das variáveis de conforto acústico feita pelos especialistas

Posição das aberturas nos formatos diferenciados de sala de aula			
Posição das aberturas	Salas retangulares com corredor na menor face	Salas retangulares com corredor na maior face	Salas quadradas
Aberturas em paredes paralelas	1	6	13
Aberturas em paredes adjacentes uma com proteção	2	7	14
Aberturas em paredes adjacentes uma com proteção	3	8	15
Abertura em parede protegida por corredor	4	9	16
Abertura em parede oposta ao corredor	5	10	17
Abertura em paredes adjacentes sem proteção		11	18
Abertura em paredes adjacentes sem proteção		12	

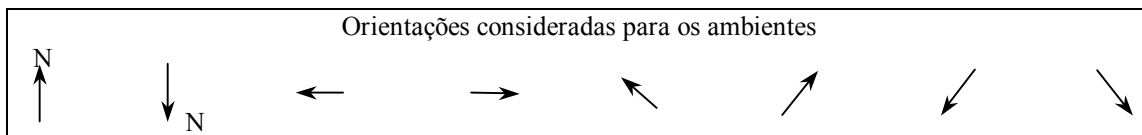


Fig. 7 Variáveis de projeto para conforto luminoso

		Qualificação de conforto luminoso: orientação das aberturas e formato da sala de aula			
Formato e posição das aberturas		A ↑	B ↓	C ←	D →
	16	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●
	17	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●
	18	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●	P R B MB O ● ● ● ● ●

Fig. 8 Qualificação de algumas variáveis para o conforto luminoso

Tab. 1 Dimensões mínimas de terreno e relação entre número de salas

Escolas	Largura (mínima)	Comprimento (mínimo)	Razão (L/C) (mínima)
4-12 salas	36	43	0,36
13-15 salas	38	65	0,48
16-18 salas	40	70	0,48
19-21 salas	53	108	0,49

Tab. 2 Grau de Pertinência das variáveis de projeto para conforto térmico

Posição das aberturas	Quantificação de conforto térmico orientação e ventilação							
	A ↑	B ↓	C ←	D →	E ↙	F ↗	G ↘	H ↖
1	0,67	0,54	0,08	0,33	0,33	0,71	0,46	0,33
2	0,13	0,33	0,21	0,29	0,21	0,17	0,38	0,38
3	0,42	0,25	0,29	0,13	0,46	0,29	0,33	0,17
4	0,25	0,29	0,21	0,17	0,25	0,29	0,25	0,21
5	0,17	0,17	0,00	0,08	0,21	0,29	0,17	0,25
6	0,33	0,29	0,13	0,17	0,29	0,42	0,29	0,29
7	0,33	0,00	0,17	0,25	0,38	0,42	0,04	0,00

Tabela 3 Quantificação das variáveis acústicas de projeto

variável	GP	variável	GP
1	0,71	5	0,33
2	0,21	6	0,46
3	0,67	7	0,46
4	0,50	8	0,17

Tab. 4 Grau de pertinência das variáveis para conforto luminoso.

Salas de aula	Quantificação de conforto luminoso orientação							
	A ↑	B ↓	C ←	D →	E ↖	F ↗	G ↘	H ↙
1	0,08	0,08	0,58	0,29	0,38	0,13	0,25	0,21
2	0,29	0,63	0,17	0,08	0,21	0,29	0,59	0,33
3	0,46	0,17	0,13	0,21	0,25	0,54	0,29	0,34
4	0,17	0,29	0,50	0,42	0,29	0,29	0,38	0,38
5	0,25	0,08	0,42	0,33	0,29	0,29	0,21	0,21
6	0,63	0,38	0,08	0,13	0,13	0,25	0,17	0,25
7	0,17	0,21	0,29	0,46	0,29	0,38	0,25	0,38
8	0,25	0,13	0,46	0,34	0,38	0,34	0,38	0,33
9	0,67	0,50	0,54	0,38	0,46	0,46	0,50	0,42
10	0,58	0,42	0,00	0,21	0,13	0,21	0,25	0,33
11	0,08	0,25	0,08	0,25	0,04	0,29	0,17	0,25
12	0,29	0,08	0,00	0,21	0,21	0,25	0,25	0,25
13	0,88	0,38	0,04	0,25	0,17	0,42	0,17	0,29
14	0,17	0,29	0,34	0,46	0,25	0,38	0,29	0,63
15	0,38	0,13	0,50	0,29	0,38	0,34	0,71	0,42
16	0,67	0,42	0,42	0,29	0,46	0,46	0,50	0,42
17	0,54	0,25	0,00	0,17	0,13	0,25	0,17	0,33
18	0,08	0,25	0,00	0,21	0,13	0,21	0,17	0,33

Tab. 5 Conversão de medidas funcionais em grau de pertinência

Diferencial semântico	GP	% de tempo de locomoção em relação a atividade	Atividades em sala de aula		Atividades no pátio (recreio)	
			minutos	distância para ir e voltar	minutos	distância para ir e voltar
Péssimo	0,00	10% da atividade	5	541,65	2,0	216,66
Ruim	0,25	5% da atividade	2,5	270,83	1,0	108,33
Bom	0,50	3% da atividade	1,5	162,5	0,6	65,00
Muito bom	0,75	2% da atividade	1,0	108,33	0,4	43,30
ótimo	1,00	1% da atividade	0,5	54,16	0,2	21,66

Tab. 6 Avaliação de projetos em relação as variáveis consideradas de conforto ambiental

Escolas	Térmico	Luminoso	Acústico	Funcional
Roque Magalhães Barros	0,25	0,17	0,33	0,90
José Camilo de Andrade	0,27	0,21	0,49	0,64
Prof. M. Alice C. Rodrigues	0,25	0,32	0,67	0,66
Dante Aliguieri Vista	0,23	0,47	0,46	0,45
Bairro Limoeiro	0,25	0,33	0,67	0,77
Prof. João Sant' Anna	0,17	0,31	0,61	1,00
Bairro Rocio	0,23	0,23	0,67	0,89
Chapada Grande	0,17	0,25	0,67	0,95
Bairro Senhorinhas	0,69	0,65	0,21	0,36
Prof. Casemiro Poffo	0,00	0,00	0,17	0,83
Dr. Disney F. Scornaienchi	0,29	0,42	0,71	0,93
Buraco do Gazuza	0,25	0,33	0,17	0,45
Pq. Piratininga II	0,17	0,29	0,34	0,97
José Ibiapino Franklin	0,33	0,29	0,21	0,59
Procópio Ferreira	0,25	0,33	0,50	0,71
Francisco Glicério	0,25	0,25	0,49	0,74
Cel. Firmino G. da Silveira	0,10	0,24	0,45	0,57
Alberto Medaljon	0,22	0,20	0,68	0,67
Ary Monteiro Galvão	0,29	0,46	0,59	0,46
Pq. Claudia	0,23	0,21	0,67	0,60
Artur Segurado	0,26	0,31	0,33	0,98
Barão Geraldo	0,23	0,23	0,45	0,46
Conj. Hab. Jd. .Dourado II	0,24	0,22	0,67	0,87
Jd. Nossa Sra. De Fátima	0,21	0,13	0,65	0,74
Vila Ayrosa	0,23	0,24	0,56	0,71
Jd. Rodolfo Pirani	0,09	0,21	0,56	0,96
Prof. Jesus José Attab	0,21	0,30	0,46	0,47
João Lourenço	0,24	0,28	0,33	0,59
Galo Branco	0,17	0,39	0,46	0,46
Jd. Tiro	0,25	0,33	0,44	0,55
Vitor Meireles	0,25	0,22	0,30	1,00
Jd. Centenário	0,23	0,29	0,46	0,63
Adalberto Nascimento	0,25	0,32	0,21	0,65
Prof. Renato Fiuza Teles	0,25	0,54	0,71	0,41
Cidade Soinco II	0,23	0,25	0,25	0,39
Soldado PM. E. B. Santos	0,07	0,22	0,17	0,62