22/10/99 0267/99
Defesa.

**INDICAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE FILME
ELETROCRÔMICOS Nb_2O_5 COMO PROTEÇÃO SOLAR EM
EDIFÍCIOS**

Adriana Amadeu Pinatti

Dissertação apresentada à área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, IFSC, IQSC, EESC, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais

Orientador: Eduvaldo Paulo Sichieri

**São Carlos
1999**

À

Dyonísio Garcia Pinatti

com amor e saudades

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. **Eduvaldo Paulo Sichieri** por presentear-me com plena liberdade e grande apoio .

À profª **Agnieszcka** e **César Avellaneda** por seus trabalhos com eletrocromismo e motivações a parcerias constituindo a semente deste trabalho.

À profª **Rosana** por sua alegre disposição e carinho.

Ao **Sérgio** e todos os funcionários do LCC, SAP, bibliotecas e USP que sempre auxiliam com dedicação.

À **Heli, Chris, Tati** e **Geo** por serem tão inteiramente irmãs.

As queridas **Mãe, Vó Maria** e **Tia Deise** pelo exemplo eterno de amor e coragem.

A **Marcelo** e **Priscila** por existirem em mim.

A **CAPES** pelo importante amparo financeiro habilitando-me conhecimentos para ajudar melhor o nosso **Brasil**.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
INTRODUÇÃO	xii

CAPÍTULO 1

1-QUESTÃO ENERGÉTICA NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

1.1-EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

1.2- NORMALIZAÇÃO

2- CONFORTO AMBIENTAL

2.1- ABRANGÊNCIA

2.1.1-Conforto Aeróbico

2.1.2-Conforto Acústico

2.1.3-Ergonomia

2.1.4-Conforto Visual

2.1.4-Conforto Térmico

2.2- ENERGIA E CONFORTO AMBIENTAL

2.3-ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA E ENERGIA SOLAR

3- RADIAÇÃO

3.1- EMISSÃO DE RADIAÇÃO

3.2- CORPO NEGRO	11
------------------	----

3.3-RADIAÇÃO SOLAR	14
--------------------	----

3.3.4- Radiações do Espectro Solar	15
------------------------------------	----

3.3.4.5- Ultravioleta	16
-----------------------	----

3.3.4.6- Visível	17
------------------	----

3.3.4.6-Infra-Vermelho	17
------------------------	----

CAPÍTULO 2

1- FINALIDADE DAS JANELAS	18
---------------------------	----

2- FLUXO DE ENERGIA EM JANELAS	19
--------------------------------	----

2.1-PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS VIDROS	20
-------------------------------------	----

2.1.1-Absorção, Reflexão e Transmissão de Radiação	20
--	----

2.1.2-Variação no espectro de transmissão dos vidros	23
--	----

2.1.2.1- Efeito Estufa	23
------------------------	----

2.1.2.2-Ângulo de incidência de Radiação e Reflexão	25
---	----

2.2- TROCAS DE CALOR POR MEIOS MATERIAIS	26
--	----

2.2.1- Condução	26
-----------------	----

2.2.2-Convecção	27
-----------------	----

2.3-DEFINIÇÃO DE EQUAÇÃO BÁSICA DE TROCA TÉRMICA EM JANELAS	28
---	----

2.3.1-Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC)	30
--	----

2.3.2-Coeficiente de Sombreamento (SC)	30
---	----

2.3.3-Fator U	31
---------------	----

3- LUZ NATURAL	31
----------------	----

3.1- A LUZ DO SOL E O HOMEM	31
-----------------------------	----

3.2- LUZ E VISÃO	33
------------------	----

3.2.1-Acuidade Visual	34
-----------------------	----

3.2.2-Acomodação	35
------------------	----

3.2.3- Adaptação	35
------------------	----

3.3.4- Contraste	36
3.3.5-Contraste luminoso no Campo Visual ou Ofuscamento	36
3.3- CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA PROJETOS DE ÁREAS ENVIDRAÇADAS	37
3.3.1-Localização	38
3.3.1.1- Redução por coseno	38
3.3.1.2-Reflexões em planos de trabalho	38
3.3.1.3-Brilho da fonte	39
3.3.1.4-Distribuição de iluminação	40
3.3.1.5-Luminosidade do céu e obstruções exteriores	40
3.3.1.6-Contornos atenuados	40
3.3.1.7-Janelas para visão do exterior	40

CAPÍTULO 3

1- A VIDRAÇA E A ARQUITETURA	42
2- PROCESSO FLOAT E O AVANÇO NA MANUFATURA DE NOVOS VIDROS	46
2.1- DEPOSIÇÃO QUÍMICA A VAPOR	47
2.2-EVAPORAÇÃO E DEPÓSITO A VÁCUO	48
2.3- DC DIODE SPUTTERING	48
3- VARIEDADE DE VIDROS DE MERCADO	49
3.1- VIDRO TRANSPARENTE	49
3.2- VIDROS COLORIDOS	49
3.3- VIDROS BRONZE E CINZA	49
3.4- VIDRO VERDE ABSORVENTE DE CALOR	50
3.5- FILMES REFLETORES	51
3.6- VIDROS LOW	51
3.7- VIDROS SELETIVOS ESPECTRALMENTE	51
3.8- JANELAS COM MÚLTIPLAS PLACAS DE VIDRO	51
4- ALTERNATIVAS PARA CONTROLE SOLAR	52

4.1-SISTEMAS INTERNOS DE CONTROLE SOLAR	52
4.2- APARELHOS DE SOMBREAMENTO EXTERNOS FIXOS	53
4.3- SISTEMAS DE CONTROLE SOLAR EXTERIORES E OPERÁVEIS	53
4.4- NOVAS OPÇÕES TECNOLÓGICAS	53
 5- JANELAS INTELIGENTES	 54
5.1- FENÔMENO DE ELECTROCROMISMO	54
5.1.1-Oxidos eletrocromicos catódicos	55
5.1.2- Óxidos eletrocromicos anódicos	55
 5.2- APARELHO ELETOCRÔMICO	 55
5.3- ÓXIDO CATÓDICO Nb_2O_5	57

CAPÍTULO 4

1-MATERIAIS E MÉTODOS	59
1.1-PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	60
1.2- ENSAIO ESPECTROFOTOMÉTRICO	61
1.2.1 Radiação Solar	61
1.2.2- Radiação Transmitida e Absorvida	61
 2- RESULTADOS	 63
2.1-TRANSMISSÃO ÓPTICA	63
2.1.1- Amostra Limpa	63
2.1.2- Amostra Polarizada	64
2.1.3- Despolarizada	64
2.2- TRANSMISSÃO ÓPTICA SOLAR	65
2.2.1- Radiação intrínseca a região ultra violeta do espectro solar	66
2.2.2- Radiação intrínseca a região visível do espectro solar	67
2.2.3- Potência radiante solar intrínseca a região de infra vermelho próximo	67
2.2.4- Potência de todo espectro solar por metro quadrado	68
2.3- RADIAÇÃO ABSORVIDA	69

3- DISCUSSÕES _____ 70

3.1- APLICAÇÃO DO PROCESSO SOL-GEL SONOCATALÍTICO VIA MOLHAMENTO EM ESCALA INDUSTRIAL _____ 70

3.2-ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS _____ 71

3.2.1- Curvas de transmissão _____ 71

3.2.1.1- Radiação ultravioleta _____ 72

3.2.1.2-Radiação Visível _____ 73

3.2.1.3- Radiações Infravermelhas do espectro solar _____ 75

3.2.1.4- Radiação Total do Espectro Solar _____ 76

3.2.2-Radiação Absorvida _____ 77

3.3- COMENTÁRIOS COMPLEMENTARES _____ 80

4- CONCLUSÕES _____ 82

5- BIBLIOGRAFIA _____ 84

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 01: Classificação de ondas eletromagnéticas de acordo com seu comprimento de onda. _____	11
FIGURA 02: Efeito da temperatura sobre a potência emissiva hemisférica monocromática de um corpo negro. _____	13
FIGURA 03: Distribuição de irradiação solar para massas de ar iguais a 0,1,4,7 e 10 , assumindo-se atmosfera muito limpa com 20mm de vapor d'água precipitável e 3,4mm de ozônio. _____	16
FIGURA 04: Fenômenos de trocas térmicas ocorrentes em vidros sob incidência solar e variação de temperatura entre o exterior (T_o) e o interior (T_i) de uma edificação. _____	21
FIGURA 05: Conforme o ângulo de incidência aumenta do zero, a transmitância diminui, a reflectância aumenta e a absorbância inicialmente aumenta devido ao aumento do caminho óptico e depois diminui por predominar o aumento na reflectância. _____	25
FIGURA 06: Representação de radiação refletindo em forma difusa. _____	26
FIGURA 07: Curva de irradiação solar associada a curva de sensibilidade visual dos olhos humanos . _____	32
FIGURA 08: Relação de acuidade visual para diversos ângulos sólidos do campo visual, com iluminância _____	34
FIGURA 09: Variação da performance visual com relação a intensidade luminosa para pessoas de idades diferentes [45]. _____	35

FIGURA 10: Esquema ilustrativo do fenômeno de redução da intensidade de iluminação de um plano de acordo com o ângulo que apresenta com relação a normal de uma superfície de trabalho[47].	39
FIGURA 11: Espectro de transmissão de vidro transparente, bronze, cinza e verde [37]	50
FIGURA 12: Esquema ilustrando o empilhamento de filmes entre placas de vidro compondo a janela eletrocromica.	56
FIGURA 13: Placa de vidro recoberto com ITO sofrendo molhamento em sol a velocidade de 12cm/min.	60
FIGURA 14: Curvas de Transmissão Óptica para comprimentos de onda entre 300 e 2200nm para condições limpa, polarizada e despolarizada da amostra de Nb2O5.	63
FIGURA15: Curvas de radiações solares direta e transmitidas através de vidro eletrocromico à base de Nb ₂ O ₅ em estado transparente e polarizado	66
FIGURA 16: Espectros de radiação ultravioleta incidente perpendicularmente em metro quadrado de superfície e transmitidos por metro quadrado de vidro eletrocromico com filme de Nb ₂ O ₅ transparente e polarizado.	72
FIGURA 17: Possibilidades de montagem de janelas inteligentes, podendo constituir-se de uma única placa ou de placas duplas. O indica a posição externa do edificio e I, o interior.	79

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: Relação de área envidraçada do edifício por consumo de eletricidade por ano. _____ 2

TABELA 02: Coeficientes de transmissão médios para regiões espectrais compreendidas dentro do espectro solar. _____ 65

TABELA 03: Apresentação de valores de energia solar incidente e transmitidos através de vidro eletrocromico à base de Nb_2O_5 transparente e polarizado e suas transmissividades solares. _____ 69

TABELA 4: Transmissividades obtidas por espectrofotômetro e transmissividades solares para as amostras transparentes (limpas) e polarizadas nas regiões espectrais e totais. _____ 72

TABELA 05: Apresentação da intensidade de energia relativa ao espectro visível incidente, intensidade desta energia transmitida através de vidro eletrocromico limpo (transparente) e polarizado (pol) e suas respectivas transmissividades solares. _____ 73

TABELA 06 : Apresentação da intensidade de energia relativa ao espectro infravermelho incidente, intensidade desta energia transmitida através de vidro eletrocromico limpo (transparente) e polarizado (pol) e suas respectivas transmissividades solares. _____ 75

TABELA 07: Apresentação da intensidade de energia relativa ao espectro total incidente, intensidade desta energia transmitida através de vidro eletrocromico limpo (transparente) e polarizado (pol) e suas respectivas transmissividades solares. _____ 76

LISTA DE SÍMBOLOS

λ - comprimento de onda

ν - frequência da onda

V- velocidade de propagação

E_b - potência emissiva de corpo negro

T- temperatura

σ - constante de Stefan-Boltzmann

$E_{b\lambda}$ - energia por unidade de área por unidade de tempo por unidade de comprimento de onda para comprimento de onda λ emitida por um corpo negro ou potência emissiva monocromática de um corpo negro.

C_1 - $3,7405 \times 10^{-16} \text{ W.m}^2$

C_2 - $0,0143879 \text{ m.K}$

ε - emitância

$\alpha_\lambda (\theta, \phi)$ - absorvância monocromática para radiação com ângulo θ de incidência com relação a normal e azimute ϕ .

$\varepsilon_\lambda (\theta, \phi)$ - emitância monocromática de radiação com ângulo θ de incidência com relação a normal e azimute ϕ .

E_D - radiação solar direta

E_d - radiação difusa da abóbada celeste

E_R - radiação refletida pelo solo

E_o - intensidade de energia incidente na superfície da vidraça

E_τ - intensidade de energia que se transmite através do material

E_α - intensidade de energia absorvida

E_ρ - intensidade de energia refletida

τ - transmissividade

ρ - reflectividade

α - absorvidade

τ_λ - transmissividade monocromática ou espectral

ρ_λ - - reflectividade monocromática ou espectral

α_λ - absorvidade monocromática ou espectral

E_λ - irradiação espectral

q - α , ρ , ou τ .

E_o - radiação incidente

E_t - radiação transmitida

C- concentração de agente absorvente de radiação

x- distância atravessada pela radiação dentro do material em questão

α - absorbância

n - índice de refração do meio

c - velocidade da luz

v- velocidade da luz no meio

q_k - calor transferido por condução

K - condutividade térmica do material

A - área da seção transversal pela qual o calor atravessa

dT/dx - variação infinitesimal de temperatura através do eixo do fluxo

E_o – radiação total incidente;

N_i - U/h_o

h_o - coeficiente de película médio externo;

U – Fator U ou coeficiente de transferência de calor total;

T_o – temperatura do ar externa;

T_i – temperatura do ar interna;

q_s - ganho solar

RESUMO

A importância da compreensão da questão energética nos edifícios, com enfoque nos fenômenos energéticos pelos quais o vidro participa e o delineamento de uma aproximação de desempenho em energia e conforto de vidros recobertos com filme eletrocromico de Nb_2O_5 , formam a finalidade deste trabalho. Os invisíveis fenômenos energéticos em superfícies envidraçadas promovem descontrolo de ambos iluminação e climatização de ambientes, associando janelas a impacto energético, cujas consequências tem causado desenvolvimento de especificações, normatização e legislação. A origem deste desequilíbrio energético nasce da desatenção dos projetistas (e da maioria dos homens), que deixam de observar o céu. O Sol envia a Terra diariamente dez mil vezes mais energia que o consumo mundial. Tãmanha intensidade disponível no meio ambiente, deparando-se com superfícies que permitem sua entrada em ambientes e impedem sua saída, causam iluminação e aquecimento dos ambientes internos. Este trabalho integra conceitos básicos de energia, sol, conforto e comportamento térmico e óptico de parte dos materiais vítreos de mercados atual e futuro, com a pretensão de apresentar-se como orientação primária aos profissionais do ramo. Paralelamente obteve-se a curva de transmissão solar de filme eletrocromico de Nb_2O_5 obtido via sol-gel sonocatalítico. Este processo foi desenvolvido por grupo de pesquisa desta universidade. Busca-se então associar os resultados obtidos com os conceitos apresentados, indicando efeitos a respeito de sua aplicação na arquitetura como vidro e protetor solar.

Palavras-chave: edifício, energia, energia solar, conforto, espectro, iluminação, calor, vidro, eletrocromico.

ABSTRACT

The aim of this work proposes an understanding about the energy impact promoted by buildings, focalizing the energetic phenomenon involving glazing bulks and indicating an energetic and comfort behavior of glasses recovered with Nb_2O_5 film. The energetic transfer through glasses promotes decontrol of environment illumination and temperature, associating windows to energetic impact, whose consequences have caused the development of specifications, standardization and legislation. The source of this energetic instability arises from designers inattention (also majority men), who forget to observe the sky. The Sun sends to Earth daily ten thousand times more energy than world consume. When such energy reaches surfaces that permit its entrance and hinder its exit, indoors illumination and heating are caused. This work groups basic concepts of energy, sun, comfort and thermal-optical behavior of glass materials in nowadays and future markets, pretending offer a primary orientation to professional in this field. Allied to this, were obtained the solar transmission curves of the electrochromic film of Nb_2O_5 , produced by Sol-Gel sonocatalytic process. Such process was developed by research group from this university. The results were associated with the concepts presented, indicating effects about its application as glass and solar protector in architecture.

Key words: building, energy, solar energy, comfort, spectrum, illumination, heat, glass, electrochromic.

INTRODUÇÃO

Discute-se o comportamento do indivíduo em seu cotidiano e suas ações, a princípio insignificantes, unidos numa reação de dimensão global. Sustentável é o que se pode sustentar. Nota-se então que o desenvolvimento sustentável e a proteção ambiental são problemas urgentes que deveremos tratar e resolver nas próximas décadas. Com sustentabilidade, a humanidade garante as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades.

Energia sustentável e segura é crucial para o desenvolvimento, porém ainda não temos recursos para obtê-la desta forma. Industrialização, otimização de processos agrícolas e rápido crescimento populacional de países em desenvolvimento, consumirão muito mais energia.

Em 2025 a quantidade de energia capaz de suprir necessidades globais será cinco vezes maior que consumida atualmente. Nosso ecossistema não suportaria, principalmente se tal aumento de geração for baseado na queima de combustíveis fósseis. A duplicação da geração de energia mundial baseados em recursos fósseis, trazem ameaças de aquecimento global e acidificação do ambiente. Usa-se a alternativa nuclear com grande controversa. Muitos concordam que ela só deva ser utilizada quando existirem soluções sólidas para os problemas insolúveis que traz [7].

Há previsões de grande déficit energético até 2007, devido a geração de energia insuficiente relativo ao aumento na demanda de energia elétrica consumida no Brasil [8].

Qualquer era de crescimento econômico necessita ser, entretanto, menos intensiva energeticamente que o crescimento passado. Políticas de eficiência serão as frentes das estratégias nacionais de energia para desenvolvimento sustentável e existe muito a ser feito e melhorado neste sentido. Equipamentos modernos precisam ser cada vez mais eficientes energeticamente.

Energia não tem valor próprio, a não ser pelos produtos e serviços que proporciona. Sob tal conjunto de produtos e serviços dependem o bem estar dos

indivíduos, o desenvolvimento sustentável de nações e a capacidade de vida do ecossistema planetário.

Foi permitido a esta mistura de produtos e serviços fluir e desenvolver-se desordenadamente devido a objetivos de alcances imediatos dos governos, instituições, companhias e profissionais.

A questão é muito importante para desenvolver-se randomicamente. É melhor e mais barato oferecer produtos e serviços eficientes com baixa produção de poluição, do que implementar imensas unidades poluidoras de geração de energia.

O setor da construção civil (e indústria associada) apresenta-se como o grande vilão desta história. A falta de projetos eficientes energeticamente decorre da lacuna de conhecimentos sobre os fenômenos de troca térmica, conceitos de iluminação natural e propriedades dos materiais, dentre os quais os vidros são de fundamental importância.

Trabalhos de caracterização óptica e térmica de vidros de mercado e integrações com informações climáticas locais, orientação da disposição e sistemas de sombreamento, estão sendo realizados [10,11,12]. Porém, a busca pela otimização energética continua estimulando pesquisadores à conquistas de novos produtos, cuja ciência quer a melhor resposta.

Janelas inteligentes parecem ser um dos grandes saltos a ser dado pelo setor vidreiro mergulhando na concretização do que parecia futuro. Selecionar e aproveitar os benefícios enviados pelo Sol, submetendo-se a seu ritmo é garantir conforto e bem estar, preservando combustível, atmosfera e áreas vivas.

O objetivo deste trabalho foi integrar conceitos básicos de energia, sol, conforto e comportamento térmico e óptico de parte dos materiais vítreos de mercados atual e futuro, com a pretensão de apresentar-se como orientação primária aos profissionais do ramo. Obteve-se a curva de transmissão solar de filme eletrocromico de Nb_2O_5 obtido via sol-gel sonocatalítico, processo desenvolvido por grupo de pesquisa desta universidade [5, 6]. Associou-se os resultados obtidos com os conceitos apresentados indicando efeitos a respeito de sua aplicação na arquitetura como vidro e protetor solar.

CAPÍTULO 1

1-QUESTÃO ENERGÉTICA NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

1.1- EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

O consumo de energia elétrica em edificações no Brasil representa cerca de 42% do consumo total de energia elétrica no país. Tal índice tende a subir tanto pelo aumento do número de edifícios quanto no uso de equipamentos [11].

Em países desenvolvidos a maior parte da energia é obtida pela queima de combustíveis fósseis, sendo a maior fonte do efeito estufa.

Nos Estados Unidos, estima-se que as edificações consomem em energia cerca de 36% do total. Desta forma o setor da construção civil despeja na atmosfera cerca de 40% do montante total de CO₂ produzido no país, equivalente a 500 milhões de toneladas por ano de gás carbônico ou 2 toneladas por ano por pessoa [12]. Tal consumo de energia também implica no pagamento anual da exorbitante conta de 200 bilhões de dólares [19].

Na Itália, o setor de serviços e construção civil representa uma terça parte da energia primária total consumida. Isto coincide com porcentagem similar na emissão de gases contribuindo com efeito estufa e decorrentes alterações climáticas [14].

O projeto arquitetônico relaciona-se intimamente com o percentual apresentado, afetando o grau de necessidade artificial de refrigeração, aquecimento e iluminação. Responsabiliza-se ao projeto de arquitetura de 40 a 60 % do consumo residencial, número que tende a crescer com o desempenho térmico e luminoso precário das edificações e com o aumento do poder aquisitivo [11]. Devemos comparar o edifício à uma máquina, cuja eficiência será maior ou menor em função da consciência global ao projetar e operar. Tecnologias bem como análises e métodos de projeto podem ser aplicadas para atender maior eficiência energética em edificações [9,10,13].

Uma pesquisa de consumo elétrico em residências realizado em Rio Claro, mostra que o aquecimento de água (24%), iluminação (12%) e ar condicionado (7%) totalizam 43% do total de eletricidade consumida em residências no verão. Apenas 6% das residências avaliadas possuem ar condicionado, entretanto observa-se que

este seguimento é responsável por 7% do consumo total de energia em residências [11].

Pesquisa realizada em São Paulo mostrou que 44% de energia são gastos com iluminação e 20% com ar condicionado do total consumido por edifícios comerciais e de serviços na região metropolitana. A preponderância dos usos de iluminação e ar condicionado decorre da qualidade do projeto. A utilização de energia elétrica em prédios comerciais e públicos apresenta um alto nível de desperdício, decorrentes do uso inadequado de equipamentos elétricos e da instalação, e do mau desempenho térmico do envelope da edificação, sem análise termo-óptica ao dispor áreas envidraçadas [11].

Levantamento realizado em 82 edifícios comerciais em Salvador (BA), mostrou que o consumo de energia elétrica é função do percentual de área envidraçada do envelope. Os edifícios foram distribuídos em quatro classes de acordo com estes percentuais, apresentados abaixo (tabela 1) juntamente com o consumo anual de energia médio [11].

TABELA 1: Relação de área envidraçada do edifício por consumo de eletricidade por ano.

Nomenclatura	(Área vidro/ área total) x 100	kWh/m ² . Ano
Pesados	≤ 20%	80.4
Médios	20- 40%	88.8
Envidraçados	≥ 40%	130.8
Protegidos por brises	Total ou parcialmente	84.0

Estima-se que nos Estados Unidos US\$ 20 bilhões anuais são literalmente jogados pela janela, resultado dos descontroles de trocas de energia em áreas envidraçadas [16].

O uso do vidro em edifícios permite um aspecto muito agradável e a penetração de iluminação natural, porém possui propriedades ópticas e térmicas bastante peculiares, que uma vez desconhecidas e portanto, mal utilizadas, provocam grandes ganhos e perdas de calor no edifício, além do descontrole da iluminação. Em decorrência destes efeitos, a desarmonia é compensada com o descaso ao usar

sistemas de ar-condicionado, iluminação, aquecimento, sombreadores e tipos específicos de vidro sem planejamento adequado.

Sobre o tempo de vida da edificação, as melhoras relacionadas a consumo de energia são de imensa vantagem econômica. No mercado imobiliário, compradores deveriam exigir a incorporação dos custos com energia nas decisões de compra. Os construtores deveriam explorar a eficiência energética na elaboração de um produto vantajoso do ponto de vista de valor de consumo.

1.2- NORMALIZAÇÃO

Após a crise do petróleo de 1973, tanto a Europa quanto os Estados Unidos perceberam a necessidade de reduzir o seu nível de consumo de energia. Como grande parte deste consumo provém de edificações, o isolamento térmico passou a ser de essencial importância [17].

Abriu-se então as portas para a evolução de projetos comprometidos com conservação de energia de acordo com as características abaixo [17]:

- O crescente custo de todas as formas energéticas admite hoje o gasto com sistemas de conservação de energia em edifícios; alguns sistemas são caros mas justificáveis para economia energética.
- Houve alteração nas prioridades dos projetistas devido a pressões dos clientes interessados em eficiência energética, através de normas lançadas por órgãos governamentais que esclarecem medidas de projeto apropriadas e por meio da própria consciência do arquiteto como cidadão com relação ao problema energético mundial.

Um levantamento sobre regulamentos para consumo energético em edificações de 57 países mostra que 27 países possuem leis de restrição de consumo de energia elétrica em edificações novas; 11 deles possuem normas; em 6 países as normas estão sendo propostas e em 13 deles não há normas, incluindo neste grupo o Brasil [11].

Na maioria das normas o principal objetivo é a conservação de energia. Quase todos os países indicaram que suas normas de energia incorporam prescrições para o envelope da construção, que influenciam escolhas de projeto para a cobertura,

paredes e janelas. Em uma extensão menor, prescrições mecânicas e de iluminação também ocorrem nas normas [11].

A Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar condicionado (ASHRAE) em conjunto com a Sociedade de Engenharia e Iluminação (IES), desenvolveram o projeto nacional de normas com o objetivo de fornecer ferramentas para conservação de energia em novas construções. Fornecem especificações para projetos e critérios de avaliação para eficiência energética em edifícios. As especificações do projeto estão relacionadas diretamente ao envelope da construção, com alta resistência térmica e baixo vazamento de ar. As normas também estabelecem práticas para melhorar sistemas mecânicos e elétricos no projeto, promovendo a eficiência energética [11].

Como as normas ASHRAE apresentam-se bastante completas, elas serviram de material de apoio para o desenvolvimento de normas em Hong Kong, Jamaica, Arábia Saudita, Singapura, Tailândia, Filipinas e Malásia.

A ausência de uma norma de eficiência energética em edificações no Brasil causa prejuízos crescentes, contribuindo com a necessidade de crescimento da geração para atender desperdícios que certamente poderiam ser evitados. O desenvolvimento de normas é urgente e a discussão já está em aberto. As normas de eficiência energética para edificações da ASHRAE poderão servir de base para o desenvolvimento da norma brasileira.

O Procel, órgão da Eletrobrás, iniciou em 1996 um Plano Estratégico de combate ao desperdício de energia. Dentre nove diretrizes traçadas, consta o estabelecimento de legislações e normatizações para assegurar ações de conservação e uso eficiente e racional de energia elétrica [2].

O Código de Obras e Edificações lançado em 1997 para o setor no Brasil já começa a tratar de questões emergentes como conforto ambiental e conservação de energia. A proposta do modelo é combater o desperdício de energia através da inclusão no projeto de parâmetros de conforto ambiental e recursos passivos [18].

Em Massachusetts uma lei estatal, House Bill 5277, determina que edifícios comerciais acima de 4645m² que consumirem energia além da média, serão taxados. Todas as taxas coletadas de edifícios extravagantes energeticamente serão abatidas das contas dos edifícios que consumirem menos energia. Esta é uma estratégia muito

estimulante para desenvolvimento de projetos racionais do ponto de vista energético, sem acarretar prejuízos em conforto ambiental [19].

2- CONFORTO AMBIENTAL [20]

Entende-se conforto ambiental aplicado ao projeto e construções como a adaptação de variáveis do ambiente construído às melhores circunstâncias físicas e mentais de habitabilidade do indivíduo, com o menor impacto energético e ecológico. O conforto em edifícios não é visto somente como finalidade última, mas também como meio de melhorar a performance produtiva dos indivíduos que se encontram neste ambiente.

O conceito moderno de conforto ambiental consiste na visão integrada sobre um conjunto de problemas que lida com elementos quantificáveis típicos da física e fisiologia (térmica, acústica, fotometria, resposta visual, dentre outros) e com parâmetros relativos como os de ordem psicológica e cultural. Esta visão interdisciplinar resulta indiretamente dos movimentos de consciência e dos novos conceitos sobre a organização dos processos produtivos surgidos a partir dos anos 70, e que ainda estão em pleno desenvolvimento.

Tenta-se recuperar o referencial humano, perdido de vista com o industrialismo e a massificação do consumo. Critérios de qualidade de vida e satisfação do consumidor ditam regras para a atividade produtiva. O mesmo acontece com as novas teorias organizacionais, fruto da informatização e dos padrões de eficiência exigidos pela atual era de globalização.

As crises energéticas e ambiental passam a ter enorme repercussão sobre a vida cotidiana contemporânea introduzindo a idéia de escassez e trazendo consigo uma série de exigências relacionadas com a otimização dos procedimentos, processos, insumos, tempo, espaços, e assim por diante.

2.1- ABRANGÊNCIA

O conforto ambiental pode ser entendido como o agrupamento de conforto térmico, conforto aeróbico, conforto acústico, conforto visual e conforto ergonômico.

2.1.1-Conforto Aeróbico

Diz respeito a qualidade do ar respirado no interior do ambiente construído. Determina esta qualidade o teor de oxigênio, teor de umidade (nível higrométrico) e o teor de poluentes inorgânicos ou orgânicos (grau de pureza).

Condições específicas de ar são necessárias à diversas atividades como conservação de livros e obras de arte, centros cirúrgicos, CPDs, laboratórios e indústrias de precisão.

2.1.2-Conforto Acústico

É avaliado segundo a inteligibilidade dos sons e os distúrbios que causam aos indivíduos. A inteligibilidade dos sons é a condição apropriada para se obter o melhor resultado acústico em salas de espetáculos, aulas, ou qualquer área que disponha de áudio.

Não atender os quesitos acústicos humanos podem causar distúrbios de ordem social, psíquica ou fisiológica à respeito de questões como privacidade, stress ou prejuízo do aparelho auditivo.

2.1.3-Ergonomia

A ergonomia é o estudo das posturas e dos movimentos do corpo humano e da cenestesia (sensibilidade relativa ao conforto físico e muscular). Incluem-se fatores físicos como conformação dos elementos com os quais o corpo tem contato físico direto (cadeira, mesa, maçaneta, interruptor, porta, veneziana, persiana, revestimento de piso ou parede, etc). e fatores ambientais como temperatura, grau de umidade, arejamento, etc.

2.1.4-Conforto Visual

É função da inteligibilidade ou clareza de leitura de toda a informação visual

(cor, forma, movimento, escrita) ou em função dos efeitos sobre o indivíduo decorrentes dos conteúdos estéticos ou psicológicos ali transmitidos. Parte da questão fica para arquitetura de interiores. O conforto visual depende basicamente da iluminação natural ou artificial.

2.1.4-Conforto Térmico

Diz respeito à temperatura ideal para cada tipo de ambiente levando em consideração não somente a presença de indivíduos e a atividade que executam, mas também a presença de equipamentos ou produtos sensíveis (computadores, obras de arte, alimentos perecíveis, etc).

Como calor e luz natural são emitidos pelo sol, confortos térmico e visual vão então depender do clima, topografia, posicionamento do edifício, das aberturas, das superfícies internas e externas da construção, cores, volumes interior e exterior, materiais de vedação e acabamento, características de iluminação instalada. As conseqüências estéticas, energéticas, funcionais e até mesmo fisiológicas das mais relevantes são reflexos da intensidade luminosa, sua distribuição espacial, o tipo de fonte luminosa.

Em função deste conjunto de variáveis, o nível térmico ideal pode ser obtido de forma natural - arquitetura bio-climática - ou com o auxílio de equipamentos. Trata-se de manter o ambiente suficientemente aquecido - por isolamento, ganho térmico ou calefação - ou então de manter ou tornar o ambiente suficientemente fresco - através do isolamento, da ventilação ou da refrigeração.

Deve-se buscar a harmonia entre os quesitos, evitando o erro de resolver alguns problemas criando uma série de outros, a ponto de alguns prejuízos anularem benefícios.

2.2- ENERGIA E CONFORTO AMBIENTAL

A questão energética no conforto ambiental está relacionada em boa parte com o desenvolvimento tecnológico voltado para a melhoria de rendimento dos equipamentos (sobretudo de iluminação e de condicionamento de ar), com o

aperfeiçoamento de materiais de construção civil que de alguma forma favoreçam a conservação de energia (isolantes térmicos, filtros solares e dispositivos de sombreamento, janelas inteligentes , etc) e com a evolução de arquitetura bio-climática.

A arquitetura bio-climática conglera ao projeto do edificio, conhecimentos dos fenômenos de transporte de calor, climatologia, movimento solar, ciência dos materiais, ecologia. Utilizam-se de métodos de aquecimento e resfriamento passivos, iluminação natural, sobreamento, compondo inclusive sistemas com o aproveitamento de energia ambiental.

O conforto térmico em países de clima tropical tem aspectos bem distintos dos países que enfrentam invernos rigorosos. Em países frios deseja-se ganhos térmicos solares via radiação e redução de perdas de calor do edificio por processos condutivos.

O clima do Brasil, altamente energético devido a incidência de alta intensidade de radiação solar na maior parte do ano, pode ser amplamente explorado pela construção de edificações bioclimáticas.

O projeto do edificio desenvolvido relevando-se recursos ambientais e propriedades dos materiais economiza em iluminação e resfriamento de ambiente devido ao conforto gerado.

Radiação visível solar bem utilizada como iluminação natural, dentro das exigências de conforto visual e com o mínimo possível de aquecimento adicional do ambiente interno reduziria o uso de sistemas elétricos e mecânicos usados para promover aos seus usuários condições confortáveis e saudáveis.

Para isto o projeto deve inicialmente analisar o clima e a orientação do local em relação ao movimento solar, as possíveis obstruções de luz solar e em que épocas que ocorrerão, conhecer os materiais disponíveis e suas propriedades, para então dispor sistemas de proteção frente a incidência solar direta nos ambientes internos ou mesmo evitar a disposição de janelas sob radiação solar direta.

Tanto a iluminação quanto a refrigeração artificiais são dispendiosos consumidores de energia. Os sistemas de refrigeração, além disso, tem custos altos de instalação. É interessante aos arquitetos e construtores dispor do maior número possível de opções quanto aos materiais e equipamentos que possam servir aos objetivos do conforto ambiental. Pode-se então combiná-los da forma mais

racional para cada caso, tendo em vista o nível de conforto oferecido e o mínimo de consumo energético, além de permitir a qualidade estética do edifício.

2.3- ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA E ENERGIA SOLAR

Ao olharmos em nosso redor e notarmos tudo que o compõe, podemos estar certos que qualquer elemento, estrutura ou forma é composta essencialmente de energia. O ar em movimento é energia, os sólidos são energia, os organismos, a água, as plantas, a vida, os movimentos dos astros, o sol e sua radiação. Tudo é energia. E a todo momento estão ocorrendo transferências de energia no Universo, ocasionando transformações ininterruptas e produzindo os mais belos fenômenos que não nos damos conta de observar.

O homem através da sua existência, em decorrência de suas necessidades e inteligência, aprendeu a controlar a transferência de energia em algumas de suas formas, gerando inúmeros benefícios que levaríamos dias em listar.

O Sol envia imensa quantidade de energia a Terra, que a natureza sabe transformar em petróleo, porém o Homem ainda não percebe, ou melhor, se esqueceu, que esta energia também é passível de ser controlada.

Ao projetar edifícios, arquitetos esquecem da imensa disposição de energia do meio ambiente e deixam de adaptá-los a tais parâmetros locais. A lacuna entre a ciência e a arquitetura é uma das causas destas falhas. A aplicação da engenharia, física e arquitetura conjuntamente, seria capaz de definir tais parâmetros e aplicá-los. Muitas respostas nos são dadas pela arquitetura vernacular e das grandes civilizações ancestrais [15].

Edifícios podem ser desenhados para aceitar ou rejeitar energia natural e armazená-la ou liberá-la em tempos apropriados. Portanto com o desconhecimento de informações a respeito de como fazer isto, o remédio é consumir energia cara com iluminação e condicionamento de ar.

Se maximizarmos o potencial energético passivo para cada edifício em cada zona climática, nossa necessidade de consumo de energia seria imensamente reduzida. A idéia é fazer o melhor com o que dispõe-se no local e suplementar respectivamente com energia solar ativa, de combustíveis renováveis ou energia convencional. Em muitos lugares seria possível projetar e construir estruturas

totalmente auto-suficientes energeticamente. Em outros locais, seria necessário o suplemento energético, porém em menor escala [9, 21, 22].

É necessário portanto o conhecimento do caracter de energia solar que atinge a Terra e de que forma isto ocorre. Para compreendermos melhor este fenômeno, serão introduzidos conceitos sobre radiação.

3- RADIAÇÃO [23, 24]

O processo de radiação é transferência de energia por meio de ondas eletromagnéticas. Ondas eletromagnéticas consistem de componentes de campos elétrico e magnético perpendiculares entre si e a direção de propagação. Existe uma divisão entre classes de ondas de acordo com seu comprimento de onda ou frequência, e também com a aplicação (figura 1).

As ondas eletromagnéticas se propagam à 300000km/s no vácuo, porém sua velocidade vai depender do meio pelo qual atravessa. O comprimento de onda λ da radiação é definido como a razão entre a velocidade de radiação pela frequência:

$$\lambda = (V / \nu) \quad 01$$

λ - comprimento de onda

ν - frequência da onda

V- velocidade de propagação

3.1- EMISSÃO DE RADIAÇÃO [25-28]

Toda matéria com temperatura acima do zero absoluto possui alguma energia interna que provoca movimentos vibracionais nos átomos. Em busca de equilíbrio, o sistema tende a diminuir sua energia interna, transformando parte dela em ondas eletromagnéticas. Este fenômeno é denominado emissão de radiação.

A frequência de oscilação se relaciona com a frequência das ondas emitidas e portanto temperaturas mais altas implicam em frequências mais altas e comprimentos de ondas menores (equação 1).

A emissão de radiação reduz a frequência das vibrações dentro das

moléculas, baixando temperatura. Consequentemente, diminui-se a frequência da radiação emitida com aumento de seu comprimento de onda.

As ondas emitidas se deslocam através do espaço, independente de matéria, até se chocarem com ela. Durante o choque, parte desta energia é absorvida e transforma-se em energia interna no corpo material. A energia acrescentada pode ser emitida novamente para o exterior.

FIGURA 01: Classificação de ondas eletromagnéticas de acordo com seu comprimento de onda.

3.2- CORPO NEGRO

Para simplificar a compreensão do fenômeno, idealizou-se um modelo perfeito. Corpo negro ideal é o modelo de absorvente de radiação e irradiador perfeito. Toda a radiação sobre ele incidente, é absorvida e toda energia absorvida é emitida. É

usado como padrão com o qual são comparadas as características radioativas de outros corpos [24-29].

A radiação emitida vai depender da temperatura em que o corpo se encontra. Uma relação entre a potência emissiva total e a temperatura de um corpo negro ideal foi obtida por Stefan e Boltzmann:

$$E_b = \sigma T^4 \quad 02$$

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$)

O espectro de radiação emitida pelo corpo negro ideal é conhecido como espectro de Planck, definido de acordo com a temperatura em que se encontra.

$$E_{b\lambda} = (C_1 \lambda^{-5}) / (e^{C_2/\lambda T} - 1) \quad 03$$

$E_{b\lambda}$ - energia por unidade de área por unidade de tempo por unidade de comprimento de onda para comprimento de onda λ emitida por um corpo negro ($\text{W/ m}^2 \cdot \mu\text{m}$)

λ - comprimento de onda em μm ;

T - temperatura do corpo negro (K)

C_1 - $3,7405 \times 10^{-16} \text{ W.m}^2$

C_2 - $0,0143879 \text{ m.K}$

A Lei de Stefan-Boltzmann prediz a integração da Lei de Radiação de Plank para corpos negros em todos os comprimentos de onda: Estas leis dizem que todo corpo que possui energia interna emite um espectro específico de onda, que depende da sua temperatura. A figura 2 ilustra este fenômeno através do deslocamento de gráficos de acordo com a temperatura do corpo.

A radiação térmica de um corpo não negro, ou seja, corpo cinza, é obtido multiplicando o espectro de Planck por um valor numérico, a emitância do corpo em questão. A **emitância** (ϵ) da superfície é a razão entre o fluxo de radiação térmica emitida pela superfície em questão e a radiação que seria emitida pela superfície

idêntica de um corpo negro na mesma temperatura. Esta relação é sempre menor que um.

FIGURA 02: Efeito da temperatura sobre a potência emissiva hemisférica monocromática de um corpo negro[24].

Se a razão espectral de E_{λ} e E_b (emitância) é constante sobre toda faixa espectral emitida, então a equação 4 pode ser modificada para superfícies reais :

$$E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 \quad 04$$

Dada a temperatura e o espectro de emissão da superfície, o espectro de radiação emitida pode ser computado. Os comprimentos de onda e a intensidade vão depender da temperatura e quantidade de calor emitido pelo corpo.

Para um determinado comprimento de onda, um bom absorvedor é consequentemente um bom emissor e um bom refletor é um emissor fraco [25].

$$\alpha_{\lambda}(\theta, \phi) = \epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) \quad 05$$

α_{λ} - absorvância de onda eletromagnética com comprimento λ

Onde θ e ϕ são ângulos que definem a dependência direcional da absorvância espectral e da emitância.

3.3-RADIAÇÃO SOLAR

O Sol é a estrela central de nosso sistema solar, distante em média 150 milhões de quilômetros da Terra. Fenômenos de fusão de núcleos de hidrogênio formando núcleos de hélio desprendem imensas quantidade de energia. Com um diâmetro de 1 392 000 Km, seu interior chega a atingir temperatura de 15 000 000 K. Sua superfície atinge a temperatura efetiva de corpo negro de 5762 K, ou seja, emite espectro energético de ondas eletromagnéticas equivalente a emissão de corpo negro nesta temperatura (figura 2) [16,28,30].

Com tamanha energia, o sol emite uma série de ondas eletromagnéticas altamente energéticas, de alta frequência (maiores que o UV), que não penetram a atmosfera da Terra graças ao seu campo magnético [31].

O restante da radiação solar, atravessando a atmosfera terrestre sofre espalhamento (difusão), reflexão, absorção e reemissão ao deparar-se com moléculas de ar, vapor de água, gotas de água das nuvens, partículas sólidas, ozônio. Deste modo, a radiação solar sofre depreciação do espectro até atingir a superfície terrestre. O nível de depreciação vai depender da composição da atmosfera e da dimensão do caminho percorrido pelos raios solares (figura 3) [28,29,30].

A intensidade e o espectro de radiação solar além da atmosfera terrestre, sem sofrer depreciação é estimado, sendo chamado de constante solar. O valor de intensidade de radiação total atualmente adotada é de 1370 W/m^2 . A importância deste valor está na determinação da radiação solar que atinge determinado ponto na superfície terrestre, após atravessar a atmosfera e sofrer depreciação.

Este valor porém não deixa de ser uma aproximação, pois a radiação extra-terrestre sofre variações devido a alterações na própria radiação emitida pelo sol e a variação da distância sol-terra.

A quantidade de energia solar recebida por determinado local vai depender dos seguintes fatores:

- latitude e período do ano
- massa de ar (m)- razão entre a espessura de atmosfera percorrida pela radiação solar direta, sobre a espessura atmosférica para o sol posicionado em zênite.
- umidade do ar
- densidade de nuvens
- partículas sólidas no ar (poluição, areia, cinzas, etc)
- altitude
- reflexão provocada pelo terreno
- concentração de gases na atmosfera

Parte da energia absorvida pelas partículas e moléculas do ar é reemitida sob forma de calor (ondas longas). As radiações simplesmente espalhadas podem atingir a superfície terrestre sem variação em comprimento de ondas, ou com certa modificação, compondo o que se chama de radiação difusa.

A radiação total que atinge a superfície terrestre é a soma então da radiação solar direta (E_D), da radiação difusa da abóbada celeste (E_d) e da radiação refletida pelo solo (E_R) [26]:

$$E = E_D + E_d + E_R$$

06

A distribuição espectral de radiação solar para várias altitudes solares foi determinado por Moon [32]. Por muitos anos é convenção nas indústrias, para determinação de propriedades espectrais ópticas de vidros, o uso da distribuição espectral solar correspondente a altitude solar 30° e $m=2$. [26,34]. Porém a National Fenestration Rating Council recomenda o espectro padrão a massa de ar 1.5 descrito pela ASTM Standard E 891 (1987a) [35].

A distribuição espectral para $m=2$ percorre a faixa de 310 a 2100 nm sendo 3% da radiação total pertencente a região do ultra-violeta, 53% a região visível e 44% pertencente ao infra-vermelho [34].

3.3.4- Radiações do Espectro Solar

A radiação solar chega a superfície terrestre composta de faixas ultravioleta, visível e infravermelha, responsáveis por estímulos diversos na natureza terrestre e aos quais deveríamos ter conhecimento.

FIGURA 03: Distribuição de irradiação solar para massas de ar iguais a 0, 1, 4, 7 e 10, assumindo-se atmosfera muito limpa com 20mm de vapor d'água precipitável e 3,4mm de ozônio [29].

3.3.4.5- Ultravioleta

Radiações muito energéticas com efeito bactericida e mutagênico. Graças a barreira completa estabelecida pelo ozônio para radiações ultra violeta com comprimentos de onda menores que 290 nm, estamos protegidos das alterações

orgânicas que provocam nos organismos vivos. A proteção estabelecida pelo ozônio decresce acima de 290nm e é nulo acima de 350 μm , evitando a esterificação em massa do Planeta, tal o poder biocida desta radiação [36].

Também possuem a propriedade de ativar a criação de vitamina D (290-320nm), que combate o raquitismo contribuindo para a fixação de cálcio nos ossos, além de facilitar o equilíbrio entre o teor de fósforo e cálcio no sangue. A faixa espectral entre 280 e 320nm, com pico em 296nm desenvolve eritemas e queimaduras da pele. O bronzeamento da pele decorre do estímulo de pigmentos por radiações entre 320 e 400nm [37]. Provocam desbotamento de tecidos, plásticos e alguns pigmentos.

Cabe destacar a consequência estabelecida pela emissão de gases CFC e derivados, utilizados em equipamentos de refrigeração, na destruição da camada de ozônio. O escudo natural que nos protege de radiações letais a vida está ameaçado.

3.3.4.6- Visível

Nossos olhos possuem células foto-sensíveis a ondas eletromagnéticas compreendidas na região entre 380 e 780 nm que permitem-nos o sentido de visão[29]. É impossível visualizarmos radiações fora desta faixa, também é responsável pela fotossíntese nas plantas [25, 37]. Esta faixa de radiação é portanto responsável pela iluminação, comentada no item 3. Por praticidade, a denominação luz será utilizada várias vezes no texto referindo-se a esta faixa espectral.

3.3.4.6-Infra-Vermelho

Radiação característica de calor (780-30000 nm). É a radiação que desprezariamos sob irradiação direta em períodos climáticos quentes e desejaríamos em períodos frios. A região do infra vermelho do espectro solar sofre absorção por vapor de água e CO_2 [37].

CAPÍTULO 2

As seções apresentadas neste capítulo integra parte dos conhecimentos apresentados anteriormente, ou seja, a energia radioativa solar, ao objeto, neste caso, vidros. O meio pelo qual os fenômenos de transporte de energia solar ocorrem nos vidros através dos processos de transmissão de radiação e as contribuições adicionais de condução, convecção serão introduzidos. Os efeitos finais da radiação solar sobre vidraças no interior do edifício, como o desenvolvimento de uma equação básica de ganho de calor e princípios de iluminação natural e conforto visual, são encarados como princípios primários para determinação de projetos de áreas envidraçadas.

1. FINALIDADE DAS JANELAS

Janela refere-se a qualquer abertura envidraçada num envelope construído. São de extrema importância, pois satisfazem a comunicação visual humana com o mundo exterior, admitem radiação solar promovendo iluminação e aquecimento internos, permitem perda de calor, bem como a penetração de ar vindo do exterior. Funcionam como saídas de emergência e melhoram a aparência externa e interna do edifício.

Ao analisar o consumo de energia do setor imobiliário, atenção deve ser dirigida para as janelas do edifício, pois é através delas que ocorrem as transferências energéticas mais significativas.

A janela pode ser pensada como uma luminária, porém as características ópticas diversas dos vidros disponíveis no mercado implicam em respostas diversas. As janelas também são fontes de perda e ganho de calor, ou seja, transmitem quantidade de calor por tempo, que deve ser considerada para dimensionar o projeto [25].

Para seleção da janela num projeto, o arquiteto deve considerar os seguintes fatores:

- **Arquitetônico**- identificando as opções de desenho associados ao clima local e sintetizando aquelas que assegurem conservação energética da construção;
- **Térmica**- projetando as perdas e ganhos de calor de modo a obter-se uma

condição térmica confortável e econômica;

- **Econômica**- avaliando inicialmente custos e vida útil para as alternativas de janelas;
- **Necessidade humana**- determinando o desejo psicológico ou físico da janela e as normas de iluminação apropriadas para o uso do local, conforto e aceitação do usuário.

As áreas envidraçadas afetam o uso de energia no edifício por quatro mecanismos básicos: transferência de calor, ganho solar de calor, vazamento de ar e iluminação natural. Estes mecanismos determinam o consumo energético pelas necessidades de aquecimento, resfriamento e iluminação artificiais.

O efeito resultante total do sistema de janelas vai depender:

- das características de orientação e abertura das janelas;
- das condições de clima e radiação solares locais;
- da operação dos sistemas térmicos do edifício;
- das propriedades físicas do sistema envidraçado e dos caixilhos;
- dos sistemas de sombreamento.
- das características reflexivas do entorno.

O projeto das janelas podem minimizar o consumo de energia na construção:

- Utilizando iluminação natural com eficiência;
- Permitindo ganho térmico de calor durante o inverno;
- Rejeitando radiação térmica durante os períodos quentes;
- Isolando vidraças contra vazamentos de ar e alta condutividade térmica;
- Dispondo-as em posições que promovam ventilação.

2. FLUXO DE ENERGIA EM JANELAS

A compreensão dos fenômenos de fluxo de energia através da vidraça, fornece ao profissional a habilidade de projetar racionalmente, evitando erros comuns, porém inadmissíveis do ponto de vista de conforto térmico, conforto visual e eficiência energética. Estima-se as trocas de energia com o conhecimento dos parâmetros

das condições ambientais e as propriedades térmicas e ópticas do vidro. Para resolver-se os problemas é necessário a aproximação através de premissas e idealizações a partir da compreensão dos fenômenos físicos em questão.

Trocas térmicas e luminosas se processam em decorrência dos processos radioativos, condutivos e convectivos. Radiação foi definida previamente no item 3.1 do capítulo 1 a fim de compreender-se o Sol e sua emissão espectral, cuja importância é primordial nos processos de troca térmica em janelas. Sendo a transparência óptica a principal característica dos vidros, trataremos de tal propriedade no tópico seguinte.

Os itens 2.2.1 e 2.2.2 atenderão a descrições breves dos fenômenos de trocas térmicas restantes, convecção e condução, dependentes de meios materiais para propagação de fluxo de calor. Os fenômenos de condução e convecção também assumem seu papel nos vidros e são responsáveis inteiramente pelos processos de troca térmica em caixilhos e armações. Estes elementos são opacos a radiação solar e a transferência de calor somente se processará através de meios materiais.

2.1- PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS VIDROS

2.1.1- Absorção, Reflexão e Transmissão de Radiação [26]

Quando a radiação solar- incluindo raios diretos do sol ou difusos pelos céu, nuvens e meio ambiente- incide na superfície de uma vidraça, parte desta energia é transmitida através dela e o restante sofre reflexão e absorção pelo vidro e seus recobrimentos. A transmissão ocorre se o corpo é transparente para determinado comprimento de onda.

A relação entre as energias transmitidas, refletidas e absorvidas está descrita pela equação 7:

$$E_o = E_\tau + E_p + E_\alpha$$

07

E_o - intensidade de energia incidente na superfície da vidraça

E_τ - intensidade de energia que se transmite através do material

E_{α} - intensidade de energia absorvida

E_{ρ} - intensidade de energia refletida

A figura 4 ilustra dentre os demais fenômenos de trocas térmicas que ocorrem no vidro, os fenômenos de transmissão, reflexão e absorção.

FIGURA 04: Fenômenos de trocas térmicas ocorrentes em vidros sob incidência solar e variação de temperatura entre o exterior (T_o) e o interior (T_i) de uma edificação.

Transmissividade (τ), Reflectividade (ρ) e Absortividade (α) são propriedades relativas ao material e representam a fração de energia que é transmitida, refletida e absorvida. Entretanto, estas relações dependem da radiação incidente na superfície, que pode ter distribuições variáveis a respeito da direção da incidência e da escala de comprimento de onda.

A soma destas frações é igual a unidade descrita pela equação 08:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

08

Como foi demonstrado anteriormente, a radiação solar que atinge a superfície

da Terra é composta por um espectro com ondas que variam em intensidade de 290 a 2500nm. Portanto quando medir-se uma ou mais propriedades ópticas, a distribuição de comprimento de onda e a direção da radiação incidente deve ser especificada.

As propriedades ópticas solares dos vidros são a transmissividade, reflectividade e absorptividade totais do vidro sob uma radiação solar incidente. Se as propriedades ópticas espectrais (α_λ , ρ_λ , τ_λ) do vidro e a irradiação espectral E_λ incidente no vidro são conhecidas, as propriedades ópticas solares podem ser calculadas pela equação 9 onde q representa α , ρ , ou τ .

$$q_e = (\int_0^\infty q_\lambda E_\lambda d\lambda) / (\int_0^\infty E_\lambda d\lambda) \quad 09$$

Muitos vidros não possuem seletividade espectral marcante sob o espectro solar, então as propriedades ópticas espectrais podem ser consideradas constantes. A radiação transmitida pode ser obtida simplesmente através da multiplicação da radiação espectral incidente E_o pela transmitância τ característica deste vidro (eq. 10).

$$E_t = E_o \cdot \tau \quad 10$$

Para vidros que não possuem transmitâncias espectrais (τ_λ) uniformes, a irradiação total transmitida através do vidro é calculada pela equação 11:

$$E_t = \int \tau_\lambda E_\lambda d\lambda \quad 11$$

Cada faixa de radiação solar e ainda comprimentos de onda específicos estão relacionados às distintas propriedades benéficas ou nocivas, que devem ser acolhidas ou amenizadas.

Baseando-se nos dados obtidos pelas curvas de transmissão, obtêm-se o coeficiente de transmissão relativo a qualquer radiação desejada. Assim as integrais podem ser tomadas para cada região do espectro solar. Podemos então, avaliar qual a transmissão de determinado vidro para as regiões do ultravioleta, visível e infravermelho exposto à incidência solar.

Normalmente utiliza-se as propriedades vidro transparente comum de 3 mm como padrão para comparação das propriedades dos demais vidros existentes para arquitetura. A figura 11 compara as curvas de transmissão de vidros coloridos com o vidro transparente.

2.1.2- Variação no espectro de transmissão dos vidros

As magnitudes relativas de α , ρ e τ dependem do material, da sua espessura, do seu acabamento superficial e a da direção e comprimento de onda da radiação incidente.

Lambert estabeleceu que a fração perdida na intensidade da radiação, ao atravessar um material transparente, é proporcional a espessura deste material. Beer determinou que a porção de radiação, transmitida através do material, decresce com o aumento da concentração de agentes absorventes presentes no material. A lei de Lambert-Beer resultou da combinação destas relações [38]:

$$E_t = E_o \exp (-\alpha. C. x) \quad 12$$

C- concentração de agente absorvente de radiação

x- distância óptica do material atravessada pela radiação

α - absorbância

2.1.2.1- Efeito Estufa

Os vidros possuem uma determinada faixa de transparência, cuja transparência total máxima possível abrange radiações de 150 a 5000nm. Vidros de sílica fundida puros absorvem toda radiação ultravioleta abaixo de 153nm [25]. A medida que se aumenta a concentração de metais na composição do vidro, a faixa de transparência se estreita. Por exemplo, íons de ferro induzem significante absorção de ultravioleta e infravermelho e ao atingir determinada concentração, passam a absorver inclusive na faixa da radiação visível, provocando o efeito de coloração.

Alguns materiais transparentes são coloridos pela combinação dos

comprimentos de ondas transmitidos e ausência dos que foram absorvidos na região da radiação visível.

Vidros de janela comuns, transparentes ou coloridos, possuem geralmente limites de transparência aproximadamente entre os valores de 310nm e 4000nm.

Os vidros para arquitetura são portanto, opacos para radiações de longos comprimentos de onda, equivalentes as radiações emitidas por corpos a temperaturas menores que 120°C [25].

Radiações de curto comprimento de onda, como as relativas ao espectro solar, são transmitidas para o interior da construção através de vidraças e absorvidas por superfícies e corpos do interior, sendo posteriormente reirradiadas como calor radiante. O calor por elas emitido é de baixa temperatura, baixa energia e longos comprimentos de onda, sendo o vidro opaco. Deste modo, o calor emitido pelas superfícies internas das construção, não é transmitido para o exterior. Este calor aprisionado aumenta a temperatura do ambiente interno. Tal fenômeno denomina-se efeito estufa.

Radiações de ondas longas são absorvidas pelo vidro e emitidas para as faces voltadas ao exterior e interior do edifício, cujo caracter do fluxo energético depende :

- dos coeficientes de película nas faces voltadas ao exterior e interior;
- da condutividade térmica do vidro;
- das emissividades das faces do vidro;
- das temperaturas interna e externa..

Toda energia de fluxo radiante do espectro solar torna-se calor quando absorvida, incluindo a porção visível do espectro solar. Denomina-se **ganho térmico** toda energia radiante solar absorvida pelo interior do edifício. Porém este ganho térmico pode ser reduzido se a radiação for refletida pela janela ou por sombreamentos [28].

Se não há proteção de vidraças voltadas para o leste e oeste, ou mesmo em determinadas épocas do ano, dependendo da latitude do local, a proteção das janelas voltadas ao norte e ao sul, ocorrerão altos ganhos de calor solar por incidência solar direta e conseqüente aumento de temperatura internos.

2.1.2.2-Ângulo de incidência de Radiação e Reflexão

Ao sair do ar e entrar no vidro, a luz sofre um decréscimo de sua velocidade. Isto causa uma mudança de direção no raio de luz na interface, fenômeno chamado de refração. O índice de refração de um material é definido portanto, como sendo a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) pela velocidade que possui ao atravessar este material (v) [44,45].

$$n=(c/v)$$

13

Figura 05: Com o aumento do ângulo de incidência da radiação a partir do zero (normal ao vidro), a transmitância se reduz, a reflectância se acresce e a absorbância inicialmente amplia-se devido ao aumento do caminho óptico e depois declina-se por predominar o aumento na reflectância. Curvas executado em vidro típicos não recobertos transparente (A), duplo transparente (B) e absorvente (C) [28].

Esta flexão do raio de luz pode ser tal que, dependendo do ângulo em que a radiação incide no material, chega a ser refletido. A medida que aumenta-se o ângulo de incidência de luz com a normal da superfície em que incide, aumenta-se a proporção de raios refletidos. Ao sair do material, a luz sofre refração na interface e portanto, pode ocorrer também a reflexão de uma porcentagem de luz [41]. A figura 2 ilustra raio refletido pela superfície do vidro e raio que se refrata através da interface ar-vidro, corpo de vidro e interface vidro-ar, resultando em transmissão.

A figura 5 representa curvas de transmissão, reflexão e absorção variando com o ângulo de incidência da radiação.

O fenômeno de reflexão pode ocorrer de forma difusa ou regular. Um espelho, ou melhor, uma superfície lisa reflete a radiação com o mesmo ângulo que incidiu. Superfícies com irregularidades maiores que os comprimentos de onda incidentes, refletirão os raios de forma a espalhá-los para todas as direções.

FIGURA 06: Representação de radiação refletida difusamente por superfície irregular.

Para radiações difusas solares as propriedades seriam aproximadas da radiação direta quando o ângulo de incidência é 60° [28].

2.2- TROCAS DE CALOR POR MEIOS MATERIAIS

2.2.1- Condução

Inicialmente relacionamos a temperatura à intensidade de vibração molecular ou atômica, ou seja, o aumento da temperatura implica no acréscimo vibracional das moléculas. O processo de condução de calor é desencadeado pela diferença de temperatura entre dois pontos distintos num material sólido.

Uma molécula A em vibração mais intensa, acumula mais energia que a molécula B vizinha, numa vibração menos intensa, causando uma situação de desequilíbrio energético. Espontaneamente, na busca do equilíbrio, parte da

energia é transferida da molécula A para B, intensificando a vibração de B com conseqüente aumento de sua temperatura.

Para que o calor se transfira por condução, além do gradiente de temperatura é necessário o meio material. Porém, há materiais que permitem a condução de calor mais rápida e em maior intensidade que outros, ou seja, estes materiais possuem condutividades térmicas mais elevadas, ou resistividades térmicas menores.

Em 1822, Fourier definiu que o fluxo de calor transferido por condução (q_k) através de um material é igual ao produto entre a condutividade térmica (K) do material em questão, a área (A) da seção transversal pela qual o calor atravessa (perpendicular ao fluxo), e a variação infinitesimal de temperatura através do eixo do fluxo (dT/dx) [23,24,27]:

$$q_k = - KA(dT/dx) \quad 14$$

K- condutividade térmica (W/ m.K)

A- área transversal (m^2)

(dT/dx)- K/ m

2.2.2-Convecção:

O processo de transferência de calor por convecção é causado pela a transferência de calor de uma superfície para um fluido, provocando transporte de massa, ou seja, de fluido. A força motriz para desencadeamento do processo é a diferença de temperatura entre a superfície em questão e o fluido adjacente.

Supondo que a superfície de um vidro de área (A) transfira calor para um fluido adjacente (líquido ou gás). A temperatura do fluido adjacente ao vidro eleva-se pelo aumento da vibração molecular, causando expansão do gás e conseqüente deslocamento. O fenômeno depende então de meios materiais para se proceder.

A transmissão de calor por convecção entre a superfície e o fluido pode ser calculada pela equação 15 [23,24,27]:

$$q_c = A.h_c.\Delta T \quad 15$$

A- área de transmissão de calor (m^2)

h_c - coeficiente de película médio ou condutância convectiva média ou coeficiente de transmissão de calor de superfície ou ainda coeficiente de transmissão de calor convectiva ($W/m^2.K$)

ΔT - variação de temperatura entre a superfície e o fluido (K)

Esta relação tem sido usada desde 1701, quando foi idealizada por Isaac Newton, ainda que seja uma definição de h_c e não uma lei fenomenológica de convecção. A avaliação do coeficiente de película é bastante complexo e vai variar com:

- as propriedades térmicas do fluido;
- a velocidade do fluido sobre a superfície;
- a geometria da superfície;
- o gradiente de temperatura..

2.3-Definição de equação básica de troca térmica em janelas [25]

A troca de energia através das janelas ocorre em decorrência de:

- **Transferências de calor condutivas e convectivas:** entre o vidro e os ambientes a que está exposto, causadas por diferença de temperatura. Esta classe também inclui o processo transferência de energia absorvida pela vidraça ;
- **Trocas radioativas de ondas longas:** (acima de 2500nm) entre a superfície externa e interna do vidro e o céu, chão ou outros objetos.
- **Ganho de radiação de ondas curtas:** (abaixo de 2500nm) incidentes no vidro vindas do céu ou refletidas pelo chão ou outros objetos.

Em decorrência destas observações, chega-se a uma equação básica de fluxo de energia por unidade de área de vidro de janela com placa única, como sendo:

$$\begin{array}{l} \text{Calor Total} \\ \text{Admitido} \\ \text{pela vidraça} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Radiação} \\ \text{transmitida} \\ \text{pela vidraça} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Fluxo interno de} \\ \text{radiação absorvida} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Fluxo de Calor} \\ \text{devido ao} \\ \text{gradiente de} \\ \text{temperatura} \end{array}$$

Ou

$$q = E_o \tau + N_i (\alpha E_o) + U (T_o + T_i) \quad 16$$

ou

$$q = E_o (\tau + N_i \alpha) + U (T_o + T_i) \quad 17$$

E_o – radiação total incidente;

$N_i = U / h_o$

h_o - coeficiente de película médio externo;

U – Fator U ou coeficiente de transferência de calor total;

T_o – temperatura do ar externa;

T_i – temperatura do ar interna;

A fração (N_i) de radiação absorvida pelo vidro que flui para o interior depende:

- do coeficiente de película das camadas de ar adjacentes as faces do vidro;
- da condutividade térmica do vidro.

Ao considerar o ganho solar transmitido diretamente para o ambiente interno (equação 18), admite-se E_o como sendo a radiação solar incidente diretamente.

$$q_s = E_o (\tau + N_i \alpha) \quad 18$$

Conforme observações feitas no índice 2.1.1, estes cálculos devem considerar a seletividade espectral do vidro a ser analisado. É possível analisar o ganho solar relativo a cada região do espectro solar, como as faixas ultravioleta, visível e infravermelho. Para isto, considera-se a radiação incidente relativa à faixa a ser avaliada e à transmissão espectral do vidro intrínseca a tal região.

2.3.1-Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC)

Na equação 18, a porção apresentada entre parênteses é chamado de coeficiente de ganho de calor solar. É a fração de irradiação incidente no vidro que penetra o ambiente interno através da janela como ganho solar, sendo tanto a radiação diretamente transmitida como a porção absorvida pelo vidro e depois emitida para interior. Tal coeficiente é utilizado para determinar o ganho solar para janelas [28,47]. O SHGC é função do ângulo e da distribuição espectral da radiação incidente.

2.3.2-Coeficiente de Sombreamento (SC)

Definido como a razão entre o ganho de calor solar do vidro em questão pelo ganho de calor do vidro referência padrão (2,6), irradiado da mesma maneira e sob as mesmas condições atmosferas. O vidro padrão normalmente adotado é o transparente comum de 3 mm. Este índice não é dependente do ângulo de incidência da radiação [42].

$$SC = [(SHGC)_{test} / (SHGC)_{padr\tilde{a}o}]$$

19

As indústrias de vidro tem usado este conceito para parametrização de seus vidros, mas a tendência é substituí-lo por SHGC simplesmente pois se relaciona ao vidro e ao ângulo de incidência da radiação [28]. Programas de computadores são usados atualmente para simular a performance energética do edifício em cada hora, com valores de SHGC dependentes do ângulo de incidência [43].

É importante ressaltar que tais parâmetros (SC e SHGC) não são completos para determinar o vidro mais apropriado do ponto de vista energético, pois tal desempenho, além da avaliação térmica, depende da análise de iluminação natural proporcionado pelo vidro. Portanto deve-se exigir a associação de transmissividade de luz visível à tais parâmetros para análise do produto.

2.3.3-Fator U

Relativo a condutividade do material e a taxa de retirada de calor das superfícies do vidro (convecção). Se refere a uma porção muito pequena do ganho térmico de calor quando ocorre incidência solar direta sobre o vidro. Como o transporte de calor por ondas longas através do vidro depende dos processos condutivos e convectivos, o fator U é determinante para perda de calor do edifício durante o inverno. Quanto menor o fator U, maior é a resistência térmica do sistema e portanto, mais isolado termicamente [43].

3. ILUMINAÇÃO NATURAL

3.1- A LUZ DO SOL E O HOMEM

A evolução do homem desenvolveu-se na quase totalidade de sua história, sob o abraço luminoso do sol. A luz artificial, como tochas por exemplo, era usada somente para dissipar algo do escuro da noite. O homem construía seus edifícios de modo a permitir a penetração de luz natural nos ambientes internos.

No século XX e principalmente após o advento da lâmpada fluorescente e dos sistemas de refrigeração, o homem - com desprezo à consciência ambiental, energética e tradições antigas de iluminação natural - passa a ignorar os conceitos de luz e calor solar em suas construções.

Atualmente, grande parte da população passa o dia sob a iluminação promovida por lâmpadas artificiais e respirando o ar resfriado por ar condicionado.

A figura 07 compara o espectro solar com a curva de sensibilidade eletromagnética dos olhos. Nota-se que a curva de percepção visual dos olhos adapta-se muito bem a luz visível solar. Como a evolução decorreu-se em sua maioria temporal sob iluminação natural, os olhos - por processo de adaptação natural – respondem perfeitamente ao espectro visível solar.

A luz natural, além de proporcionar o melhor comportamento visual, também regula processos metabólicos e exerce influência no estado imunológico do homem. A carência de luz natural afeta o estado psicológico e emocional do indivíduo [45].

A luz solar esta envolvida na regulação de nosso relógio biológico e ritmos

associados. A falta de luz solar por longos períodos, pode causar letargia e depressão, como manifestado nas pessoas que vivem nos pólos do planeta [48]. O arquiteto deve estar, portanto atento para que, em áreas de longa permanência, não falte iluminação natural suficiente para bom desempenho das funções fisiológicas e psicológicas.

Promover o uso de luz natural tem grandes vantagens [45]:

- Regula as atividades fisiológicas e psicológicas dos ocupantes do edifício
- Aumenta a eficiência no trabalho e bem estar das pessoas
- Influencia a riqueza visual do edifício
- É ecológica por economiza luz artificial, e evitando os ganhos térmicos, reduz-se o auxílio de condicionadores de ar, diminuindo o volume de CFC e derivados em risco de emissão.

FIGURA 07: Curva de irradiação solar associada a curva de sensibilidade visual dos olhos humanos [45].

Para projetar priorizando-se a iluminação natural, deve-se respeitar, além dos ganhos de energia que a edificação possa sofrer, as necessidades visuais do homem. Deve-se integrar aproximações perceptivas, parâmetros físicos, engenharia e adicionar a forte contribuição do avanço no campo dos materiais.

Na fase de execução do projeto é de fundamental importância observar características que influenciam na luminosidade, como [18,49,50]:

- As superfícies do solo e suas reflectâncias, associadas a texturas e cores;
- As superfícies verticais vizinhas;
- Geometria, posição e orientação das janelas;
- Geometria do envelope;
- Características das superfícies externas.

É extremamente complicado o controle dos efeitos de iluminação solar direta. Uma boa alternativa é aproveitar-se do fenômeno de reflexão para promoção de boa iluminação natural. Reflexões promovidas por superfícies externas relativas ou não ao edifício em questão, quando bem analisadas pela geometria da óptica, podem enviar iluminação natural para determinadas áreas internas.

O conjunto de ingredientes, com doses respeitadas, resultam num produto final de grande eficiência energética aliado a satisfação e conforto do usuário.

3.2- LUZ E VISÃO

O ambiente luminoso promove para o homem a recepção de mensagens visuais. Esta comunicação se torna mais eficiente a medida que as condições luminosas se ajustam ao comportamento da visão, promovendo portanto maior conforto visual.

Ao conforto visual associa-se também a estética do ambiente, o que segundo a ergonomia e psicologia ambiental, melhora a performance produtiva das pessoas no local.

Nossa percepção visual é então o membro mais importante de ligação entre o mundo externo e os processos cognitivos desenvolvidos no interior do nosso cérebro. Os processos cognitivos referem-se todas as atividades de raciocínio, desde criatividade à resolução de problemas[45].

3.2.1-Acuidade Visual

Acuidade visual significa precisão da visão, medida pela menor dimensão de detalhe. Descreve a visibilidade de detalhes finos envolvendo vários tipos de apresentações visuais.

A acuidade visual varia com o tempo de exposição e iluminação na execução de determinada tarefa visual. A figura 08 relaciona graficamente a intensidade luminosa incidindo em determinada tarefa e a acuidade visual decorrente para campos visuais diversos.

A iluminação deve estar adaptada para as diversas tarefas visuais, dependendo de sua dimensão física. Isto quer dizer que tarefas minuciosas, como bordados delicados ou cirurgia, exigem maior iluminação para alcançar acuidade visual adequada, que tarefas grosseiras, como cozinhar. A norma ABNT NBR5413 (ABR 1992) [46] estabelece valores de iluminância para diversas atividades em setores comerciais, ensino, indústria, entre outras.

Figura 08: Relação da acuidade visual, para diversos ângulos sólidos do campo visual, com luminância [50].

A acuidade visual decresce com o avanço da idade a partir dos 20 anos. Olhos idosos tem menor acuidade devido ao amarelamento das lentes, e maior absorção e espalhamento de luz. Com o aumento da idade, é necessário, maior tempo de adaptação, níveis mais elevados de iluminação e ótimo contraste da tarefa visual para alcançar a melhor performance visual.

FIGURA 09: Variação da performance visual com relação a intensidade luminosa para pessoas de idades diferentes [45].

3.2.2-Acomodação

A acomodação é um processo importante que se refere a habilidade do olho focar consecutivamente objetos em distâncias variadas. O cristalino muda de formato para que a retina possa receber luz de uma distância para outra. [47]

3.2.3- Adaptação [47]

A precisão na determinação da luminosidade promovida pelas lâmpadas, gera segurança aos arquitetos e engenheiros pela facilidade da previsão de seus resultados.

A luz solar que atinge a superfície terrestre varia constantemente em luminosidade. Ao projetar com luz natural, determinando tamanho e posição das aberturas, é possível prever a *proporção* de luz natural que penetrará no interior do edifício e não a intensidade exata de luminosidade.

A alta variabilidade da intensidade de luz natural gera insegurança ao projetar, porém este não é um empecilho real. A realidade é o processo de adaptação dos olhos. A medida que a intensidade luminosa se modifica, o diâmetro da pupila - com alta velocidade de variação e controlado pela íris - regula a quantidade de luz admitida. Simultaneamente há variação da sensibilidade da retina.

Como exemplo desta realidade, observemos que inclusive fotógrafos altamente experientes são incapazes de prever através da visão, a quantidade de luz natural presente para que possam obter os resultados desejados. Nesta determinação utilizam fotômetros. Nossos olhos não percebem as variações de luz como fotômetros e filmes fotográficos altamente sensíveis às variações de intensidade luminosa.

Variações lentas, gradativas e proporcionais de iluminação entre o exterior e interior da edificação, não nos prejudicam, pois adaptamo-nos facilmente. Porém, variações bruscas e rápidas, repetitivas, causam desconforto visual. Uma razão de desconforto visual gerado por contraste luminoso pode ser verificado através de variações repetidas no olhar entre o céu luminoso aparente na janela e a mesa de trabalho no interior de um cômodo.

3.3.4- Contraste

A tarefa básica visual derivada da detecção do contraste, da qual derivam-se todos os outros comportamentos visuais. Podemos dizer que vemos por contraste. O sistema visual não capta boas informações quando a retina é iluminada uniformemente, mas é extremamente especializada em contraste e gradientes no campo visual. Este processo é denominado contraste sensitivo.

A percepção visual humana é baseada na existência de contrastes entre luz e sombras e contrastes de cor. A captação de regiões com aspectos diferentes no campo visual ou sucessivos- como contraste de luminosidade, cores e movimento- são de grande acuidade.

3.3.5-Contraste luminoso no Campo Visual ou Ofuscamento

Quando expomos os nossos olhos a um determinado campo visual composto por regiões com luminosidades diferentes, o olho se adapta a média da luminosidade destas regiões. Portanto, a partir de um determinado limite de gradiente luminoso, nossa acuidade visual começa a ser prejudicada, principalmente nas regiões mais escuras. Embora adaptando-se a um notável gradiente de iluminação, vivencia-se a sensação de desconforto visual.

É tipicamente causado por lâmpadas, janelas ou superfícies que apresentam-se muito iluminadas com relação ao entorno.

Atitudes devem ser tomadas durante o projeto objetivando contornar o alto contraste luminoso. Diminuir o gradiente de luminosidade entre as aberturas e as superfícies adjacentes é garantir conforto visual.

O conforto visual deve ser compreendido como eficiência na interpretação de informações visuais e não de sensações. Portanto a informação deve ser o foco. Qualquer coisa que interfira no foco do objeto é considerado ruído visual. Portanto deve-se iluminar o que queremos ver, seja determinada tarefa ou uma agradável área de descanso visual.

Padecimentos visuais gerados por tarefas visualmente difíceis surgidas por iluminação deficiente, ou por características inerentes a tarefa, ocasionam sintomas temporários, que desaparecem após descanso. As reações são fatiga e irritabilidade dos olhos, e dor de cabeça. Sintomas temporários são causados portanto por baixa ou excessiva luminosidade no campo visual, porém sobre expor os olhos a luz excessiva causa danos permanentes.

3.3- CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA PROJETOS DE ÁREAS ENVIDRAÇADAS

Sob o aspecto de iluminação de superfície plana horizontal, a janela deve [45,47]:

- Maximizar a transmissão de luz por unidade de área de vidro;
- Controlar a penetração de luz solar direta na superfície de trabalho;
- Minimizar a redução por cosseno da iluminância da superfície de trabalho resultando na alta localização da janela;
- Controlar o contraste de brilho dentro do campo visual dos ocupantes, especialmente entre a janela e as superfícies do entorno no cômodo;
- Minimizar as reflexões luminosas em superfícies de trabalho;
- Minimizar o ganho térmico durante as estações quentes;
- Minimizar as perdas e ganhos condutivos.

Estes objetivos são contraditórios em alguns momentos e sua importância

depende da orientação do edifício, latitude, hora do dia, estações do ano, uso pelos ocupantes, carga térmica do edifício.

Sob esta complexidade associam-se ainda tanto o tipo de vidro quanto a geometria da janela (inclinação e orientação da vidraça, escudo de proteção de luz solar direta e refletores). Os objetivos de controle de luz solar direta e ganho térmico solar implicam em diferentes configurações para cada orientação devido ao movimento diário e anual do sol.

3.3.1-Localização

A localização da janela no interior afeta a qualidade e quantidade da iluminação através dos itens abaixo[45,47].

3.3.1.1- Efeito Coseno

Fonte de luz normal ao plano de trabalho contribui com mais iluminação que fonte oblíqua ao plano. Para planos de trabalhos horizontais, aberturas no forro causam maior iluminação se comparável com janelas laterais na mesma distância. A intensidade de iluminação num plano é reduzido pelo coseno do ângulo de incidência. Figura 10 ilustra janelas normal e oblíqua ao plano de trabalho.

3.3.1.2-Reflexões em planos de trabalho

Superfícies brilhantes, como as de revistas , podem criar reflexões ofuscando a visão se a fonte de luz está posicionada dentro do campo de visão de reflexão do observador, com prejuízo à tarefa visual.

A visibilidade da impressão na página aumenta com a iluminação da página e tal reflexão da fonte aumenta com a luminosidade concentrada da fonte. Portanto, distribuir fonte com boa luminosidade, além de aumentar a visibilidade da tarefa, reduz o problema de reflexão luminosa. Apesar das aberturas transparentes a luz quando dispostas no alto aumentarem o grau de iluminação, elas também produzem mais reflexões em planos de trabalho de alta refletividade.

FIGURA 10: Esquema ilustrativo do fenômeno de redução da intensidade de iluminação de um plano de acordo com o ângulo que apresenta com relação a normal de uma superfície de trabalho[47].

3.3.1.3-Brilho da fonte

Janelas de grandes áreas parecem ser muito luminosas e brilhantes devido a alta luminosidade do ambiente exterior (céu e luz do sol refletidas em superfícies exteriores). Se a posição da janela é baixa com relação ao campo visual, isto pode ser fonte de ofuscamento visual. O ofuscamento direto resulta de alta luminosidade ou fontes de luz sem escudos dentro do campo visual.

Em janelas baixas, a fonte agressiva não é geralmente a luz solar direta (que neste caso não penetra profundamente no cômodo) mas áreas exteriores muito brilhantes. Posicionando as janelas o mais alto possível (de preferência 45° ou mais acima da horizontal), o brilho prejudicial ficará acima do campo visual.

Janelas localizadas em regiões mais altas, apesar de diminuir o ofuscamento pelas áreas brilhantes no exterior, aumentam a penetração dos raios solares diretos na profundidade do cômodo, promovendo ofuscamento por reflexão em superfícies internas.

3.3.1.4-Distribuição de iluminação

Devido a iluminação ser uma resposta do tamanho aparente e da redução por coseno, janelas em posições mais elevadas, distribuem melhor a iluminação que janelas localizadas em posições inferiores.

3.3.1.5-Luminosidade do céu e obstruções exteriores

Janelas expostas para parte superior do céu (janelas altas ou no forro) expõe-se a parte mais luminosa do céu encoberto (o zenith é três vezes mais luminoso que o horizonte) e é menos sujeito a obstruções pelo entorno como árvores e edifícios.

3.3.1.6-Contornos atenuados

O contraste de iluminação entre a janela e o entorno é grande se as superfícies adjacentes não são iluminadas. Este contraste é mais extremo quando a abertura está localizada no meio da parede ou forro, longe de qualquer superfície perpendicular que possa servir de refletor. Sob estas condições, a parede ou forro ao redor da abertura são muito escuras e o contraste com a alta luminosidade delas é muito acentuado.

Uso de janelas altas, localizadas na quina das paredes e superfícies refletoras diminuem este efeito.

3.3.1.7-Janelas para visão do exterior

Pelo fato da janela ser localizada no nível dos olhos, pode ocorrer o efeito de ofuscamento visual. Promover a iluminação do entorno e localizar outras janelas pode diminuir este efeito; mas mesmo assim a luminosidade do exterior pode exceder em 10 vezes a luminosidade interna.

O baixo posicionamento das janelas para visão também sofrem o efeito de redução por coseno, diminuindo a eficiência luminosa do plano de trabalho.

Devido a estas razões é vantajoso separar as funções de iluminação com as funções de visualização. Pode-se localizar janelas visuais sem grandes

contribuições com iluminação, ou ainda utilizar vidros mais escuros para reduzir o contraste de luminosidade. Contrariamente, as janelas para iluminação utilizariam vidros transparentes, devendo porém estar atento a ganhos térmicos. O projetista deve estar sempre atento as características ópticas e térmicas dos diversos vidros antes de fazer estas seleções.

CAPÍTULO 3

1. A VIDRAÇA E A ARQUITETURA

O historiador romano Plínio escreveu no século I, uma versão bem curiosa a respeito da descoberta do vidro. Navegantes fenícios por volta do ano 5000 A.C. desembarcaram as margens do Rio Belo, Síria e acenderam fogo próximo a blocos de soda disponíveis como carga do navio. Ao acordarem pela manhã, notaram que o calor havia fundido a soda com a areia, resultando em vidro.

Quanto a lenda, não há como confirmar, mas o fato é que a Síria foi a eminente produtora de vidro no mundo antigo. O Egito, ao dominar a Síria na 18ª Dinastia (1510- 1349 AC), absorveu a técnica de produção de vidro [47].

Durante o Império Romano, a produção do vidro espalhou-se desde suas regiões de origem no Egito e Síria, até as novas fronteiras do império como Alemanha, França e inclusive Inglaterra [48].

Os romanos foram os primeiros a utilizar vidro em suas janelas, em torno do ano de 50 DC. Utilizavam vidros transparentes e coloridos na produção das janelas e vitrais. O calor solar e a adaptação do edifício ao clima eram fatores muito importantes para os arquitetos romanos, como Vitruvius. Ao usarem o vidro como janela, notaram que além de proporcionar a comunicação visual com isolamento do meio externo, era capaz de barrar o calor dentro do ambiente interno da edificação.

Criou-se então, uma variedade de aplicações na arquitetura. A alta sociedade normalmente dispunha de salas solares (heliocaminus) em suas vilas. Estufas produziam frutas e vegetais o ano todo. As versões mais modernas dos balneários romanos possuíam normalmente vidraças voltadas para o pôr do sol de inverno (sudoeste), quando o calor era muito necessário [49].

O método de produção de vidraças era bastante primitivo, a partir da fusão dos elementos constituintes. O fundido era então despejado sobre um plano e puxado com pinças. Os romanos desenvolveram também o método de sopro em moldes, utilizado para impor forma ao fundido.

Com o tempo, os métodos de produção de vidros foram aperfeiçoados, buscando a possibilidade de produzir placas maiores, em maior quantidade e facilidade [53,56,57].

A partir dos anos 50 mestres consagrados da arquitetura moderna como Mies van der Rohe, Walter Gropius, Frank Lloyd Wright, Le Corbusier e outros, mudaram o conceito de vedação e fechamento, tornando o vidro material primário na construção civil [37]. Comum na década de 50 era a construção de edifícios envidraçados, com aproximadamente 60 ou 65% das paredes externas compostas em vidros simples claros ou coloridos [52].

A construção dos primeiros edifícios largamente recobertos por vidros, Lever House e Seagram Building em Nova York (1950), evidenciou as principais propriedades do vidro, transparência a radiações característica do espectro solar e opacidade a ondas longas, ocasionando o efeito estufa [59].

Em 1965, a indústria Saint-Gobain de Pisa inicia produção massiva de vidros através do processo float, produto chamado então de *float-glass* (item 2, capítulo 3). Este processo possibilitou a produção de grandes áreas de vidros de alta qualidade e preços muito competitivos. Construções com grandes áreas envidraçadas passaram, então, a ser bastante comuns em todo o mundo [50,51].

Conceitos tão antigos como os levantados pelos arquitetos romanos foram esquecidos pelos arquitetos modernos, que projetam edificações com imensas áreas envidraçadas sem relevar clima, movimento e radiação solar.

Emergiram problemas marcantes relacionados ao difícil controle térmico e luminoso do ambiente interno. O vidro não só permite a entrada de luz como a sua saída [37]. Ganhos de energia solar causam superaquecimento. Por outro lado, vidraças pouco isoladas termicamente perdem muito calor por condução térmica em estações frias. Projetar edifícios com grandes áreas envidraçadas, aliados ao conforto ambiental e eficiência energética é um grande desafio.

A consciência de conforto ambiental, custo energético, condições climáticas, movimento solar conjugados à orientação das fachadas dos edifícios e as propriedades dos materiais usados nos envelopes, certamente modificariam muitos projetos de arquitetura, evitando então consequências descabidas.

O petróleo como símbolo de fartura energética, acabava por gerar certa displicência com relação à tais fatores. Os problemas gerados pela falta de conhecimento técnico na utilização do vidro foram, então, contornados com a implementação de sistemas elétricos de refrigeração, aquecimento e iluminação.

Após a crise do petróleo em 1970, percebeu-se o risco de escassez de energia e a necessidade de otimizar o consumo. Foi então que iniciou-se a busca pela elaboração de normas e esclarecimentos com o intuito de melhorar a conservação térmica dos edifícios. A indústria vidreira passou a lançar novos produtos com promessas de controlar ganho térmico e perda de calor.

Em países frios, vidros duplos com ar ou gases como argônio e criptônio entre as placas passaram a ser utilizados, com posterior implementação de vidros de baixa emissividade. Isto reduziu a condutividade térmica, mas aumentou o efeito estufa em edifícios envidraçados durante as estações quentes. Então o tratamento do ganho solar tornou-se uma questão mais difícil. Resolveu-se o problema do aquecimento com sistemas de ar condicionado, novamente com alto consumo de energia, equipamentos e agora também com vidraças duplas [53].

Em reação a necessidade de diminuir o ganho térmico solar, os arquitetos passaram a utilizar vidros escuros e refletivos com baixíssimos coeficientes de transmissão. Estes vidros limitam portanto, a entrada de luz visível, tornando-se necessário o incremento de iluminação artificial. Bloqueiam também o ganho térmico em períodos de inverno, gerando novo problema.

Enquanto edifícios tem sido projetados para utilizarem estes vidros, outros arquitetos continuam a utilizar vidros transparentes e coloridos claros para se beneficiarem com a iluminação natural.

Na tentativa de reduzir o consumo energético, muitos escritórios de arquitetura tem trabalhado para diminuir os gastos com sistemas de ar condicionado e iluminação. As medidas utilizadas geralmente para reduzir o consumo consiste em :

- orientar corretamente o edifício;
- utilizar vidros de alta performance com baixo ganho térmico e alta transmissão de luz natural;
- aparelhos de sombreamento solar externos;
- monitoramento e controle automático do ambiente.

A boa orientação do edifício, além de reduzir o desperdício de energia , administra mais efetivamente o orçamento destinado aos custos com envidraçamento.

Hoje, existe na Europa e nos Estados Unidos uma cooperação entre engenheiros e arquitetos de modo a determinar envelopes mais opacos termicamente com a finalidade de reduzir as cargas de aquecimento e resfriamento. Isto ocorreu devido as exigências das normas vigentes nestes países. O engenheiro coopera com o arquiteto para otimizar a utilização de luz natural no edifício, tomando o cuidado ao dimensionar as áreas envidraçadas, para que não decorra a necessidade de resfriamento ou aquecimento. O cuidado de não provocar um consumo de energia para otimização térmica do ambiente em oposição a economia obtida em iluminação deve ser o fator limitante no dimensionamento das áreas envidraçadas.

Busca-se lançar em mercado no futuro, uma série de produtos para fachadas envidraçadas de alto potencial tecnológico, confiáveis e a custos razoáveis. Edifícios inteligentes, com iluminação, sensores, sistemas de refrigeração e aquecimento, propriedades ópticas de fachadas, sombreadores ajustáveis aliados a estratégias de controle baseados em algoritmos previsíveis ou medidos instantaneamente, começam a surgir. O desenvolvimento de tecnologia de envelopes de edifícios com propriedades físicas variáveis gerou novas oportunidades de se atingir significativa economia energética, pico de demanda e custo, com importância de oferecer bem estar aos ocupantes. Tal tecnologia pretende oferecer [53,54,55]:

- vidros com fatores solares variáveis, permitindo o controle de ganho solar de acordo com as mudanças de estações ou alterações climáticas;
- vidros com camadas de cristal líquido com características de transmissão óptica variáveis, capazes de transmitir informações, como um vitral animado;
- vidros aquecíveis e com alta transmissão de luz;
- vidros e caixilhos preenchidos por fluidos, para promover condução térmica variável
- vidros com qualidade de serem facilmente limpos ou auto-limpantes;
- vidros estáveis e resistentes ao fogo e ao frio intenso;
- vidros holográficos;
- vidros anti-refletivos, para usos onde alta transparência é desejada.
- venezianas e sistemas de sombreamento controlados automaticamente;
- controle de ventilação natural através das janelas;
- fachadas fotovoltaicas.

A consciência da limitação das fontes energéticas a nível mundial, traz para a nova geração de arquitetos a responsabilidade moral de projetar edifícios que procurem eficiência de conforto ambiental relativo ao consumo de energia. Gostaria de lembrar que ao enfocar o custo de energia, não refiro-me somente ao capital desperdiçado nas contas de energia, mas sim, em escala muito mais valiosa, ao prejuízo que causamos a nossa casa maior, mãe de todas as formas de vida, à imprescindível Natureza.

2. PROCESSO FLOAT E O AVANÇO NA MANUFATURA DE NOVOS VIDROS [56]

O desenvolvimento do processo float foi de grande avanço para a indústria vidreira e possibilitou a evolução e incorporação de novas técnicas ao processamento.

No processo float, o vidro fundido proveniente do forno é despejado sobre uma superfície de estanho fundido, banho enclausurado em atmosfera controlada. O processo é contínuo e o vidro sobre o banho é mantido em temperaturas altas o suficiente, de modo a assegurar homogeneização do produto como desprendimento de bolhas, além de permitir que as superfícies se tornem planas e paralelas. O produto não apresenta distorções e suas superfícies tem alta qualidade de acabamento. A placa é resfriada enquanto suportada sobre o estanho, até que esteja endurecida o suficiente para ser retirada do banho, sem que se forme marcas de rolos na superfície inferior. Geralmente o vidro entra no banho a 1110°C e sai a 600°C.

Este processo praticamente extinguiu os processos utilizados anteriormente para formação de placas de vidro.

A temperatura, a atmosfera controlada e as propriedades do vidro enquanto flutua sobre o estanho, torna a câmara de float um local apropriado para promoção de reações químicas. Isto possibilita a realização de tratamentos químicos no vidro durante sua moldagem, produzindo então, diversos produtos.

Este processo possibilitou a produção de grandes áreas de vidro de qualidade em alta velocidade e a preços bastante reduzidos, comparados com outros materiais, o que contribuiu para o aumento do uso em edifícios de fachadas envidraçadas.

Devido aos grandes aquecimentos e alta luminosidade (ofuscamento) decorrentes da utilização de vidros transparentes, os fabricantes passaram a buscar

soluções através do desenvolvimento de produtos para controle solar. Estas soluções vieram do seguinte princípio: os vidros transparentes transmitem alta porcentagem de radiação visível e infravermelha; promover reflexão ou absorção destas radiações pelo vidro, diminui a intensidade de radiação diretamente transmitida.

A primeira evolução além dos vidros transparentes, foi o desenvolvimento de vidros float coloridos em placas planas. São fabricados da mesma maneira que os vidros float incolores, porém com incorporação de minerais colorizantes. Pimentos a base de ferro, níquel e selênio são comumente adicionados à composição básica do vidro transparente, resultando nas cores bronze, verde, azul e cinza. Todos estes vidros podem ser temperados ou laminados por motivos de segurança, ou ainda usados em sistemas com uma ou duas placas.

Modificações da composição do fundido para produção de float colorido e reversão para vidro transparente comum representa grande perda de produção. Um novo processo, o Eletrofloat, foi desenvolvido para evitar-se as perdas de processo e melhorar a seletividade espectral solar.

O processo por eletrofloat utiliza-se do banho de float para realizar tratamento eletrolítico, depositando metais sobre a superfície do vidro, com formação de filme. Portanto, o filme passa a ser responsável pelo controle solar.

Surgiram vidros refletidos, produzidos a partir de depósitos feitos durante o banho de float.

2.1- DEPOSIÇÃO QUÍMICA A VAPOR

Depósito contínuo aproveitando a temperatura do banho de float para promover reações químicas. Um equipamento distribui homogeneamente gás silano, que reage com a superfície quente do vidro, produzindo um recobrimento de silício. O vidro passa a ter um aspecto de espelho prateado altamente refletivo. Este filme pode ser depositado sobre um vidro colorido produzindo novas variações de transmissão do vidro. [37] O processo gera depósitos de alta dureza, estabilidade e resistência ao desgaste. Tais vidros recebem a denominação usual de vidros pirolíticos.

Os processos realizados diretamente na linha de produção resultam em longas corridas e produção em larga escala de um único produto. Como o mercado exige uma grande variedade de produtos, com cores diversas e em menor quantidade, a

flexibilidade dos processos fora da linha de produção torna-se importante. Nestes casos placas de vidro são cortadas e levadas para outro setor. Os processos abaixo são executados fora da linha de produção:

2.2-EVAPORAÇÃO E DEPÓSITO A VÁCUO

Enclausura-se a placa de vidro em câmara à vácuo e o metal a ser depositado é aquecido até gaseificar-se. Devido a baixa temperatura da superfície do vidro, o metal condensa-se sobre ele, formando uma fina e uniforme camada refletora. Os metais aplicados sobre placas de vidro (transparente, cinza, verde e bronze) são ouro, prata, cobre e alumínio. O filme depositado é muito delicado e frágil, devendo ser protegido por uma segunda placa de vidro.

2.3- DC DIODE SPUTTERING

As placas de vidros são deslocadas continuamente sobre rolos para dentro de uma câmara de gás e sob a placa do metal a ser depositado (com dimensão igual a do vidro). Os gás utilizados são argônio, oxigênio ou nitrogênio, resultando em filme com metálico, óxido metálico ou nitreto metálico. Alta voltagem é aplicada entre as placas, promovendo a formação de íons positivos a partir do gás presente entre elas. Os íons, sob tais condições, são fortemente arremessados à placa metálica, cuja energia de impacto ejetam átomos do metal que se depositam sobre a superfície do vidro. O filme de óxido, nitreto ou metálico resultante é homogêneo e durável. Câmaras sucessivas podem ser dispostas para depositar diversos filmes. Como exemplo, depósito de aço inoxidável pode ser aplicado sobre o filme de controle solar com a finalidade de proteção. Os vidros planos para arquitetura são refletivos e com cores azul, bronze ou prata .

Desde processo, desenvolveu-se magnetron sputtering deposition, que difere do anterior por gerar conjuntamente na placa metálica forte campo magnético.

3. VARIEDADE DE VIDROS NO MERCADO

Os tipos de vidro são de grande importância em funções de iluminação natural, aquecimento solar e resfriamento condutivo devido as propriedades espectrais e condutivas distintas.

3.1- VIDRO TRANSPARENTE

O vidro transparente tem alta transmissão por todas as porções do espectro solar, com transmitâncias de 39% para UV, 88% na região do visível e 77% de IR para vidro de 4mm. A transmitância total é de 78%. Este vidro é usado como padrão para comparação dos comportamentos espectrofotométricos de outros vidros [37].

Devido a alta transmissão de espectro solar e sua opacidade ao IR de ondas longas, é muito apropriado para armazenar calor. Apresenta ótima visibilidade, inclusive de áreas claras para áreas mais escuras e mantém a fidelidade das cores.

3.2- VIDROS COLORIDOS

São pigmentados para aumentar a absorção no espectro visível e infravermelho, o que causa portanto, um decréscimo de transmitância. As curvas de transmissão para um mesmo tipo de vidro dependerá de sua espessura. Tem menor efeito de ganho térmico que o vidro transparente, porém a radiação absorvida será emitida em forma de calor com parte conduzida ao interior [47].

3.2.1- Vidros Bronze e Cinza

Apresentam espectros bastante similares e transmissões quase lineares entre o visível e infravermelho. Comparados com o padrão, apresentam redução de transmissão em todas as regiões do espectro.

Olhar de regiões escuras para mais claras permite a melhor visualização por este vidro e reduz o contraste de brilho entre a visão pela janela e as superfícies do entorno interno[47].

3.2.2- Vidro verde

Devido ao balanço entre as duas formas iônicas Fe_2O_3 (absorve UV) e FeO (absorve IV) presentes na composição do vidro soda-cal-sílica, o espectro de transmissão deste vidro apresenta grande redução na transmissão de UV e IV quando comparados com o padrão. Por outro lado, apresenta pequeno decréscimo na transmissão de visível [34].

O vidro verde reduz transmissão de infravermelho próximo, sem reduzir em muito a admissão de luz para o interior como pode ser verificado e comparado com os outros tipos citados através da figura 11. Interessante sua aplicação em áreas que aceitam grande quantidade de luz visível, com porém redução de calor IV do espectro solar.

FIGURA 11: Espectro de transmissão de vidro transparente, bronze, cinza e verde [37]

3.3- FILMES REFLETORES

Filmes refletores são criados pela deposição de recobrimentos metálicos na superfície de vidros transparente ou coloridos, produzindo um efeito espelhado. Este tipo de filme usualmente reflete as regiões do visível assim como do infravermelho, com refletividade variando com o ângulo de incidência da radiação em sua superfície. As qualidades espectrais do vidro e do filme se combinam no resultado final da transmissão [47].

3.4- VIDROS LOW-E

Filmes de óxidos metálicos ou semicondutores quase invisíveis são aplicados sobre a superfície do vidro [37]. Filmes low-e são interessantes em climas frios pois permitem a entrada de radiação solar, refletindo porém radiações de ondas longas emitidas pelo interior. São normalmente usados em vidros duplos [38,59].

3.5- VIDROS SELETIVOS ESPECTRALMENTE

Recobrimento aplicado sobre vidro transparente ou colorido permite a entrada de luz visível bloqueando parte da radiação IV solar. É apropriado para reduzir ganhos térmicos solares em localidades de climas quentes [60,61,62].

3.6- JANELAS COM MÚLTIPLAS PLACAS DE VIDRO

A simples adição de mais uma placa de vidro, ou seja, duas placas de vidro com ar entre elas, reduz perda de calor pela metade [25, 63]. Porém, o preenchimento com gases mais viscosos e menos suscetíveis a movimento sob aquecimento, diminui as correntes convectivas entre as placas, diminuindo portanto a transferência de calor por meios materiais. Tais gases utilizados atualmente são argônio e criptônio devido ao custo relativamente baixo, transparência, não toxicidade, estabilidade reativa e por não possuir odor. Além dos gases, três ou quatro placas são usadas, com grande aumento de resistência térmica. Estas janelas são utilizadas em climas frios [64].

4. ALTERNATIVAS PARA CONTROLE SOLAR [71]

Grande dificuldade surge na tentativa de ajustar o conforto interno perante a grande variabilidade das forças ambientais exteriores. Para força ambiental como o sol, a variabilidade ocorre em escalas de tempo diversas:

- segundos ou minutos num dia com nuvens;
- horas sob ciclo diário;
- meses, com a mudança das estações.

A diversidade de vidros planos para arquitetura disponíveis no mercado, resulta em grande variabilidade de transmitância total, propriedades espectrais e direcionais. Porém as seleções resultarão em respostas fixas que provavelmente satisfará alguns requisitos e falhará em outros.

A resposta energética do envelope do edifício vai depender das propriedades energéticas do vidro. Para promover respostas mais vastas o projetista pode utilizar controles dinâmicos. Isto não é nada novo, implementando os vidros com acessórios que podem alterar sua resposta às condições externas e necessidades internas.

Os métodos tradicionais de controle solar consistem em vidros recobertos ou absorventes (citados no item 3), cortinas, brises, toldos, pergolas, elementos vazados. Muitos destes sistemas são controlados manualmente, mais alguns podem ser controlados automaticamente. A maioria dos controles solares serão descritos a seguir:

4.1-SISTEMAS INTERNOS DE CONTROLE SOLAR

Tais sistemas são selecionados normalmente com base na aparência e custo, com atenção insuficiente dada as soluções de controle solar e luminoso. Sistemas operacionais gerenciados por usuários conscientes podem ter boa performance, porém uma vez transmitida e emitida por ondas longas, a radiação é aprisionada no interior. Estudos e observações práticas sugerem que estes sistemas são raramente operáveis de modo a garantir eficiência energética.[9,15,51].

4.2- APARELHOS DE SOMBREAMENTO EXTERNOS FIXOS

Aparelhos como brises, toldos, telas, pérgolas são geralmente utilizados. Estes escudos normalmente impedem a entrada direta da radiação solar, possibilitando certa visão do céu, portanto podendo admitir luz diurna. Geralmente interrompem os raios solares diretos, difundindo-os e atenuando-os, permitindo a entrada da radiação nesta condição. Para obter-se resposta apropriada, é necessário que o projetista associe a orientação destes equipamentos com o movimento solar através das estações do ano.

4.3- SISTEMAS DE CONTROLE SOLAR EXTERIORES E OPERÁVEIS

Deveriam promover melhor desempenho que os sistemas fixos. Incluem-se nesta modalidade os toldos móveis, brises operáveis, pérgolas operáveis, venezianas externas[5,15,51]. Podem ser controlados manualmente ou automaticamente. Controles automáticos com a opção manual são preferíveis, assegurando que o sistema funcionará sempre de modo a garantir as necessidades dos ocupantes.

Tais sistemas podem ser controlados automaticamente. Possuem custos relativamente altos se comparados com as alternativas anteriores, mas a partir da análise de seu efeito sobre a redução dos sistemas de refrigeração simultaneamente com a utilização de luz natural, torna-se econômico ao considerar todos os custos. Tais sistemas promovem melhores condições de conforto térmico e visual [65].

4.4- NOVAS OPÇÕES TECNOLÓGICAS

A única forma de oferecer respostas mais amplas de performance do envelope do edifício é através da disposição de vidros operáveis, com propriedades de controle solar manipuláveis. Várias alternativas começam a surgir em vidros de propriedades alteráveis em resposta às variações das condições externas e/ou necessidades internas.

Avançados recobrimentos depositados diretamente sobre vidros podem promover às janelas do futuro controles solares similares ao promovidos pelos sistemas mecânicos citados acima.

Fotocrômicos, termocrômicos e eletocrômicos respondem distintamente as forças ambientais, resultando em efeitos igualmente distintos em iluminação e calor admitidos:

- **Fotocrômicos** respondem a luz, resultando em menor consumo de energia para iluminação, mas sem resposta à variabilidade térmica;
- **Termocrômicos** respondem ao calor e minimizam os gastos com refrigeração, porém não respondem à iluminação;
- **Eletocrômicos** suscetível ao comando humano através da aplicação de voltagem, otimizando o desempenho luminoso, térmico e energético do edifício, com conseqüências superiores aos vidros termocrômicos e fotocrômicos que atendem aos comandos naturais, com respostas nem sempre apropriadas a condição climática [65].

5. JANELAS INTELIGENTES

Desde a grande corrida mundial de controle de emissões de gases e consumo de energia, à maior fatia deste montante ser decorrente do setor da construção civil até a compreensão da grande contribuição das janelas com iluminação, ganho e perda de energia térmica, a ciência vem aprofundando seus desenvolvimentos em alternativas para otimização de todo o sistema construtivo, como apresentado nas discussões anteriores.

Em conseqüência desta busca, a possibilidade de utilizar-se de filmes eletocrômicos- anteriormente usados em retrovisores e tetos-solares de veículos automotores - para recobrimentos de vidros planos usados na arquitetura, já é uma realidade para países como a Alemanha [66].

5.1- FENÔMENO DE ELECTROCROMISMO

Eletrocromismo é a designação dada ao fenômeno de alteração de cor de um determinado material induzido pela injeção de íons sob a aplicação de uma corrente elétrica. Esta mudança de cor ocorre devido a formação de centros de cor no filme, que absorvem radiação visível. Pode ocorrer a absorção de radiações de outras regiões espectrais.

O grau de colorido vai depender da magnitude da carga aplicada, do número de íons inseridos, da estrutura do filme e da quantidade de centros de cor formados. A cor permanece enquanto a voltagem é mantida.

Vários materiais podem exibir eletrocromismo [67,68], mas este estudo refere-se ao fenômeno decorrente em materiais inorgânicos compostos de óxidos de metais de transição.

O eletrocromismo decorre de condições oxidantes (anódico) ou redutoras (catódicos) aplicadas aos óxidos metálicos de transição [67-71].

5.1.1-Óxidos eletrocromicos catódicos

A coloração catódica ocorre por redução do óxido MO_y , conforme apresentado pela equação abaixo:

O cátion A^+ e o elétron e^- são injetados conjuntamente no óxido hospedeiro MO_y .

Estão nesta categoria os óxidos semicondutores como TiO_2 , V_2O_5 , Nb_2O_5 , WO_3 e MoO_3 . Dentre estes, o mais estudado e usado em aparelhos eletrocromicos é o WO_3 .

5.1.2- Óxidos eletrocromicos anódicos

Outra reação é conhecida como coloração anódica, ou coloração por oxidação. Estão nesta categoria os óxidos semicondutores como CrO_x , MnP_x , CoO_x , NiO_x , IrO_2 e RhO_x . O óxido mais estável é IrO_2 , porém devido ao seu custo elevado não é viável para utilização em janelas inteligentes

5.2- APARELHO ELETROCRÔMICO

A partir da introdução dos princípios acima, poderemos compreender o funcionamento de um aparelho eletrocromico, ou neste caso, janela inteligente.

A estrutura do aparelho pode variar imensamente, mas constitui-se basicamente de cinco camadas de materiais, conforme ilustrado na figura 12 [70,71,72,73].

Os filmes mais externos e depositados diretamente sobre o vidro são transparentes e condutores de eletricidade. Podem ser constituídos de óxido de estanho dopado com fluor ($\text{SnO}_2\text{:F}$) ou óxido de índio e estanho (ITO) [74,75].

FIGURA 12: Esquema de janela eletocrômica

Diretamente depositados sobre as camadas condutoras dispõe-se o filme eletocrômico (eletrodo) e um filme responsável pelo armazenamento de íons (contraeletrodo). O filme eletocrômico e o reservatório de íons são separados por uma camada de eletrólito, completamente permeável aos íons modificadores.

Ao aplicar-se um potencial um potencial negativo no condutor adjacente ao eletrodo, cátions (H^+ ou Li^+) se deslocam do contraeletrodo, atravessam o eletrólito e se incorporam no filme eletocrômico (eletrodo), provocando a alteração de cor. Aplicar a polaridade inversa provoca o descoloramento do sistema, com a migração dos cátions para o contraeletrodo.

A partir da aplicação de uma diferença de potencial entre as camadas condutoras, estabelece-se um desequilíbrio energético e o sistema reage de forma a buscar a estabilidade.

Este processo se dá pela liberação de íons (cátions ou ânions, dependendo do material) do reservatório de íons, que irá se difundir através do eletrólito e finalmente irá atingir a camada eletocrômica, onde serão inseridos e, então, será formado o centro

de cor.

Óxidos catódicos e anódicos podem ser utilizados como eletrodos ou contraeletrodos. Tanto a incorporação de cátion pelo eletrodo, como a liberação deste pelo contraeletrodo provoca alteração do espectro de transmissão de ambos os filmes. Deste modo, torna-se possível compor o espectro resultante da janela inteligente com o conhecimento e então sobreposição dos espectros individuais de cada filme.

Compostos que possuem propriedades reversíveis de inserção de íons, porém não possuem eletrocromismo, ou seja, não alterando cor durante o processo, são candidatos a contra-eletrodos ou reservatório de íons em janelas eletrocromicas. O compostos CeO_2 , $\text{TiO}_2\text{-CeO}_2$ e $\text{SnO}_2\text{-CeO}_2$ possuem esta característica.[76].

Podem alterar as propriedades da janela eletrocromica [76]:

- Método de preparação;
- Aditivos na preparação;
- Aderência entre os filmes;
- A morfologia do filme afeta a resposta electro-óptica;
- Reações entre as interfaces de filmes prejudicam e interrompem o processo.

5.3- ÓXIDO CATÓDICO Nb_2O_5

Os filmes de Nb_2O_5 são sugeridos para aplicações em aparelhos eletrocromicos. A característica fundamental deste material é a rápida reversibilidade de coloração através da inserção de pequenos íons H^+ e Li^+ na rede, com variação da transmissão óptica resultando em alterações de colorações de transparente para azul (filme cristalizado) ou marrom (filme amorfo ou vítreo).

Filmes de Nb_2O_5 tratados termicamente a temperaturas inferiores a 400°C apresentam-se amorfos e com variação de cores de transparente (ligeiramente amarelado) para marron. Filmes queimados acima de 500°C são cristalinos e tornam-se azuis escuros após inserção de Li^+ à -1.8V .

Um promissor material eletrocromico para uso como eletrodo colorido primário é o óxido NiO_x . Como candidato a eletrodo complementar para NiO_x ,

levantou-se a possibilidade de utilizar Nb_2O_5 , colorido catodicamente. Nb_2O_5 também pode ser um substituto para WO_3 [77]. Pode-se acoplar ao Nb_2O_5 materiais como V_2O_5 , IrO_2 e CoO , que tem sido usados com WO_3 [78].

Filmes de Nb_2O_5 já foram fabricados por magnetron sputtering [84], oxidação anódica [79], rotas sintéticas[80] e pelo processo sol-gel [81,82]. As maiores vantagem do processo sol-gel na produção dos filmes é boa estabilidade química e mecânica, alta porosidade, potencial para recobrir homogeneamente grandes áreas e facilidade no controle da microestrutura. Estes fatores podem influenciar a cinética, durabilidade, eficiência de coloração e capacidade de carga nos eletrodos eletrocromicos [78,79].

A reação redox responsáveis pela modificação de cor está descrito na equação a seguir:

Durante a inserção de íons de lítio no óxido, o Nb^{+5} é reduzido a Nb^{+4} por aceitar um elétron. Isto forma um composto intercalar colorido, $\text{Li}_x\text{Nb}_2\text{O}_5$. O processo reverso recupera o estado transparente do Nb_2O_5 .

CAPÍTULO 4

1. MATERIAIS E MÉTODOS

1.1-PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS [5,6]

O método sol-gel foi utilizado para formação do filme de Nb₂O₅.

A solução necessária para obtenção de Nb₂O₅ foi preparada dissolvendo-se 1,3 g de pó de NbCl₅ (CBMM, Brasil, 0.2M) em 15 ml de butanol (0.28M). Devido às características higroscópicas do pó Nb₂O₅, a manipulação e mistura destes reagentes ocorreu em câmara fechada com atmosfera inerte de gás nitrogênio.

Foi adicionado à solução 3 ml de ácido acético (0.05M) em Becker de 30 ml e submetida por 2 minutos a ação de 95W irradiação ultra-sônica de Sonicator^R W385 Heat System-Ultrasonic, Inc. at 20 kHz equipado com a ½' Disruptor Hern. O resultado foi a obtenção de uma solução transparente, viscosa e estável (em recipiente fechado) por muitos meses.

O processo sonocatalítico acelera a reação química entre o Nb₂Cl₅ (pentaclorato de nióbio) e o butanol, com a formação provável de cloro alcóxidos do tipo NbCl_{5-x} (Obu)_x [5]. A reação está demonstrada na equação abaixo:

Para uso da solução preparada, aguardou-se a formação de precipitado.

Os substratos de vidro recoberto com ITO (Asahi-Glass, 14Ω□⁻¹) foram cortados riscando-se os limites com lâmina de diamante e aplicação de pressão, propagando fratura do vidro em tais riscos. Tais lâminas de substrato foram limpos imersos em acetona sofrendo ação de radiações ultra-sônicas por 10 min. Foram secos em estufa.

Os filmes foram depositados pelo processo de molhamento, dip-coating, que consistiu em mergulhar os substratos na solução descrita à velocidade de 12 cm/min (umidade do ar,60%). A figura 13 demonstra o método de molhamento.

Realizou-se o primeiro mergulho e então deixou-se gelificar ao ar durante 3 minutos a temperatura ambiente. Em seguida colocou-se a amostra no forno à 450°C

por 5 min, objetivando-se eliminar orgânicos e aumentar a aderência entre o filme e substrato.

FIGURA 13: Placa de vidro recoberto com ITO sofrendo molhamento em sol a velocidade de 12cm/min.

Após o esfriamento ao ar por 10 min, executou-se segundo mergulho em solução, formando outra camada de filme sobre a primeira, conforme procedimento anterior. O substrato sofreu então mais um mergulho na solução de acordo com o mesmo procedimento.

Foram depositadas 3 camadas de filme sob a aplicação do mesmo tratamento para então, sofrerem queima de 2h a 600°C sob taxa de aquecimento de 10°C/min.

1.2- ENSAIO ESPECTROFOTOMÉTRICO

As análises óticas foram realizadas em espectrofotômetro marca Hitachi modelo 3501. Este instrumento permite varrer o espectro no intervalo de 185 a 3200 nm. No caso, as amostras foram ensaiadas dentro do intervalo concernente ao espectro solar, de 300 a 2200 nanômetros, pois acima deste valor os ruídos não permitiam a reprodução de resultados confiáveis.

A amostra foi ensaiada sob a condição inicial transparente, sem que houvesse sofrido nenhuma inserção de íon anterior. A seguir o vidro eletrocromico sofreu polarização com modificação de cor para azul escuro e ensaio no espectrofotometro. Tomou-se uma terceira medida espectrofotométrica relacionada a amostra despolarizada.

A polarização e despolarização realizaram-se em cela eletroquímica de quartzo fundido, ligada a uma interface eletroquímica Solartron 1286. A interface permanece associada a um microcomputador que controla a carga e a diferença de potencial aplicada no filme.

A amostra foi acoplada como eletrodo, utilizou-se contraeletrodo de platina e eletrodo de prata como referência, todos imersos em solução eletrolítica 0.1M de LiClO_4 dissolvido em carbonato propileno. A aplicação de -1.8V provoca a polarização da amostra, ou seja, a inserção de íons de Li, com modificação da coloração de transparente para azul escuro. Então a amostra foi retirada da cela eletroquímica e disposta no espectrofotômetro perpendicularmente ao feixe de radiação incidente. Tomou-se então a curva de transmissão da amostra. Posteriormente inseriu-se a amostra novamente na cela para despolarização. A extração de íons de Li ocorreu sob aplicação de 2V .

Calculou-se as médias das transmissões total e nas faixas UV, visível e IV.

1.2.1- Radiação Solar

Através dos dados espectrais para irradiação solar fornecidos por norma ASTM E 891-87 para massa de ar 1.5 [84], plotou-se o espectro desta radiação. Por integrações desta curva total e entre os limites determinados das regiões ultravioleta, visível e infravermelha, obteve-se a quantidade de energia intrínseca a cada segmento. Determinou-se também as porcentagens de cada região espectral em relação a energia espectral total incidente perpendicularmente em determinada superfície.

1.2.2- Radiação Transmitida e Absorvida

A partir das curvas de transmissão da amostra de Nb_2O_5 obtidas em espectrofotômetro, tornou-se possível a associação ao espectro de irradiação solar para $m=1,5$ em casos de incidência direta normal sobre superfícies em análise.

A transmissão espectral solar foi obtida através do produto $\tau_\lambda E_\lambda$, sendo τ_λ a transmissão da amostra de Nb_2O_5 para comprimento de onda λ da curva em questão e E_λ a irradiação espectral solar direta normal a superfície do vidro no mesmo comprimento de onda.

As potências solares transmitidas através do metro quadrado do vidro (radiosidade) foram calculadas pela equação 11 (capítulo 2), cujos limites de integração utilizados foram os comprimentos de onda limites das regiões espectrais solares relativas ao ultra violeta (290-380nm), visível (380-780nm), infra vermelho (780-2200nm) e todo espectro (290-2200nm).

As frações de energia transmitida em cada estado do vidro eletrocromico foram calculadas para cada uma das regiões espectrais citadas com relação a energia total incidente, sendo denominadas de transmissividade solar (equação 09).

Tais cálculos também possibilitaram a avaliação aproximada da energia absorvida pelo vidro sob incidência normal.

Utilizando-se da aproximação de que a reflexão em caso de incidência de radiação perpendicular na superfície do vidro tende a zero, ou melhor, tende a aproximadamente 5% de acordo com figura 5, a equação 07 para incidência normal aproxima-se de :

$$E_o = E_\tau + E_p + E_\alpha, \text{ sendo } E_p = 0,05 E_o$$

$$E_o = E_\tau + E_\alpha + 0,05 E_o$$

$$E_\alpha = E_o - (0,05 E_o + E_\tau)$$

18

A partir da equação 18 as energias absorvidas pelo vidro eletrocromico transparente e colorido foram calculadas.

2. RESULTADOS

2.1-TRANSMISSÃO ÓPTICA

As curvas de transmissão óptica obtidas entre 300 e 2200nm para condições transparente (limpa), polarizada e despolarizada da amostra de Nb_2O_5 estão apresentadas na figura 14.

FIGURA 14: Curvas de Transmissão Óptica para comprimentos de onda entre 300 e 2200nm para condições limpa, polarizada e despolarizada da amostra de Nb_2O_5 .

2.1.1- Amostra Limpa

A amostra limpa, ou seja, em estado transparente sem aplicação alguma de carga elétrica, apresentou as seguintes médias de transmissão:

- **Ultravioleta:** transmissão de 0,13605 ou 13,605% para região do ultravioleta compreendido entre 300 e 380 nm.

- **Visível:** transmissão de 0,60984 ou 60,984 para região do espectral visível entre 380 e 780nm.
- **Infravermelho:** transmissão de 0,58712 ou 58,712% para região espectral relativa ao infra vermelho próximo, entre 780 e 2200 nm.
- **Total:** a média de transmissão total é de 0.57162 ou 57,162%.

2.1.2- Amostra Polarizada

Sob inserção de íons de Li, a amostra sofreu transformação em sua coloração de transparente para azul com decorrente alteração em seu espectro de transmissão. Nestas condições, há queda brusca na transmissão :

- **Ultravioleta:** a transmissão média relativa foi 0,13685 ou 13,685%, sem alteração significativa do mesmo índice apresentado pela amostra transparente.
- **Visível:** a transmissão média obtida foi 0,33151 ou 33,151%, inferior ao índice apresentado pela amostra limpa.
- **Infravermelho:** a transmissão média obtida foi de 0,13422 ou 13,422%, havendo redução na transmissão para esta região do espectro com relação a amostra limpa.
- **Total:** o coeficiente médio de transmissão para todo espectro solar foi significativamente reduzido com relação à transmissão total para amostra antes da polarização, apresentando uma valor de 0,17556 ou 17,556%.

2.1.3- Despolarizada

A amostra despolarizada através da aplicação de voltagem apresentou os valores de coeficientes de transmissão listados abaixo:

- **Ultravioleta:** transmissão para ultravioleta ligeiramente superior aos índices para amostra limpa e polarizada, com valor médio de 0,13716 ou 13,716%.
- **Visível:** o valor calculado foi de 0,56553 ou 56,553%, com transmissão inferior a amostra limpa, nitidamente observável através das curvas de transmissão.

- **Infravermelho:** coeficiente para região do infravermelho, 0,4929 ou 49,29%, apresenta valores inferiores a amostra transparente.
- **Total:** a média de transmissão para o espectro solar total foi de 0,49238 ou 49,238%, evidenciando que a amostra não apresenta o mesmo desempenho antes da inserção de íons

A tabela 02 apresenta os coeficientes de transmissão médios para as regiões espectrais solares.

TABELA 02: Coeficientes de transmissão médios para regiões espectrais compreendidas dentro do espectro solar.

Região Espectral	Limpa	Polarizada	Despolarizada
UV	0,13605	0,13685	0,13716
Visível	0,60984	0,33151	0,56553
IV	0,58712	0,13422	0,4929
Total	0,57162	0,17556	0,49238

2.2- TRANSMISSÃO ÓPTICA SOLAR

O resultado da associação da curva característica do espectro solar $m=1,5$ (que atinge superfícies terrestres com incidência normal) às curvas de transmissão do vidro eletrocromico à base de Nb_2O_5 , em estado transparente e polarizado, está apresentado na figura 15. Nota-se a significativa redução na transmissão de energia solar incidente para ambos estados de apresentação do vidro eletrocromico em questão.

Através da integração da curva espectral solar para $m=1,5$ [35] obteve-se a quantidade de energia em joules por segundo (equivalente a potência em Watts) que incide perpendicularmente sobre determinado metro quadrado de superfície na Terra. Estes valores foram levantados para todo espectro, equivalente a radiações entre 300 e 2200nm e para as regiões espectrais relativas ao ultra violeta (300 à 380 nm), visível (380 à 780nm) e infravermelho (780 à 2200nm). Obteve-se as porcentagens das regiões espectrais relativas ao espectro total solar.

A integração das curvas de radiação transmitidas através do vidro eletrocromico em estados transparente e polarizado sob incidência perpendicular de radiação solar direta, também foi realizada para todo o espectro solar e para as regiões espectrais relativas ao ultravioleta, visível e infravermelho.

FIGURA15: Curvas de radiações solares direta e transmitidas através de vidro eletrocromico à base de Nb_2O_5 em estado transparente e polarizado

2.2.1- Radiação intrínseca a região ultra violeta do espectro solar

- **Energia Ultravioleta Incidente:** A radiação UV total incidente em superfícies perpendiculares é $13,62 \text{ W/m}^2$. É equivalente a 1,84% da radiação solar total incidente.
- **Vidro Eletrocromico Transparente:** A radiação UV transmitida diretamente através de vidro eletrocromico transparente para o ambiente interior apresenta o valor de $2,84 \text{ W/m}^2$, bastante reduzido da quantidade de energia incidente, havendo significativa barragem desta radiação

através de absorção. A transmissividade solar indicada é de 0,2085, ou seja, o vidro eletrocrômico estudado em estado transparente permite a passagem direta de 20,85% da radiação ultravioleta solar incidente perpendicularmente.

- **Vidro Eletrocrômico Polarizado:** A radiação UV transmitida através de vidro eletrocrômico polarizado é $2,78 \text{ W/m}^2$, com insignificante variação do valor transmitido para o estado transparente. Nesta condição o vidro permite a passagem direta de 20,41% da radiação ultravioleta solar incidente.

2.2.2- Radiação intrínseca a região visível do espectro solar

- **Energia Solar Visível Incidente:** A quantidade de energia em radiação visível solar incidente em superfícies perpendiculares é $374,35 \text{ W/m}^2$. Este valor equivale a 50,46% da radiação total do espectro solar.
- **Vidro Eletrocrômico Transparente:** A energia em radiação visível transmitida através de vidro eletrocrômico transparente apresenta valor de $231,82 \text{ W/m}^2$, absorvendo parte da energia incidente. O vidro transparente transmite diretamente 61,92% da radiação visível solar incidente.
- **Vidro Eletrocrômico Polarizado:** Radiação visível transmitida através de vidro eletrocrômico polarizado $124,57 \text{ W/m}^2$, absorvendo maior quantidade de energia visível do que em seu estado transparente. Nestas condições, o vidro permite a passagem de 33,28% da radiação solar visível incidente ou sua transmissividade solar é 0,3328.

2.2.3- Potência radiante solar intrínseca a região de infra vermelho próximo

- **Energia Solar Infravermelha Incidente:** A quantidade de energia infravermelha que incide perpendicularmente numa superfície é $353,88 \text{ W/m}^2$. Radiações infravermelhas correspondem neste caso a 47,70% do espectro solar total.

- **Vidro Eletrocrômico Transparente:** A energia infravermelha solar transmitida através de vidro eletrocrômico transparente é $234,94 \text{ W/m}^2$. Sua transmissividade solar para esta região espectral é 0.6639, transmitindo diretamente 66.89% da radiação infravermelha do espectro solar incidente sobre o vidro.
- **Vidro Eletrocrômico Polarizado:** A energia em infravermelho solar transmitida diretamente pelo vidro eletrocrômico polarizado é $55,50 \text{ W/m}^2$, com grande quantidade da radiação solar infravermelha incidente absorvida pelo sistema. Permite a transmissão direta de somente 15,68% da radiação solar infravermelha incidente.

2.2.4- Potência de todo espectro solar por metro quadrado:

- **Energia Solar Total Incidente:** A irradiação total incidente diretamente em superfícies perpendiculares é $741,85 \text{ W/m}^2$, conforme integração total entre 290 e 2200nm.
- **Vidro Eletrocrômico Transparente:** A radiação total transmitida diretamente pelo vidro eletrocrômico transparente apresenta valor de $469,61 \text{ W/m}^2$, com transmissividade solar igual a 0,6330.
- **Vidro Eletrocrômico Polarizado:** Radiação solar total transmitida diretamente por vidro eletrocrômico em polarização completa é $182,86 \text{ W/m}^2$, transmitindo parcela bastante reduzida da energia total incidente sobre ele. Neste caso, o vidro eletrocrômico colorido permite a transmissão direta de somente 24,65% da radiação total incidente perpendicularmente.

Tais resultados estão apresentados na tabela 3 permitindo melhor comparação entre os dados e facilitada análise.

TABELA 03: Apresentação de valores de energia solar incidente e transmitidos através de vidro eletrocromico à base de Nb_2O_5 transparente e polarizado e suas transmissividades solares.

Região Espectral	Radiação Solar incidente (W/m^2)	Radiação transmitida pela amostra limpa (W/m^2)	Transmissividade solar da amostra limpa	Radiação transmitida pela amostra polarizada (W/m^2)	Transmissividade solar da amostra polarizada
UV	13,62	2,84	0.2085	2,78	0,2041
Visível	374,35	231,82	0.6192	124,57	0.3328
IV	353,88	234,94	0.6639	55,50	0.1568
Total	741,85	469,61	0.6330	182,86	0.2465

2.3- RADIAÇÃO ABSORVIDA

Como $E_o = 741,85 \text{ W/m}^2$, $E_{\tau l} = 469,61 \text{ W/m}^2$ e $E_{\tau p} = 182,86 \text{ W/m}^2$;

Obtêm-se:

$E_p = 37,09 \text{ W/m}^2$ – Energia refletida sob incidência normal

$E_{al} = 235,15 \text{ W/m}^2$ – Energia absorvida em joules por segundo por unidade de área (1m^2) pelo vidro eletrocromico em condição transparente.

$E_{ap} = 521,90 \text{ W/m}^2$ – Energia absorvida em joules por segundo por unidade de área (1m^2) pelo vidro eletrocromico em condição polarizada.

Tal energia será emitida tanto para o interior quanto para o exterior, dependendo do gradiente de temperatura entre o interior e exterior, além do movimento do ar sobre as superfícies internas e externas da vidraça.

3- DISCUSSÕES

As discussões do trabalho iniciam-se com breve comentário sobre a possibilidade de implantação do processo desenvolvido para aplicação do filme de Nb_2O_5 em escala industrial. A seguir analisa-se os resultados obtidos, confrontando-os com dados da literatura e associando possíveis vantagens e desvantagens da utilização deste filme na arquitetura, além de oferecer sugestões para trabalhos futuros.

3.1- APLICAÇÃO DO PROCESSO SOL-GEL SONOCATALÍTICO VIA MOLHAMENTO EM ESCALA INDUSTRIAL

Como apresentado no capítulo 3, os processos realizados diretamente na linha de produção resultam em longas corridas e produção em larga escala de um único produto. O vidro eletrocromico apresenta-se como nova variedade para o mercado, com custo superior aos demais produtos e produção em menor quantidade. Portanto os processos de manufatura envolvidos estariam fora da linha de produção, com as placas de vidro (substrato) cortadas e levadas para outro setor.

A produção sonocatalítica da solução apresenta vantagens na rapidez e facilidade. Este método supera nestes importantes aspectos o outro executado pelo grupo na produção de filmes eletrocromicos de Nb_2O_5 , via-alcóxido [83,84]. Tal método é extremamente complicado, exigindo processo químicos complexos, com imenso dispêndio de tempo, além de gerar benzeno como resíduo químico. O processo sonocatalítico elimina HCl como resíduo de processo. É necessário solucionar a questão do resíduo químico para que tais processos possam assumir a escala industrial.

Câmara com atmosfera inerte seria necessário para o molhamento das placas de vidro afim de se preservar a integridade da solução, altamente reativa ao ar.

O filme necessita ser aplicado somente sobre a superfície recoberta com camada condutora para produção da janela. Porém, através do molhamento, o filme de Nb_2O_5 é aplicado em ambas faces do vidro, sendo uma das limitações do processo. Soluções devem buscar, além de recobrir somente uma face, não

desperdiçar solução.

3.2-ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

3.2.1- Curvas de transmissão

Observa-se a grande versatilidade óptica dos vidros eletrocromicos através das curvas de transmissão sob polarização e despolarização do filme de Nb_2O_5 , abrindo-se a possibilidade do usuário decidir sobre a intensidade de radiação direta que penetraria através da vidraça.

As curvas demonstram a limitação do material para uso imediato na produção de produtos, sendo necessário aprimoramentos para tal fim. Nota-se que o filme não adquire as propriedades ópticas originais após a polarização. O filme deve reter íons de Li^+ em sua estrutura, não permitindo o total desprendimento destes durante a despolarização, e portanto não apresentando as características ópticas originais da amostra limpa de íons. Devido a esta característica, selecionou-se somente as curvas de transmissão da amostra limpa e polarizada para as avaliações conjuntas com o espectro solar. Medidas de voltamogramas cíclicos realizados em 100 ciclos demonstram que os processo de inserção e extração de Li^+ só são estáveis após o quadragésimo ciclo [6].

Observa-se uma variação nos dados de transmissividade médios obtidos pela espectrofotometria e pela associação desta com a radiação solar incidente. Há um acréscimo em todos os dados ao sobrepor-se a transmissão com o espectro de radiação solar. Esta sobreposição tem o objetivo de ilustrar o espectro de radiação transmitida nas condições determinantes daquele espectro solar, além de padronizar os resultados com relação aos padrões internacionais. Desta forma, a transmissividade solar representa qual a fração solar transmitida sob incidência perpendicular deste espectro solar. Para esta análise, é necessário os dados obtidos em espectrofotômetro, cujas intensidades de radiação incidentes são constantes. Esta diferença é dada pela associação de curvas com equações distintas.

TABELA 4: Transmissividades obtidas por espectrofotômetro e transmissividades solares para as amostras transparentes (limpas) e polarizadas nas regiões espectrais e totais.

REGIÃO ESPECTRAL	Transmissividade da amostra limpa	Transm. Solar da amostra limpa	Transm. da amostra polarizada	Transmissividade Solar da amostra polarizada
UV	0,13605	0.2085	0,13685	0,2041
Visível	0,60984	0.6192	0,33151	0.3328
IV	0,58712	0.6639	0,13422	0.1568
Total	0,57162	0.6330	0,17556	0.2465

3.2.1.1- Radiação ultravioleta

FIGURA 16: Espectros de radiação ultravioleta incidente perpendicularmente em metro quadrado de superfície e transmitidos por metro quadrado de vidro eletrocromico com filme de Nb_2O_5 transparente e polarizado.

Não existe variação significativa nas transmissões de radiação ultravioleta em qualquer situação. A transmissão para esta região espectral apresenta-se baixa sob qualquer aspecto, podendo minimizar ou quase extinguir os efeitos causados pelo UV.

Ao receber $13,68 \text{ W/m}^2$ de energia de radiações ultravioleta, o vidro (transparente ou colorido) absorve em média $10,87 \text{ W/m}^2$ permitindo que somente

2,81 W/m² seja transmitido livremente. Radiações abaixo de 320nm são extintas e são estas as responsáveis pela ação bactericida, síntese de vitamina D e geração de queimaduras e eritemas de pele. A característica transmissiva desta faixa não é uma propriedade do filme de Nb₂O₅, mas sim dos vidros normalmente utilizados [37]. Portanto, não é permitido ao interior do edifício com barreiras envidraçadas, tais efeitos provocados pelas radiações solares. As radiações características dos demais comprimentos de onda de ultravioleta são minimizadas, reduzindo-se efeitos de bronzeamento de pele e desbotamento de materiais promovidos por estes comprimentos de onda.

3.2.1.2-Radiação Visível

TABELA 05: Apresentação da intensidade de energia relativa ao espectro visível incidente, intensidade desta energia transmitida através de vidro eletrocromico limpo (transparente) e polarizado (pol) e suas respectivas transmissividades solares.

Radiação	Incidente	Radiação trans. limpa	transm. solar limpa	Radiação trans. pol	Transm. solar pol.
Visível	374,35W/m ²	231,82W/m ²	0.6192	124,57W/m ²	0.3328

Sob incidência de 374,35 W de energia puramente luminosa recebida pelo sol por metro quadrado de vidro, o usuário pode determinar a utilização entre 124,57 a 231,82 W/m² de iluminação natural. A transmissividade solar é reduzida de 28,6% do estado transparente para colorido, ou seja, a transmissividade solar varia entre 0,6192 e 0,3328, influenciando significativamente as condições de iluminação natural no local. Esta variabilidade é interessante pois é permitido ajustar-se a iluminação natural ao movimento solar diário.

Exposto a intensa iluminação solar direta, promove-se o colorimento do vidro eletrocromico com os seguintes resultados:

- Redução de ofuscamento visual gerado por excessiva luminosidade externa;
- Atenuação de luminosidade sem utilização de aparelhos de sombreamento como brises externos e cortinas;

- Redução da intensidade de luz solar direta com atenuação de reflexões luminosas nas superfícies de trabalho ou outras superfícies muito refletivas, promovendo portanto melhor conforto visual;
- Possibilita ao usuário a visibilidade externa com conforto visual;
- Permite o usufruto de luz natural;
- Estética inovadora devido a variabilidade de cor da fachada
- Privacidade.

Com o deslocamento solar e conseqüente redução da intensidade luminosa recebida pela janela, a boa iluminação natural interna pode ser promovida pelo clareamento progressivo da janela até a transparência máxima permitida.

Janelas amplas distribuem melhor e admitem maior luminosidade. Janelas largas podem ser usadas para reduzirem o contraste luminoso entre as superfícies adjacentes e a vidraça, promovendo melhor conforto visual. Da mesma forma, promove-se o melhor aproveitamento da iluminação natural internamente. A ampliação da altura da janela diminuiria a redução por cosseno da luminosidade de superfícies de trabalho, melhorando a eficiência de luminosidade natural. Por permitir o controle da intensidade luminosa através da dualidade transparente/colorido, janelas dispostas com finalidades de visualização externa podem concomitantemente terem a função de janelas luminárias.

Janelas localizadas nas laterais do recinto (supondo o vidro eletrocromico localizado a frente) promoveriam melhor distribuição de iluminação e conforto visual, sem a necessidade de se utilizar janelas eletrocromicas em localidades sem incidência solar direta. Para não haver o gasto desnecessário com janelas eletrocromicas, o projetista deve promover um atento estudo do local, associado com o movimento solar através dos dias e estações, e das possíveis sombras que se projetariam nas janelas, aplicando-o somente onde necessário, no caso de radiação solar direta e recorrendo a utilização dos demais vidros de custo inferior nas demais disposições, sem incorrer em prejuízos estéticos e econômicos.

Como o vidro eletrocromico proporciona alto aproveitamento da iluminação natural em ambientes internos do edificio, os reflexos de tal beneficio são sentidos na resposta fisiopsicológicas dos usuários. Como a luz natural fornece a melhor resposta visual, regula certas atividades fisiológicas e influencia estado

psicológico dos ocupantes, o resultado é bem estar das pessoas que permanecem grande tempo no recinto, ocasionando respostas cognitivas melhoradas, ou seja, melhor desempenho no trabalho.

É importante lembrar que o vidro também permite a saída de iluminação, sendo este fator determinante para avaliação de iluminação artificial no período noturno. Portanto, para ambientes de longa permanência noturna, deve-se tomar o cuidado ao dimensionar áreas envidraçadas e atentar para que se busque a melhor alternativa energética.

3.2.1.3- Radiações Infravermelhas do espectro solar

TABELA 06 : Apresentação da intensidade de energia relativa ao espectro infravermelho incidente, intensidade desta energia transmitida através de vidro eletrocromico limpo (transparente) e polarizado (pol) e suas respectivas transmissividades solares.

Radiação	Incidente	Radiação trans. limpa	transm. solar limpa	Radiação trans. pol	Transm. solar pol.
IV SOLAR	353,88W/m ²	234,94W/m ²	0.6639	55,50W/m ²	0.1568

Sob incidência solar direta e para $m = 1.5$, a quantidade de energia meramente térmica, infravermelho, que atinge perpendicularmente um metro quadrado de superfície é 353,88W. Isto é equivalente a 47,70% da energia solar total incidente. Em climas quentes o ideal seria bloquear completamente esta energia, que só tem como efeito o calor gerado.

Nestas condições, o filme eletrocromico a base de Nb_2O_5 deste estudo permitiria que a transmissão direta de intensidades energéticas de calor solar puro variasse entre 234,94W e 55,50W. Através das atividades de polarização e despolarização do vidro em questão (colorido-transparente), as transmissividades solares térmicas variam entre 66,39% e 15,68%. Esta é uma propriedade muito importante relacionada a controle de ganho térmico em edificações.

No caso de incidências solares diretas e altamente energéticas, o que coincide com alta luminosidade, é possível a barragem da transmissão direta de até 84,32% das radiações térmicas, ou seja, infravermelhas. Estas radiações são indesejáveis em períodos climáticos quentes, sendo realmente necessário

bloquear sua penetração direta no edifício. Este bloqueio pode ser conquistado portanto, pela utilização de vidros eletrocromicos sem a utilização de aparelhos de sombreamento, que são bloqueadores visuais. A medida que o sol se desloca, diminuindo a penalização da área envidraçada com sua alta atividade energética, permite-se o clareamento da vidraça para balanço luminoso sem ganhos excessivos de calor.

Em latitudes que sofrem invernos com queda de temperatura, a radiação infravermelha solar se torna extremamente importante para proporcionar o aquecimento interno. Sob este aspecto, o ganho térmico solar é necessário e permitido pela utilização deste vidro eletrocromico. Porém, como desejasse calor, em incidência direta solar, não é possível o controle luminoso (brilho da janela) e entrada máxima de calor simultaneamente, o que pode incorrer em certo prejuízo do conforto visual. O estudo do movimento solar novamente tornasse importante e o projetista pode portanto contornar o problema da exposição de janela muito luminosa ao campo visual do usuário através das disposições internas. Deve-se também neste caso, evitar a incidência solar direta em superfícies de trabalho de alta refletividade e outras superfícies refletivas que possam estar posicionadas a área central do campo visual do usuário mais freqüente. O ideal é que se equacione as relações aquecimento, iluminação, conforto, movimento solar e intensidade de polarização do vidro para atingir a melhor alternativa.

A caracterização do filme para radiações infravermelhas longas são consideradas desnecessárias pois estas já são barradas pelo substrato de vidro.

3.2.1.4- Radiação Total do Espectro Solar

TABELA 07: Apresentação da intensidade de energia relativa ao espectro total incidente, intensidade desta energia transmitida através de vidro eletrocromico limpo (transparente) e polarizado (pol) e suas respectivas transmissividades solares.

Radiação	Incidente	Radiação trans. limpa	transm. solar limpa	Radiação trans. pol	Transm. solar pol.
Total	741,85W/m ²	469,60W/m ²	0.6330	182,85W/m ²	0.2465

A energia total do sol em $m=1.5$ recebida por metro quadrado de superfície em incidência perpendicular é de 741.85W, conforme integração da curva de irradiação solar entre 300 e 2200 nm, sendo composto por 1.84% de UV, 50.46% de radiação visível e 47,70% de infravermelho.

Como o metro quadrado de fachada de vidro eletrocromico transmite diretamente entre 469,60 e 182,85 W, decorre-se que o ganho térmico de radiação direta varia entre estes valores. Toda energia admitida para interior, é absorvida e emitida na forma de calor, com conseqüente aquecimento.

A utilização do filme eletrocromico fornece portanto a opção de controlar-se a admissão de ganho térmico entre estes valores, com grande influência no impacto energético dentro da edificação. Supondo metro quadrado de fachada envidraçada com transmissão direta fixa de 469.60W, os sistemas de refrigeração deveriam ser dimensionados para retirada deste valor. Como 182.85W é 40% menor que 469.60W, é possível notar imediatamente que a utilização de vidros eletrocromicos permitem uma redução do sistema de refrigeração e do consumo de energia .

3.2.2-Radiação Absorvida

O vidro eletrocromico atenua a quantidade de energia transmitida diretamente para o interior da edificação devido a absorção de parte da energia do espectro pelo sistema substrato/ITO/Nb₂O₅. Porém, como visto anteriormente, admite-se que toda energia absorvida pela matéria transforma-se em calor.

Conforme os cálculos aproximados executados, o vidro eletrocromico transparente absorve cerca de 235,15 W/m² e quando polarizado, chega a absorver 521,90 W/m². Tal energia será emitida tanto para o interior quanto para o exterior, dependendo do gradiente de temperatura entre o interior e exterior, do movimento do ar sobre as superfícies internas e externas da vidraça e da condutividade do sistema conforme descrito pela equação 17. Isto ainda vai depender da posição da camada absorvente com relação aos demais filmes e com o ambiente (distância percorrida pelo calor) e também das resistências térmicas dos demais elementos que compõe o sistema.

Portanto para avaliação completa de ganho térmico é necessário o estudo

mais aprofundado na busca de determinação das demais variáveis. O estudo das propriedades térmicas (condutividade) da janela pode ser realizado quando esta estiver completa, ou seja, com todos os filmes necessários para compor o aparelho entre as placas de vidro.

Uma forma de ampliar a eficiência térmica da janela eletrocromica pode ser proposta através da utilização de sistema de janela composto por duas placas de vidro preenchido com gás entre si (ar, argônio, criptônio). Como introduzido anteriormente, esta composição aumenta a resistência térmica do sistema, diminuindo assim a condução de calor entre os ambientes interno e externo. Portanto, o calor absorvido pelo filme sofreria maior resistência térmica para atingir o interior do edifício. Maior ou menor eficiência deste sistema vai depender de sua montagem.

A figura 17 ilustra diversas opções para composição de janelas com placas duplas, com O indicando o lado externo do edifício e I, o interior. A configuração mais apropriada para diminuição do ganho térmico de calor é a C, pois além da resistência condutiva apresentada pela própria janela inteligente (com o filme absorvente disposto para o exterior), impõe-se a resistência térmica das placas duplas. É necessário portanto o levantamento das propriedades térmicas restantes do filme e dos demais constituintes a compor o sistema a fim de determinar a configuração energeticamente apropriada.

Atenção deve dada a condutividade térmica do material que compõe o caixilho do sistema para obter-se o melhor isolamento possível. Pouco adianta cuidados para desenvolvimento de sistemas de placas duplas se o material que compõe o caixilho tem alta condutividade térmica, prejudicando portanto o isolamento térmico do sistema. Estudo deve ser feito relacionando eficiência energética do sistema, espessura do espaço entre as placas e gás que preenche o espaço.

FIGURA 17: Possibilidades de montagem de janelas inteligentes, podendo constituir-se de uma única placa ou de placas duplas. O indica a posição externa do edifício e I indica o interior.

Outra importante questão relativa à imensa quantidade de energia absorvida relaciona-se ao aumento excessivo de temperatura do filme eletrocromico devido a longos períodos de exposição a insolação. Problemas podem surgir desta questão, pois o sistema submete-se a ciclos térmicos constantes estando submetido a fadiga térmica. Este problema pode ser ocasionado em maior ou menor grau, dependendo da diferença entre os coeficientes de expansão dos diversos filmes adjacentes entre si. Para o funcionamento da janela, o perfeito contato entre estes filmes é de crucial importância. Quando um filme dilata mais que o filme adjacente, gera-se tensão mecânica entre eles: o filme com maior dilatação sofrerá compressão enquanto que tensões de tração estarão submetendo o filme de menor dilatação. Dependendo dos ciclos térmicos e destes coeficientes de dilatação, romper-se-á tal contato com conseqüente interrupção do fenômeno eletrocromico.

Este torna-se um dos fatores determinantes da vida útil do sistema.

A espessura do filme eletrocromico muda o espectro de transmissão resultante. Conforme equação 12, conclui-se que o aumento da espessura aumenta a quantidade de centros de absorção do filme, aumentando portanto a radiação absorvida.

3.3- COMENTÁRIOS COMPLEMENTARES

Dimensionamento consciente das áreas envidraçadas com suas propriedades termo- ópticas conhecidas, associadas as características solares, traduzem as quantidades energéticas em forma de iluminação e calor que serão admitidas pelo meio ambiente. Permite-se desta forma, variáveis mais exatas para dimensionamento de sistemas de refrigeração e iluminação artificial. Englobar todos estes conhecimentos permitem economia pois aproveita-se conscientemente do meio ambiente, os benefícios energéticos que ele pode fornecer e protege-se dos excessos, sempre visando o conforto ambiental. Desta forma, não impõe-se a recompensa do desequilíbrio energético gerado pelo desconhecimento ao gasto com energia elétrica para fornecer iluminação ou aquecimento artificiais ou para retirar o excesso de calor solar admitido. Assim poupamos nosso Planeta de desequilíbrios ecológicos graves que nascem das nossas atitudes sem reflexões mais amplas.

O clima externo varia de forma previsível e imprevisível, e o impacto destes fenômenos no edifício é claramente dependente da sua orientação. O fluxo de iluminação natural varia amplamente com o tempo meteorológico, durante o dia e através das estações do ano. Portanto é impossível encontrar uma situação estática que tenha o melhor desempenho energético em todos os momentos. Assim, materiais com propriedades variáveis respondem melhor a variabilidade climática.

A melhor performance energética oferecida pelo vidro eletrocromico deve estar associada ao melhor balanço entre gastos com iluminação e resfriamento ou aquecimento. Estudo do comportamento climático local, movimento solar, propriedades dos materiais e portanto o dimensionamento de área envidraçada torna-se importante. Certamente a associação da janela eletrocromica à sistemas de controle e automação digital obterão o melhor resultado energético. Tais

estratégias de controle devem estar munidos das informações previsíveis de variabilidade de incidência solar, propriedades dos materiais e de informações relativas as necessidades humanas de conforto ambiental. Para este fim, associa-se ao sistema o controle de iluminação artificial e resfriamento/ aquecimento artificiais através de sensores e algoritmos. O sistema torna-se então "inteligente" agindo de forma totalmente automática, o que implica em eficiência energética superior ao controle manual. O usuário também pode interferir no sistema, conforme desejar.

Para que o projeto possa obter o melhor resultado, as propriedades angulares tanto do filme como do sistema, devem ser levantados.

Como a variação na transmissividade do vidro eletrocromico é dada pela aplicação de pequeno potencial elétrico, instalações elétricas são necessárias nas armações para implementação de tais janelas.

As janelas deveriam ser projetadas de modo a se permitir sua abertura, para aproveitar os benefícios como ventilação natural, além de radiações UV bactericidas importantes para esterilização do ambiente interno e que não são permitidas penetrar diretamente através do vidro eletrocromico.

Os filmes devem resistir a choques que eventualmente possam ocorrer.

O filme eletrocromico sofre fadiga e ruptura com a aplicação de ciclos de inserção e extração de Li^+ , existindo portanto um limite máximo de durabilidade. Para que possa ser aplicado em áreas envidraçadas na arquitetura, o produto deve ter vida útil mínima de pelo menos 20 anos. Para tal, supondo que sofra a aplicação de média de 3 ciclos diários, que é um número baixo, o número de ciclos mínimo que deve suportar seria 21900. Recomenda-se vida útil entre 10 e 40 anos e resistência superior a 50000 ciclos [85].

A associação de filmes eletrocromicos anódicos com respostas em diversas cores, pode produzir uma série de resultados associativos, com relação a espectros de transmissão e cores. A janela composta com Nb_2O_5 manteria esta cor azul sob inserção de íons somente se o filme utilizado como reservatório de íons não exibisse resposta colorida, como o CeO_2 .

4- CONCLUSÕES

O filme eletrocromico de Nb_2O_5 pode promover melhor aproveitamento da luz natural na iluminação dos ambientes internos do edifício, durante o maior parte do dia, com possível controle de ganho térmico. Os reflexos de tais benefícios são sentidos em diversos aspectos:

- **Aspectos visuais:** proporciona a iluminação a que estamos mais adaptados, ocasionando melhor resposta visual;
- **Aspectos fisiopsicológicos:** permite o melhor desempenho de atividades fisiológicas e influencia estado psicológico dos ocupantes, resultando em bem estar e eficiência no trabalho.
- **Aspectos estéticos:** embelezamento do ambiente
- **Aspectos econômicos:** o custo das janelas eletrocromicas poderão ser compensadas através da economia com sistemas de iluminação, climatização e contas de eletricidade.
- **Aspectos ecológicos:** eficiência energética é racionalidade ecológica.

Ecologia só se alcança com processos industriais limpos de resíduos químicos e esta deve ser sempre a busca dos profissionais de desenvolvimento de produtos.

Para se obter o melhor comportamento térmico, é necessário procedimentos para evitar ao máximo que a energia absorvida seja transferida para o interior do edifício.

Outra observação importante é que afim de se obter a melhor resposta econômica, um criterioso estudo deve ser executado a respeito do clima, posicionamento locais e opções de projeto. Além disto, sistemas de controle e automação digital associados a todas as informações, as janelas inteligentes e aos demais sistemas artificiais de climatização e iluminação são importante a fim de se atingir o melhor desempenho energético.

Vidros eletrocromicos devem ser associados somente em áreas críticas de incidência solar. As demais áreas podem obter bons desempenhos luminoso e térmico com vidraças usuais, porém ao associá-las deve-se sempre ter consciência das características do material e do meio.

Instalação elétrica deve ser feita para proporcionar o funcionamento da janela.

É importante ao projetista dispor de dados relativos a durabilidade do produto para se evitar adquirir produtos com vida útil reduzida, o que implica em imenso prejuízo.

A análise completa de desempenho da janela eletrocromica depende do levantamento de propriedades de todos os componentes do sistema:

- . as propriedades transmissivas com variação de ângulo de incidência;
- propriedades emissivas e absorventes;
- refletividades;
- os coeficientes de condução e dilatação térmicos;
- ciclos de inserção e fadiga térmicos;
- propriedades mecânicas.

Os estudos terão seqüência por empenho de alunos e professores do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (EESC) e Instituto de Química de São Carlos.

5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASHRAE Journal, <http://204.7.184.20/JOURNAL/1publist.htm>
- [2] PROCEL, <http://www.eletrobrás.gov.br/procel>
- [3] National Fenestration Council (NFRC) <http://www.nfrc.org/>
- [4] Greenpeace ,Catálogo - O Brasil é Solar, SM&A Design Gráfico.
- [5] A. Pawlicka, M. Atik, M.A. Aegerter, *Thin Solid Films* 301 (1997) 236-241.
- [6] A. Pawlicka, M. Atik, M.A. Aegerter, *J. Materials Science Letters* 14 (1995)1568-1570.
- [7] The world commission on the environment and development, *Our common future*, April 1987- Great Britain, Clays Ltd.
- [8] Eletrobrás, *Plano Decenal* <http://www.eletrobrás.gov.br/>.
- [9] B. Gioni, *Man, climate and Architecture* , Applied Science Publishers, London, 2º Ed, 1981.
- [10] DOE: Windows & Research Program, <http://eande.lbl.gov/BTP/DOE/>
- [11] R. Lamberts, L.L.B. Lomardo, M. R. V. Thomé, *Eficiência energética em Edificações: Estado da Arte*, PROCEL Combate ao Desperdício de Energia, março de 1996.
- [12] J. Silver, M.T. Ahmet, J. Billingham, J.G.F. Littler, *IEE Proc. Circuits Devices Syst.* , 144(2) April (1997) 123-126.
- [13] Air Infiltration and Ventilation Centre, <http://www.aivc.org> .
- [14] l'Arca, EBSCO, *Supplemento Eco Enea – Architetture per lo sviluppo sostenibile*, , Milano, a 126 maggio (1998).
- [15] N. Lechner, *Heating, Cooling, Lighting, Design Methods for Architects* - John Wiley & Sons, Inc. , 1991.
- [16] U.S. DOE , Building Technology State & Community Programs, <http://eande.lbl.gov/BTP/DOE/overview.html>
- [17] H. J. Cowan, *Energy: Conservation in the Design of Multi -Storey Buildings*, Pergamon Press, 1984.
- [18] Procel, *Modelo para elaboração de código de obras e edificações*, 1997.
- [19] R. Bevington, A. H. Rosenfeld, *Scientific American*, 7 (1990) 77-86.
- [20] Luxalon® Produtos Arquitetônicos, Idéias de Arquitetura, , divisão Hunter Douglas do Brasil Ltda, São Paulo-SP.

- [21] D. Wright, *Natural Solar Architecture, The passive solar prime*, 3º Ed., AIA, ed. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1984 .
- [22] R. Rivero, *Acondicionamento Térmico Natural: Arquitetura e Clima*, Ed. Luzzatto, 1985, Porto Alegre.
- [23] S.S. Kutateladze, *Fundamentals of Heat Transfer* , 2º Ed., Edward Arnold Ltd., 1963.
- [24] A. Bejan, *Heat Transfer*, John Wiley & Inc. USA 1993.
- [25] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; *Ashrae handbook :fundamentals, Fenestraion*, Ashrae 27 (1993) , N.Y..
- [26] A.G.H. Dietz, *Diathermanous Materials and Properties of Surfaces*, Space Heating with Solar Energy, Proceedings of a Course-Symposium, Massachusetts Institute of Technology, August, 1950.
- [27] F. Kreith, *Princípios da transmissão de Calor*, Ed. Edgard Blücher Ltda, 1973.
- [28] J.A. Duffie, W.A. Beckman , *Solar Engineering of Thermal Process*, Ed. John Wiley & Sons USA 1980.
- [29] C.G. Granqvist, *Materials Science for Solar Energy Conversion Systems- Introduction to Materials Science for Solar Energy*, Renewable Energy Series, Pergamon Press 1991.
- [30] Atlas do Extraordinário, *A Gênese do Universo*, Ediciones Del Prado, V(1) 1996.
- [31] Magnetic Field of Earth, Encyclopaedia Britannica, Inc., 15 ed. , 1976.
- [32] P. Moon, *J. Franklin Institute*, 11:583 (1940)
- [33] R. W. Hamilton *Variables Affecting Solar Incidence Space Heating with Solar Energy*, Space heating with solar energy, Proceedings of a course-symposium, Massachusetts Institute of Technology
- [34] C.R. Bamford, *Colour Generation and Control in Glass*, Glass Science and Technology, 2- Elsevier Sc. Publ. Comp., 1977.
- [35] Amercian Society for Testing and Materials, *Standard Tables for Terrestrial Direct Normal Solar Spectral Irradiance for Air Mass*, ASTM E891- 87 (Reaproved 1992).
- [36] Benjamin de Carvalho, *Ecologia e arquitetura* , Ed. Globo , Rio Jan. 1984.

- [37] R. M. Caram de Assis, *Vidros e Conforto Ambiental: Caracterização segundo critérios espectrofotométricos e indicativos para o emprego na construção civil*, Dissertação (Mestrado), São Carlos, 1996, EESC.
- [39] W. D. Callister, Jr, *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 3^o Ed., J. Wiley & Sons Inc., 1994.
- [40] J. F. Shackelford, *Introduction to Materials Science for Engineers*, 4^o Ed. Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [41] Tiple, *Física, Ótica e Física Moderna*, V. 4, Ed. Guanabara e Koogan S.A., 1995.
- [42] Heat transfer Throgh Non-Opaque Elements(Cap8), Thermal Performance of Buildings, Van Straaten, 1967
- [43] R. McCluney, *Passive Solar Journal*, 4 (4), 439 , 1987.
- [44] Window Selection, The NFRC Label, <http://www.efficientwindows.org>.
- [45] N.Baker, A. Fanchiotti, H. Steemers, Comission of the Eur. Communities, *Daylighting in Architecture*, A European Ref. Book-, James&James (Sc. Publ.) Ltd, 1998.
- [46] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR5413 (ABR 1992).
- [47] Fuller Moore, *Concepts and Praticice of Architectural Daylighting*, Van Nostrand Reynold, NY, 1991.
- [47] B.P Lim, *Environment Factors in the Design of Building Fenestration*, Architectural science series, Appl. Sc. Pub., London 1979.
- [48] R. Dodsworth, *Glass and Glass Making*, Shire Publ. Ltd, UK.
- [49] N. Lechner, *Heating, Cooling and Lighting, Design Methods for Architects*, John Wiley & Sons, USA, 1990.
- [50] Vidros Santa Marina, O vidro na arquitetura, Catálogo
- [51] D.N.C. Davies, Prodeedings, *Glass Tech.*, V.34 n° 6 (1993), 223-228.
- [52] H. J. Cowan, *Energy, Conservation in the design of multy-storey buildings*, Interational Symposium held at the University of Sidney, 1983.
- [53] P. Samyn, M. Achten, *J. of non-cristalline solids*, 218(1997) 1-6.
- [54] E. Lee, S.E. Selkowitz, *The design and evaluation of the integrated envelope and lighting control strategies for commercial buildings*, ASHRAE transactions: Research, pag. 326-342.
- [55] R. Bevington and A.H. Rosenfeld, *Scientific American*, 7 (1990).

- [56] Float in Glass Architecture- D. N. Cledwyn-Davies- Pilkington Glass, St. Helens, Lancs, England- Glass Tecnology, Vol. 34, No 6, December 1993
- [57] <http://www.eren.doe.gov/erec/factsheets/sp6803.html>
- [58] <http://alpha.fsec.ucf.edu/~fen/windowindustry.htm>
- [59] http://www.efficientwindows.org/glazing_lowe.html
- [60] <http://www.eren.doe.gov/erec/factsheets/sp6803.html>
- [61] http://www.efficientwindows.org/glazing_spect.html
- [62] http://eff.nutek.se/eaeel/iaeel/news/1995/treyra1995/DesAppl_a_3_4_95.html
- [63] http://www.efficientwindows.org/glazing_2.html
- [64] http://www.efficientwindows.org/glazing_gas.html
- [65] S Selkowitz, *Glass Magazine* , August 1986, pag. 86-91
- [66] Elektrochrome Isoliergläser, *Detail*, 7(1998), p.1312.
- [67] J.Silver, M.T.Ahmet, J.Billingham, J.G.F.Littler, *Molecular Eletronic Devices*, IEE Proc., Circuits Devices Syst., V. 144, nº 2 , 4 (1997) 123-127
- [68] Junichi Nagai, Advances in research and applications of electrochromic smart windows, *Solar energy materials*.
- [69] P.M.S. Monk, R.J. Mortimer, D.R. Rosseinsky, *Electrochromism, Fundamentals and Applications*, VCH Verlagsgesellschaft, Bundesrepublikdeutschland, 1995.
- [70] C.M Lampert, *Solar Energy Materials*, V27, 11(1984) 1-27
- [71] R.B. Goldner, F.º Arntz, G.Bereca, *Solid State Ionics*, 53/56 (1992) 617-627.
- [72] C.G. Granqvist, *Solid State Ionics*, 53-56 (1992) 479-489.
- [73] C. Lampert, Materials and Molecular Research Division and Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, USA, fev.1984.
- [74] C.G. Granqvist, *Materials Science for Solar Energy Conversion Systems*, Renewable Energy Series, Pergamon Press, 1991, 106-167.
- [75] F. R. Messias, *Uma Contribuição para a Caracterização Elétrica e Óptica de Filmes Finos de SnO₂ Preparados a Partir de Soluções Coloidais*, São Carlos 1998, Dissertação (Mestrado).
- [76] A. Avellaneda, M.A.Aegerter, *Sol-Gel Science Tech.*, (1989) 223-234.
- [77] M.A.B.Gomes, L.O.S.Bulhões, S.C.Castro, *Elettrchem. Soc.*, 14 (1994) L29.
- [78] N. Özer, D. Chen, C.M. Lampert, *Thin Solid Films*, 227 (1996) 162-168.
- [79] C.G. Granqvist, *Solid State Ionics*, 53-56 (1992) 479-489.

- [80] M.A.B. Gomes, L.O.S. Bulhões, S.C.Castro, *J. Electrochem. Soc.* , 137 (1990) 3067.
- [81] P.C. Yu, T.E. Hass and R. B. Goldner, *Electrochem. Soc. Symp. Proc.*, 94-2 (1993) 122.
- [82] F.R. Messias, *Dissertação de Mestrado*, Interunidades Ciências e Engenharia de Materiais. IFSC, IQSC, EESC, USP, São Carlos, 1998.
- [83] M.A.Aegerter, C.O. Avellaneda, A Pawlicka, *J Sol-Gel and Tech.*, 8(1-3) 1997, p.689.
- [84] C.O. Avellaneda, , M.A.Aegerter, A Pawlicka, *J. Mat. Sc.*, 33(8) 1998, p.2181.
- [85] J. Gordon, H.Mathew, S.P. Sapers, *J. Non-Crystalline Sol.*, 218 (1997) 342-346.