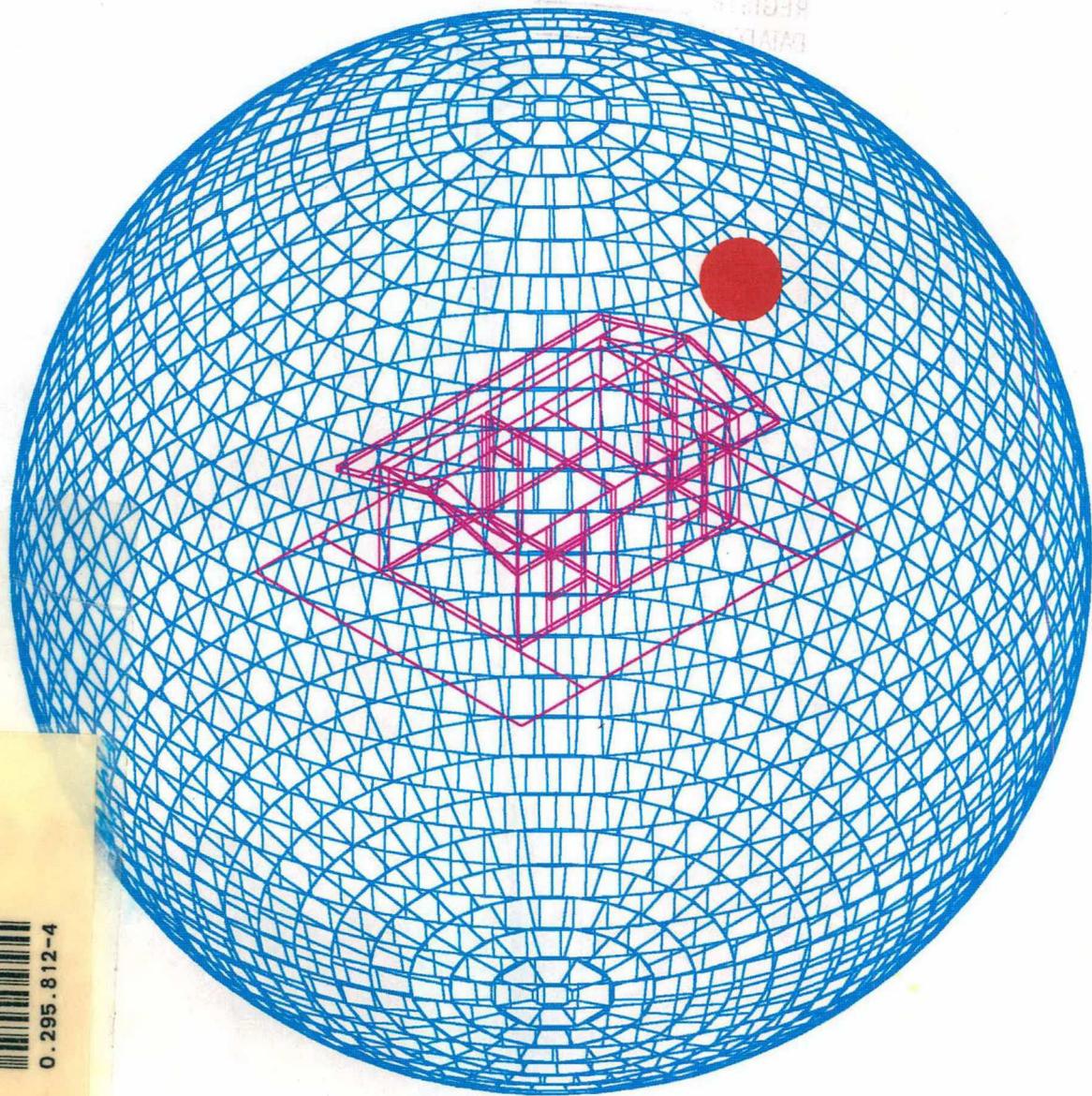


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS / EPS - CTC

MODELO VETORIAL ESFÉRICO PARA RADIOSIDADE APLICADO À ILUMINAÇÃO NATURAL



0.295.812-4

UFSC-BU

Autor: Anderson Claro
Orientador: Prof. Fernando Oscar Rutkay Pereira, PhD - ARQ / UFSC

TESE DE DOUTORADO - DEZEMBRO / 1998

MODELO VETORIAL ESFÉRICO PARA RADIOSIDADE APLICADO À ILUMINAÇÃO NATURAL

Anderson Claro

Esta tese foi julgada para obtenção do título de **Doutor em Engenharia de Produção** e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós - Graduação em Engenharia de Produção - UFSC



Prof. Ricardo Miranda Barcia, PhD
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



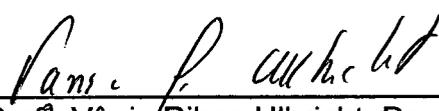
Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD
Orientador / Moderador

Prof. Ualfrido Del Carlo, Dr.
Examinador Externo

Prof. Maurício Roriz, Dr.
Examinador Externo



Prof. Roberto Lamberts, PhD



Prof.^a Vânia Ribas Ulbricht, Dr

MODELO VETORIAL ESFÉRICO PARA RADIOSIDADE APLICADO À ILUMINAÇÃO NATURAL

RESUMO

A presente tese estuda os modelos computacionais aplicados à solução da análise de iluminação, artificial e natural, em arquitetura e urbanismo, verificando suas principais aplicações e limitações, particularmente no estudo da iluminação natural direta e indireta, objeto de preocupação da tese. Propõe uma nova abordagem, através da geometria vetorial esférica, utilizando um referencial único constituído por um globo subdividido em parcelas discretizadas e um método de comparação de intervalos que permite solucionar, de forma eficiente, algumas das questões colocadas, particularmente na determinação da visibilidade. O método permite um tratamento simultâneo e unificado das abordagens da radiosidade e do *ray tracing*, viabilizando a incorporação das reflexões especulares às trocas luminosas difusas entre os elementos discretizados das superfícies de um projeto, independente do ponto de vista, o que abre perspectivas de pesquisas para aprimoramento de uma nova abordagem teórica.

Palavras Chaves: Iluminação Natural; Radiosidade; Ray Tracing; Computação Gráfica; Conforto Ambiental

ABSTRACT

The present thesis deals with computational models applied to lighting analysis solution, artificial and natural, verifying its main applications and limitations, specifically for studying direct and indirect natural light, main concern of the thesis. A new approach is proposed, through a spheric vectorial geometry, using a unique reference system composed by a globe subdivided in discretized parcels and a method to compare numeric intervals that allows to solve, by an efficient way, some discussed questions, specifically on visibility determination. The method provides a unified and simultaneous treatment of *radiosity* and *ray tracing* approaches, turning possible to incorporate specular reflection into diffuse luminous exchanges between discretized surface elements, viewpoint independent, creating new perspectives of research to improve a new theoretical approach.

Keywords: Natural Lighting; Radiosity; Ray Tracing; Graphic Computer; Environmental Confort.

Autor: Anderson Claro

Orientador: Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD - ARQ / UFSC
TESE DE DOUTORADO - DEZEMBRO / 1998

CLARO, Anderson. Modelo vetorial esférico para Radiosidade aplicado à Iluminação Natural. Florianópolis, 1998. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Curso de Pós - Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Defesa: 04/12/98

A presente tese estuda os modelos computacionais aplicados à solução da análise de iluminação, artificial e natural, em arquitetura e urbanismo, verificando suas principais aplicações e limitações, particularmente no estudo da iluminação natural direta e indireta, objeto de preocupação da tese. Propõe uma nova abordagem, através da geometria vetorial esférica, utilizando um referencial único constituído por um globo subdividido em parcelas discretizadas e um método de comparação de intervalos que permite solucionar, de forma eficiente, algumas das questões colocadas, particularmente na determinação da visibilidade. O método permite um tratamento simultâneo e unificado das abordagens da radiosidade e do *ray tracing*, viabilizando a incorporação das reflexões especulares às trocas luminosas difusas entre os elementos discretizados das superfícies de um projeto, independente do ponto de vista, o que abre perspectivas de pesquisas para aprimoramento de uma nova abordagem teórica.

Palavras Chaves: Iluminação Natural; Radiosidade; Ray Tracing; Computação Gráfica; Conforto Ambiental

ÍNDICE

Cap. I - COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	1
I.1 - A Iluminação Natural em Arquitetura e Urbanismo	1
I.2 - O Comportamento da Luz em Arquitetura e Urbanismo	2
I.3 - Contribuição da Computação Gráfica ao estudo da Arquitetura e Urbanismo e da Iluminação	3
I.4 - Proposição de Trabalho	6
Cap. II - EVOLUÇÃO DOS MODELOS	8
II.1 - Método <i>Ray Tracing</i>	8
II.2 - Método da Radiosidade	11
II.3 - O Hemi - Cubo	11
II.4 - O Método Monte Carlo	16
II.5 - Desenvolvimentos Posteriores	17
II.6 - A Luz Natural nos Modelos de Iluminação Global	21
Cap. III - ANÁLISE DOS MODELOS ESTUDADOS	26
III.1 - Algumas Questões Fundamentais	26
III.1.1 - Amplitude dos Modelos	26
III.1.2 - Visibilidade	27
III.1.3 - Singularidades	31
III.1.4 - Luz Natural	32
III.1.5 - Coerência entre as Estruturas de Dados	35
III.1.6 - Relação Custo X Benefício	35
III.2 - Aprofundamento do Hemi - Cubo	37
III.3 - Fator de Forma Via <i>Ray Tracing</i>	39
Cap. IV - UMA NOVA ABORDAGEM ATRAVÉS DE UM MODELO ESFÉRICO UNIFICADO	40
IV.1 - Uma Contribuição da Inteligência Artificial	41
IV.2 - Estrutura Geral dos Elementos do Modelo	48
IV.2.1 - O Globo Astronômico: um Referencial Único	48
IV.2.2 - O Projeto	52
IV.2.3 - A Abóbada Celeste	54
IV.3 - Funcionamento do Modelo	58
IV.3.1 - Projeção de um Polígono no Globo	63
IV.3.2 - Definição dos Vetores de Parcelas	76
IV.3.3 - Procedimento de Cálculo Passo a Passo	81
IV.3.4 - Comportamento dos Materiais	89

Cap. V - VERIFICAÇÕES E RESULTADOS	91
V.1 - Verificação Numérica	91
V.2 - Verificação Geométrica	99
V.3 - Verificação Global do Procedimento de Cálculo	114
V.3.1 - Valores de Energia	125
V.3.2 - Coerência na Distribuição da Energia	129
V.3.3 - Tempo de Processamento	154
Cap. VI - CONCLUSÕES	157
VI.1 - Validade do Modelo	157
VI.2 - Utilidade do Modelo	161
VI.3 - Desenvolvimento Futuro	163
BIBLIOGRAFIA	167

CAPÍTULO I - COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

I.1 - A ILUMINAÇÃO NATURAL EM ARQUITETURA E URBANISMO

"A Arquitetura é experimentada primeiramente pela visão."....

"O estágio inicial de qualquer experiência visual inclui um processo de orientação e formação de impressões espaciais. Isto é seguido pelo esquadramento de várias sugestões de informações, a feitura de comparações e o ordenamento de prioridades mentais. A experiência visual pode também incluir o processo de comunicação, envolvendo tanto a identificação visual das fontes de informação importantes quanto a subsequente reunião e processamento de informação quantitativa e qualitativa detalhadas. Finalmente, a visão interpreta movimento e graus (padrões) de mudança no ambiente circundante e portanto contribui à orientação espacial e movimento seguro dentro de um recinto." (Moore (1991)).

A iluminação natural vem recuperando aceleradamente sua importância na arquitetura. Milenarmente utilizada como principal fonte de luz nos ambientes, no último século foi crescentemente sendo relegada a segundo plano pela iluminação artificial.

No entanto, o aprofundamento do conhecimento sobre a importância na atividade humana bem como o crescente custo de fontes de energia, tem levado a uma revisão desta situação.

Esta relevância é sintetizada por Chichierchio (s/ data):

"Como se sabe, o desempenho do mecanismo da visão depende diretamente das condições de iluminação. O homem, muitas vezes, se contenta com um desempenho medíocre da luz - quando não dispõe de meios, ou conhecimentos, para atender às suas necessidades reais. Mas, a má iluminação, além de deteriorar a visão do homem, provoca uma queda de sua produção e aumenta o número de erros em qualquer atividade. De forma inversa, a garantia de boa iluminação provoca uma reação encadeada de aumento de produção no trabalho, além da melhora nos índices de erros e de acidentes.

Para iluminar um ambiente, utilizando-se os recursos naturais, artificiais, ou ambos, deve-se atender a vários requisitos quantitativos e qualitativos. Ocorre que muitas vezes os inconvenientes e imperfeições da iluminação artificial são aceitos sem contestação, quando ela tem apenas uma finalidade complementar à natural, aplicada em condições que não permitem alternativa. Quando pode ser feita a escolha, a iluminação natural deve ser escolhida. Ela é a que mais convém ao nosso tipo de visão. E se constitui num elo importante nos ambientes que fazem ligação dos meios externos (naturais) com meios iluminados artificialmente.

Além disso, a luz natural desempenha outras funções importantes para o homem além dos aspectos iluminantes: ela apresenta variações de qualidade e quantidade conseqüentes da movimentação aparente da fonte - o Sol - e das condições atmosféricas. Essas mudanças de direção, alterações de cor (indo do amarelado, alaranjados e vermelho nos crepúsculos, para o branco, ao meio-dia) ajustam-se à alternância dos dias e noites no controle de determinados ciclos vitais, que seriam completamente desorganizados se o indivíduo se submetesse exclusivamente à iluminação artificial."

O estudo da iluminação natural em arquitetura e urbanismo, no entanto, tem sido problemático, dado que envolve fenômenos complexos como a radiação difusa da abóbada e a incidência de radiação direta do Sol, variáveis de comportamento bastante diversificado ao longo de breves espaços de tempo. Com as disponibilidades computacionais restritas à época da formulação de modelos de análise, este problema foi bastante simplificado não só para viabilizar um tratamento computacional eficiente para os recursos de então, como também pelo fato de, nos países de origem destes modelos a contribuição da luz natural na arquitetura não ser tão significativa a ponto de dispensar soluções de iluminação artificial. Pode-se até cogitar o fato de tal contribuição estar sendo subestimada em função da complexidade de sua análise. No entanto, nossa realidade geográfica / meteorológica configura-se diferente, com possibilidade de desenvolvimento de uma concepção espacial onde a contribuição da luz natural seja significativa. Para tanto é necessária a utilização de um instrumental computacional específico, onde estas variações possam ser verificadas com flexibilidade e permitam cálculos com resultados mais precisos, que modelem de maneira mais adequada os fenômenos do trânsito solar no céu e das variações atmosféricas ao longo do dia e do ciclo anual.

I.2 - O COMPORTAMENTO DA LUZ EM ARQUITETURA E URBANISMO

De uma perspectiva física ampla, a luz corresponde a um pequeno intervalo intermediário de um espectro mais amplo de energia radiante, que vai dos raios gama às ondas de rádio. Neste espectro, cujo comprimento de onda vai de 10^{-12} até 3 metros, a luz visível está na faixa de 0,4 a 0,7 microns (= 10^{-6} metros). Podemos situar a luz visível dentro de um intervalo maior, que é o da radiação térmica, compreendido entre cerca de 10^{-7} a 10^{-4} metros, incluindo os raios ultravioletas de maior comprimento de onda, bem como porção significativa dos raios infravermelhos (Moore (1991)).

Imaginando-se um fluxo radiante em uma direção, quando atinge uma determinada superfície, parte do fluxo é refletido, parte absorvido pelo material. Dependendo das características do material, da geometria do componente e das características da superfície, há maior ou menor reflexão ou absorção pelo material, sendo que parte da energia absorvida pode ser novamente irradiada pelo material, como por exemplo a parte da luz que atravessa um vidro de janela.

Um mesmo material comporta-se de forma diferenciada quando exposto a radiações de diferentes comprimentos de onda. O "efeito estufa" da atmosfera terrestre, por exemplo, é resultado de sua alta transparência aos comprimentos de onda menores

da radiação solar e de sua opacidade aos comprimentos maiores que emanam da maioria das superfícies terrestres.

No espectro da radiação térmica temos o impacto mais significativo na arquitetura e urbanismo, pelo menos nos aspectos mais sensíveis da luz e do calor.

É importante notar que a exposição dos materiais construtivos ao espectro diferenciado das radiações térmicas não tem efeito apenas nas trocas de energia, mas na própria característica dos materiais, como por exemplo a variação dimensional, ou mesmo a deterioração molecular, como no caso do ressecamento dos plásticos.

Centraremos nossa atenção no espectro da luz visível, tendo em conta que o estudo da radiação térmica em arquitetura e urbanismo também poderá ser beneficiado, no futuro, pelos conceitos desenvolvidos neste trabalho.

Moore (1991) caracteriza alguns aspectos do comportamento da luz na elaboração do que define como "um modelo conceitual para o projeto". Refere-se a uma abordagem do comportamento da luz que denomina "**fonte-caminho-alvo**" (Figura I.1), onde, determinadas as posições da fonte e do alvo, um raio, representado por flecha, é traçado. Este modelo propicia uma base adequada para a compreensão intuitiva apenas quando a luz emana de uma fonte pontual e o percurso é especular (vidro transparente ou espelho, por exemplo). No entanto, para o comportamento da luz difusa, que emana em diferentes direções ao longo de uma superfície (o céu nublado ou uma superfície áspera, por exemplo) (Figura I.2), a abordagem é inadequada. Propõe uma abordagem baseada na relação "**Luminância x Tamanho Aparente**".

"De sorte a desenvolver uma alternativa trabalhável, primeiro consideraremos "iluminação" como uma função das áreas de brilho que podem ser "vistas" pelo alvo ou receptor. A base desta abordagem é que a quantidade de luz no alvo é resultado da exposição a todas as superfícies brilhantes e escuras dentro da vista do alvo. Mais precisamente, a contribuição de luz para a iluminância do alvo é o produto da luminância de uma particular fonte, multiplicada por seu tamanho aparente como visto pelo receptor". (Figura I.3).

Este conceito não diferencia várias fontes; por exemplo, um céu nublado visto através da janela de uma parede contribui com a mesma qualidade e quantidade de luz para um receptor que uma superfície da parede, assumida igual luminância, cor e tamanho aparente. A contribuição depende também do ângulo formado entre as normais às superfícies emissora e receptora, chamado efeito coseno.

I.3 - CONTRIBUIÇÃO DA COMPUTAÇÃO GRÁFICA AO ESTUDO DA ARQUITETURA E URBANISMO E DA ILUMINAÇÃO.

O grande interesse pelas possibilidades que a computação abriu, a partir da década de 70, na visualização de imagens, aliado ao processo de difusão de computadores com velocidades e capacidades de memória cada vez maiores, bem como dispositivos de visualização de alta resolução, ampliaram significativamente o interesse

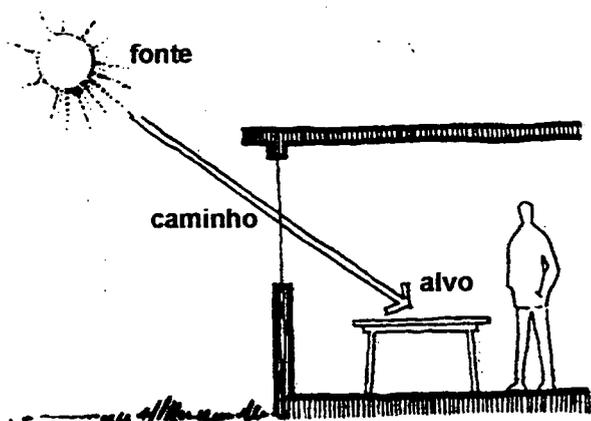


Figura I.1 - Modelo conceitual "fonte - caminho - alvo" em caminhos claros, adequado ao estudo dos percursos de comportamento especular. (Moore (1991)).

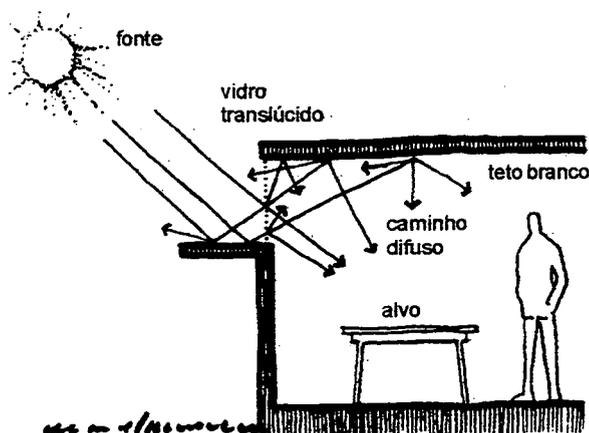


Figura I.2 - Modelo conceitual "fonte - caminho - alvo" aplicado a caminhos difusos (vidro leitoso ou superfície pintada), gera uma confusa dispersão de flechas, dificultando a análise. (Moore (1991)).

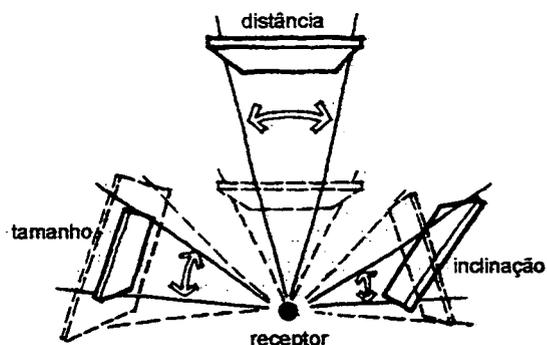
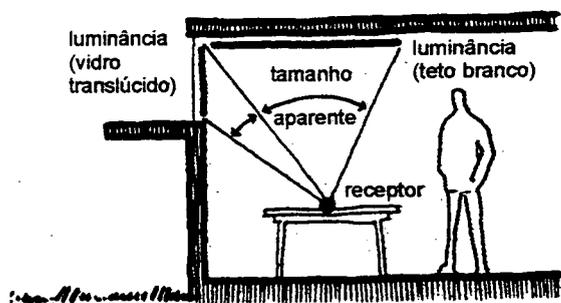


Figura I.3 - Uma alternativa trabalhável ao modelo conceitual "fonte - caminho - alvo" é a abordagem da "luminância X tamanho aparente", onde o tamanho aparente da superfície luminosa é função da distância, do tamanho e da inclinação da superfície (Moore (1991)).

de programadores e empresas de programas pelos fenômenos lumínicos e suas representações. Impulsionada pela diversidade de mercados e demandas, a computação gráfica ganhou lugar de destaque, principalmente por seu impacto nos meios de comunicação de massa.

Cresceu também a demanda por ferramentas profissionais em diferentes setores de projeto e de produção, inclusive na arquitetura e urbanismo.

Sem dúvida nenhuma as grandes vedetes deste processo foram os editores gráficos para projeto, consagrados pela sigla CAD (Computer Aided Design - ou Projeto Assistido por Computador). Desenvolvidos para auxiliar a construção gráfica de diferentes tipos de projeto, estes programas evoluíram rapidamente dos algoritmos bi-dimensionais aos tri-dimensionais. Telas de maior resolução dimensional e de cores, maiores velocidades de processamento, além particularmente da evolução dos periféricos (impressoras, traçadores gráficos, etc), e o que é mais importante, a grande queda dos preços, tornaram praticamente sinônimos CAD e aplicação de computadores em arquitetura e urbanismo. Desenvolvimentos mais recentes ampliaram as possibilidades nas áreas de especificações / orçamentos, sensoriamento remoto, mapeamento, síntese de imagens. Atualmente há grande disponibilidade de editores gráficos dedicados a grupos específicos de projeto, inclusive arquitetônico, com diferentes tipos de bibliotecas de objetos pré-projetados, rotinas programadas auxiliares (conhecidas como macro-comandos, ou simplesmente macros), que ampliam em muito o potencial destes programas em apoiar projetos. O programa Arris (plataforma Unix), por exemplo, contém os objetos "parede" e "porta" pré-definidos, e permite a inserção da porta na parede desde que esta possa conter aquela, seja dimensionalmente, seja quanto à inserção (inserir a porta no canto, ultrapassando os limites da parede), bem como verifica a coerência de dimensões (paredes com altura zero, erro bastante comum). Outros programas, como o AutoCAD e o MacroStation, permitem a construção de macros específicos, inclusive oferecendo módulos já prontos para projeto arquitetônico.

Incorporados a estes editores foram gradativamente sendo desenvolvidos mecanismos de visualização, diferentes da linguagem técnica de "representação para a produção", com a finalidade de permitir melhor apreensão do resultado final dos projetos, principalmente visualizando-se.

A representação de imagens, consagrada pelo termo "**rendering**" (que também significa conferência, interpretação, tradução), constituiu vertente própria na computação gráfica, inclusive pelo interesse de aplicação em outras áreas onde a síntese de imagens era economicamente muito mais atraente, como a televisão e o cinema.

Com o desenvolvimento de modelos físicos de melhor fundamentação no estudo do comportamento da luz, ampliou-se o interesse pela utilização destes modelos no estudo das condições de iluminação de ambientes no contexto de desenvolvimento de projetos arquitetônicos e urbanos. No entanto, tal utilização ainda não se verificou em termos práticos, dada a complexidade das abordagens vigentes, particularmente quando incorporamos ao estudo do ambiente construído a componente direta (Sol) e indireta (luz da abóbada) da iluminação natural. A busca dos modelos fisicamente fundamentados para apoio ao projeto arquitetônico, no entanto, encontra dificuldades nos métodos atuais dado que não se trata apenas de uma questão de representação de imagens, mas de verificação de condições reais (ou aproximadamente reais) de utilização.

I.4 - PROPOSIÇÃO DE TRABALHO

Como discorreremos neste trabalho, existem atualmente duas abordagens para o tratamento da iluminação em computação gráfica que decorrem de modelos desenvolvidos por pesquisadores das áreas da física atinentes aos fenômenos da radiação térmica e lumínica: o método da radiosidade (“*radiosity*”) e o método da perseguição ao raio (a que nos referiremos como “*ray tracing*”, termo que consagrou o método).

O método da radiosidade analisa as trocas de energia luminosa entre superfícies consideradas perfeitamente difusas (que distribuem a luz refletida igualmente em todas as direções) e geralmente é tratada por métodos de elementos finitos; o *ray tracing*, por outro lado, analisa o percurso de uma partícula luminosa, seja de sua emissão até sua absorção, seja vice-versa, sendo aplicado com particular êxito na análise dos fenômenos especulares das trocas luminosas. O primeiro pode ser genericamente considerado um método de abordagem ampla, que trata o modelo como um todo, trabalhando a partir da definição de suas propriedades geométricas e físicas; o segundo é um método de abordagem localizada, dependente do ponto de observação do modelo, tendo maiores características de abstração espacial.

Ambos os métodos tratam o que é denominada “iluminação global”, que envolve os diferentes tipos de comportamento da luz frente aos diferentes meios do ambiente, como será visto adiante.

No capítulo II percorreremos na literatura o desenvolvimento destes dois modelos com suas principais características, derivações e aprimoramentos, bem como suas principais deficiências.

No capítulo III analisaremos estes modelos no sentido de compreender suas maiores limitações quanto ao tratamento da iluminação global em ambientes complexos como os arquitetônicos e urbanos, particularmente no tratamento da iluminação natural. Como veremos nesse capítulo, o estudo dos “modelos” ou “cenários” reais são bastante trabalhosos e constituem campo em aberto. É reconhecido que ambos os métodos tratam parcialmente aspectos diferenciados dos fenômenos lumínicos, tendo ambos dificuldade em tratar aspectos que não os especulares ou difusos, como é o caso da difusão direcional, que constitui característica bastante comum nas superfícies reais. É reconhecido também que há necessidade e esforços no sentido que ambos os métodos convirjam no tratamento da iluminação global, o que vem sendo buscado através de modelos chamados híbridos (radiosidade com segundo passo *ray tracing*, ou *ray tracing* com aproximações locais de radiosidade), que no entanto não têm obtido resultados plenamente satisfatórios. As dificuldades são relativas a modelagem dos ambientes (ou cenários), determinação de visibilidade, tratamento de superfícies e objetos de características lumínicas intermediárias, movimentação de objetos no modelo e incorporação da abóbada celeste e do Sol como elementos do modelo.

No capítulo IV desenvolveremos a proposta deste trabalho, voltada para uma aplicação destinada ao estudo da iluminação natural em arquitetura e urbanismo e que se fundamenta nas seguintes premissas:

a) A metodologia de análise do fenômeno luminoso denominada **iluminação global** não é, do ponto de vista prático, operacional, uma metodologia de aplicação universal. Embora manipule os conceitos de difusão, reflexão, refração, transmissão e absorção da energia luminosa em diferentes níveis, sua aplicação é fortemente condicionada pelo tipo de finalidade da tarefa: projetar a iluminação de um ambiente arquitetônico é, em termos práticos, diferente de sintetizar a imagem de uma bola de vidro saltitando sobre uma caixa de espelhos em um ambiente virtual, ou visualizar fotorealisticamente um buda de ouro, ou uma animação ambientada em cenários virtuais de histórias em quadrinhos.

b) A aplicação de uma metodologia de iluminação global no apoio ao projeto arquitetônico que priorize a luz natural deve, necessariamente, ter uma fundamentação física adequada que permita, no mínimo, aproximações úteis, em termos de projeto, no sentido de verificar condições de uso próximas à nova realidade que se edificará; deve também, necessariamente, centrar sua atenção na iluminação natural.

A partir destas premissas delineamos uma hipótese de trabalho que se fundamenta nas seguintes idéias básicas:

a) Estabelecer um referencial de análise o mais unificado possível, que possibilite um referencial espacial consistente na análise do modelo.

b) Colocar o céu como elemento principal nesse espaço de referência.

c) Unificar alguns aspectos conceituais dos métodos analisados não da perspectiva de uma soma (justaposição) de procedimentos, mas de uma redefinição de algumas abordagens da perspectiva de um referencial espacial único.

d) Eliminar o máximo possível de acidentalidades nos procedimentos de cálculo buscando uma eficiência, na manipulação deste problema complexo, no mínimo aceitável do ponto de vista do projeto arquitetônico, na relação custo X benefício (tempo, memória X resultados obtidos).

A reunião destas idéias em uma metodologia de finalidade específica constitui abordagem inédita que abre novas perspectivas para o tratamento da iluminação natural em arquitetura e urbanismo, como pretendemos demonstrar.

No capítulo V são apresentados os resultados e verificações obtidos com o modelo no estágio atual. No capítulo VI são apresentadas as conclusões e as considerações sobre o desenvolvimento futuro do modelo e suas aplicações.

CAPÍTULO II - EVOLUÇÃO DOS MODELOS

“Pesquisadores gráficos têm geralmente aproximado as regras fundamentais da ótica e da radiação térmica, seja para simplificar computação, seja porque modelos mais acurados não são conhecidos na comunidade gráfica. Conseqüentemente, muitos dos modelos de iluminação e sombreamento tradicionalmente usados em computação gráfica incluem uma multiplicidade de truques, artimanhas e simplificações que não têm firme fundamentação teórica, mas que trabalham bem na prática”. (Foley et al.(1993)).

A problemática básica da computação gráfica na representação de espaços tridimensionais é a reconstituição (“*rendering*”) em uma figura bidimensional de um determinado cenário fictício visto de uma determinada posição e sob certas condições.

Até início da década de 70 a questão da iluminação do cenário (condição *sine qua non* da visualização) era tratada em termos de três componentes: a) uma **luz ambiente**, de intensidade e características intrínsecas a cada objeto da cena; b) uma **luz difusa** caracterizada pela reflexão difusa de luz incidente no objeto, denominada reflexão Lambertiana (Foley et al. (1993)); c) uma **atenuação atmosférica** relacionada com o efeito das características da massa de ar entre observador e objeto, de forma que objetos mais distantes são reconstituídos com menos intensidade nos componentes anteriores.

Em 1975 Phong Bui - Tuong (apud Foley et al. (1993)) incorpora o tratamento da reflexão especular e o tratamento de sombras, sendo que em 1983 Warn (apud Foley et al. (1993)) trata as fontes com emissão diferenciada segundo as diferentes direções. A década de 80 vai ser marcada pelo desenvolvimento dos modelos de maior consistência na fundamentação física: o método “**Ray - Tracing**” (que pode ser traduzido por **perseguição ao raio**) e o método **Radiosity** (que foi traduzido como **radiosidade**).

II.1 - MÉTODO RAY-TRACING

O método Ray-Tracing pode ser resumido como a perseguição ao traçado (ou pista) deixado por um determinado raio luminoso. O conceito básico é que o observador vê um ponto em uma superfície como resultado da interação entre a superfície, naquele ponto, com os raios emanados de qualquer lugar na cena, seja através da iluminação direta de uma fonte, seja por reflexão ou refração na incidência sobre outras superfícies.

Usado pela Apple Co. em computação gráfica a partir de 1968 apenas na determinação do ocultamento de superfícies em sistemas gerais de reconstituição (“*rendering*”) de imagens tridimensionais, o método parava após a interseção do raio com a primeira superfície. Apenas em 1979 é desenvolvido o primeiro uso do Ray-Tracing para um traçado além da interseção raio / superfície inicial, incorporando reflexão, refração e sombras (Watt (1990), Foley et al. (1993)).

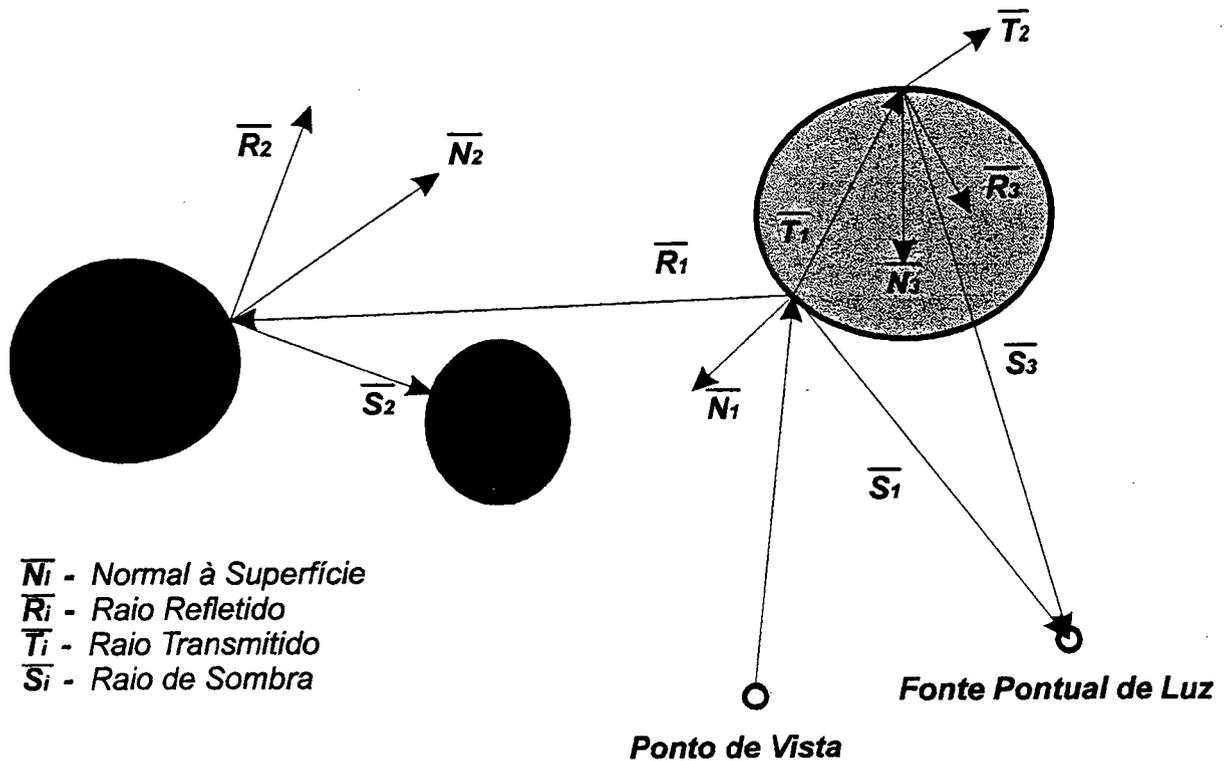


Figura II.1.a: Representação de um conjunto de raios gerados recursivamente a partir de um raio que parte do ponto de observação, constituídos por raios refletidos, transmitidos e raios de sombra, estes lançados em direção à fonte luminosa para verificação de exposição ou obstrução (Foley *et al.* (1993)).

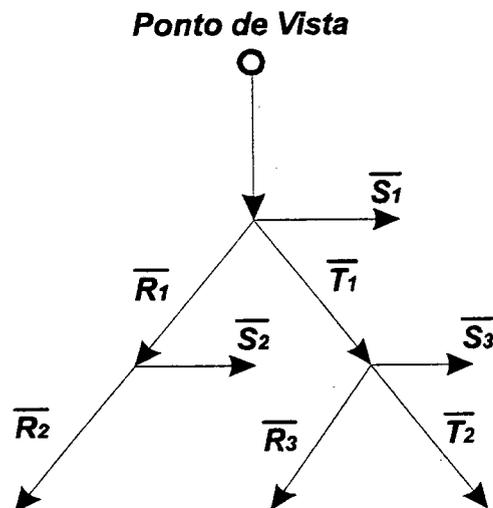


Figura II.1.b: Representação da árvore de raios da figura II.1.a, gerados recursivamente a partir de uma direção; esta representação deve ser construída para cada raio que parte do ponto de observação e que está contido no campo de visualização da cena (Foley *et al.* (1993)).

A partir da concepção inicial, a abordagem conhecida como Ray-Tracing Recursivo considera o raio que **parte** do olho do observador para um determinado ponto (pixel) na tela, analisando um componente refletido, um componente transmitido e um componente de sombra, gerando, para um determinado raio, uma “árvore” de raios, perseguidos em níveis sucessivos de aprofundamento quanto aos três componentes de cada raio (Figura II.1). Esta análise é detalhada através de um método conhecido como **quadtree**, uma representação hierárquica de quatro descendências (raios refinantes) para cada nó gerador da estrutura (raios a serem refinados), sendo geralmente utilizada nos métodos de hierarquização. Consiste basicamente de, partindo de um determinado elemento quadrangular, estabelecer sucessivas sub-divisões em quatro partes, até que se consiga, com diferentes níveis de granularidade, representar um determinado polígono irregular através de vários elementos de diferentes níveis da hierarquia em várias posições, como exemplificado na Figura II.2. Esta abordagem partindo do observador permite uma significativa redução computacional, dado que dispensa, segundo o nível de profundidade de análise, a consideração dos raios emitidos por superfícies ou fontes que não tenham grande influência no resultado final da visualização.

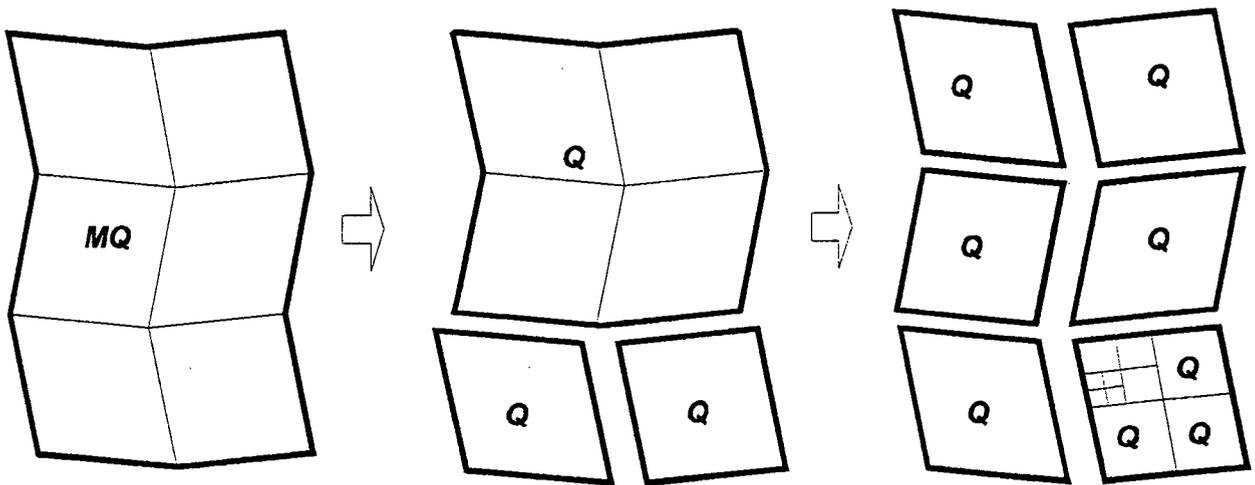


Figura II.2: Representação de um procedimento de subdivisão de uma malha quadrangular (MQ) em um conjunto de quadrados (Q), que em um passo seguinte são divididos pelo método de **quadtree** (Sillion *et al.* (1997)).

O método Ray Tracing Distribuído, desenvolvido em 1984 por Cook, Porter e Carpenter (apud Foley *et al.* (1993)) estabelece uma grade de pontos pelo método estocástico, que permitirá o estabelecimento de uma amostragem de raios capaz de moldar cenários de maior complexidade. Apenas em 1989 Mammen (apud Watt (1990)) descreve como reconstituir adequadamente objetos transparentes na ordem de trás para frente, em um sistema baseado em “z - buffer” (algoritmo de análise de profundidade implementado em *hardware*), através da utilização de múltiplos passos de reconstituição e de memória adicional.

II.2 - MÉTODO DA RADIOSIDADE

A partir da segunda metade da década de 80, um novo contexto teórico é introduzido no estudo da computação gráfica. Até então, a reflexão difusa fora tratada discretamente nos modelos de iluminação, dada a sua complexidade, com algumas abordagens na relação fonte / objeto; as interações luminosas difusas objeto / objeto não foram tratadas.

O impacto das imagens obtidas pelo método *ray tracing*, no entanto, não evitaram a chamada "assinatura *ray-tracing*" (Watt (1990)). Sendo então o método mais completo para lidar com modelos de iluminação / reflexão / transmissão especular, revelava-se incapaz de modelar acuradamente os efeitos da iluminação ambiental global.

Considerando que a maioria das superfícies em um ambiente real são refletoras difusos, Cohen *et al.* (1985) propõem um método para o tratamento destas superfícies nos modelos computacionais de visualização gráfica. Buscando fundamentação teórica em métodos desenvolvidos para determinar a troca de energia em "ambientes fechados" apresentados por Siegel *et al.* (apud Cohen *et al.* (1985)), e apoiando-se no modelo delineado por Goral *et al.* (apud Cohen *et al.* (1985)) para implementação computacional da interação de luz entre superfícies difusas, propõem um método que será amplamente difundido, apresentado como **hemi - cubo**, simplificando bastante o tratamento da luz difusa na computação gráfica.

II.3 - O HEMI - CUBO

O tratamento da luz difusa foi proposto através da incorporação do método da **radiosidade**. Este método consiste em um cálculo matricial que descreve, em interações sucessivas, um equilíbrio no balanço de energia radiante no interior de um ambiente.

Segundo Cohen *et al.* (1985) :

"A luz que deixa uma superfície (sua radiosidade) consiste da luz própria emitida e da luz incidente que é refletida ou transmitida. A soma da luz que chega a uma superfície requer uma completa especificação das relações geométricas entre todas as superfícies refletoras e transmissoras, bem como da luz deixando todas as outras superfícies."

Esta relação é dada por:

$$B_i dA_i = E_i dA_i + R_i \int_j B_j F_{ij} dA_j \quad (\text{fórmula II.1})$$

Onde B_i é a radiosidade associada a um elemento de área A_i ; E_i é a emissividade de A_i , e sua energia refletida é dada pela refletividade da parcela A_i multiplicada pela fração da radiosidade da parcela A_j , dada pelo Fator de Forma F_{ji} , que determina a fração de energia deixando a parcela A_j que chega à parcela A_i . A integral (\int) aplica-se sobre todas as parcelas A_j do ambiente. R_i é a fração da luz incidente que é refletida pela superfície em todas as direções.

Para um ambiente discreto a integral pode ser substituída por uma soma e radiosidade constante é assumida sobre todas as pequenas parcelas discretas. O input

inicial de energia é dado pelas parcelas com emissão inicial diferente de zero, conforme a fórmula:

$$B_i = E_i + R_i \cdot \sum_{j=1}^n B_j \cdot F_{ij} \quad (\text{fórmula II.2})$$

O cálculo da Radiosidade é feito em interações sucessivas, até que se atinja um índice de variação inferior a um valor pré-estabelecido.

O maior problema consiste no cálculo do **Fator de Forma**, que deve ser calculado para cada parcela tomada como receptora em relação a todas as outras consideradas como emissoras.

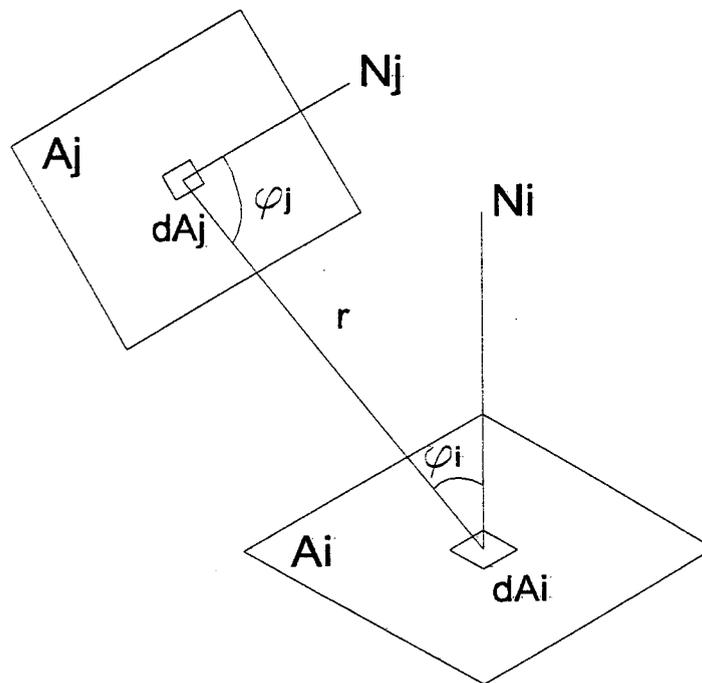


Figura II.3: Geometria do fator de forma para duas parcelas *i* e *j* (após Goral *et al.*, apud Cohen *et al.* (1985)).

O fator de forma é função apenas da geometria do conjunto. Consideradas as parcelas A_i e A_j composta de elementos de área menor dA_i e dA_j , conforme a Figura II.3, o fator de forma depende da orientação relativa entre as parcelas, e da distância entre elas, e é dado pela energia radiativa deixando a superfície A_i e atingindo A_j diretamente, dividida pela energia radiativa deixando a superfície A_i em todas as direções no espaço hemisférico que circunda A_i . É dado, segundo Watt (1990), pela fórmula:

$$F_{A_i A_j} = F_{ij} = (1/A_i) \cdot \int_{A_i} \int_{A_j} ((\cos \varphi_i \cdot \cos \varphi_j) / (\pi \cdot r^2)) \cdot dA_i \cdot dA_j \quad (\text{fórmula II.3})$$

Como A_j pode ser total ou parcialmente invisível de A_i , a integral deve ser multiplicada por um fator binário de ocultação que estabelece se dA_i pode ver dA_j ou não.

Esta integral dupla é de resolução muito difícil na prática. Cohen *et al.* recorrem ao modelo de Nusselt (Cohen (1985)) que estabelece um método analítico para cálculo do fator de forma. Considerando-se um hemisfério de raio unitário centrado em uma parcela discreta, o fator de forma de uma superfície visualizada é obtido projetando-se esta no hemisfério segundo o centro deste, formando um ângulo sólido que, multiplicado pelo cosseno do ângulo formado entre o centro da parcela e a normal do plano, expressa o fator de forma da superfície em relação ao centro do hemisfério. O valor pode ser obtido através de uma segunda projeção da superfície visualizada, desta vez tomando-se sua projeção no hemisfério e projetando-a ortogonalmente sobre o círculo que serve de base ao hemisfério. O fator de forma é então expresso pela razão entre a área desta segunda projeção e a área do círculo unitário correspondente à projeção do hemisfério. Observam a possibilidade de dividir o hemisfério em pequenas parcelas que, somadas, podem expressar o fator de forma de uma figura maior projetada sobre elas, mas **consideram que a dificuldade de criar elementos de igual tamanho em uma esfera, bem como criar um conjunto de coordenadas lineares para descrever unicamente posições na sua superfície, tomam esta abordagem impraticável** (retomaremos esta consideração na definição de nosso modelo). Partem então do pressuposto que diferentes parcelas de superfície em diferentes posições e distâncias, quando observadas de uma direção podem ter idênticos fatores de forma, comparadas à esfera unitária. Esta abordagem lhes permite substituir o hemisfério unitário pela metade de um cubo unitário, que denominam **hemi - cubo**.

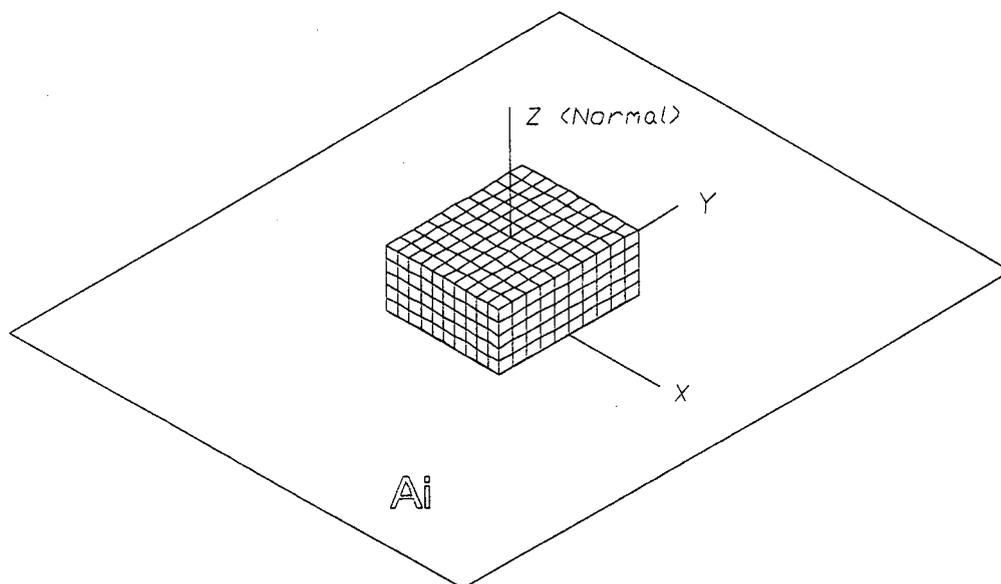


Figura II.4 : Hemi - cubo dividido em *pixels* colocado no centro da parcela *i* (segundo Cohen *et al.* (1985)).

O hemi - cubo consiste em um sistema de referência local, que é colocado com sua origem no centro da parcela receptora, suficientemente discretizada, com os eixos x e y coincidentes com o plano que contém a parcela, e o eixo z perpendicular ao ponto central da parcela. A este sistema é acoplada a metade de um cubo onde meia aresta equivale a 1, centrado na origem dos eixos e com faces paralelas e perpendiculares aos três planos de coordenadas. As faces do hemi - cubo são então subdivididas em

elementos quadrados menores e uniformes (cada elemento é denominado *pixel*), conforme representado na Figura II.4, segundo o desenho descrito por Cohen *et al.* (1985).

A projeção de uma determinada parcela visualizada do centro do hemi - cubo assinala em suas faces um conjunto de *pixels*. Estes pixels podem ter seus fatores de forma pré-calculados, obtendo-se então o fator de forma da parcela visualizada através da soma dos fatores de forma dos *pixels* assinalados no hemi - cubo por sua projeção.

Localizado o hemi - cubo em uma parcela, todas as outras são nele projetadas de tal forma que quando duas parcelas ocupam o mesmo pixel, suas distâncias são comparadas, prevalecendo a que se encontra mais próxima, num procedimento similar ao *z-buffer*. Computado para a parcela central do hemi - cubo o fator de forma de todas as outras, o hemi - cubo é reposicionado em outra parcela, repetindo-se o procedimento para todas as parcelas do ambiente.

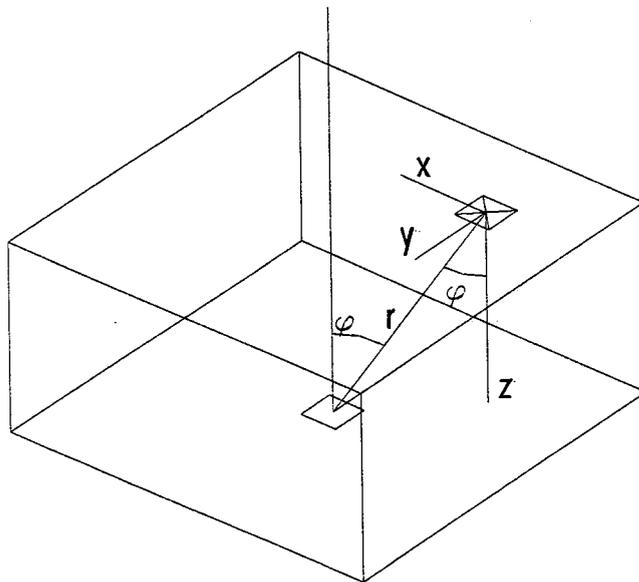


Figura II.5 : Geometria de um delta fator de forma de um pixel dA situado no topo do Hemi - Cubo (segundo Cohen *et al.* (1985)).

O hemi - cubo é cortado por planos de recorte constituídos pelos planos que passam pelas arestas e pelo eixo a elas paralelo, planos que contêm pontos que mantêm relações do tipo $Z = X$; $Z = -X$; $Z = Y$; $Z = -Y$, úteis na definição da pertinência das projeções a cada face do hemi - cubo, como será visto mais detalhadamente adiante (Cap. III). Desta forma, a geometria do fator de forma de um *pixel* situado no topo do hemi-cubo, conforme a Figura II.5, pode ser obtida através da fórmula:

$$\Delta FF = (\cos\phi_i * \cos\phi_j * \Delta A) / (\pi * r^2) \quad (\text{fórmula II.4})$$

onde:

$$r^2 = x^2 + y^2 + 1$$

$$\cos\phi_i = \cos\phi_j$$

$$\cos\phi = 1 / r$$

resultando ao final uma fórmula simplificada para a posição (x,y) no topo equivalente a:

$$\Delta FF_{xy} = \Delta A / [\pi * (x^2 + y^2 + 1)] \text{ (fórmula II.5)}$$

Similarmente são deduzidas as fórmulas para parcelas situadas nas faces X e Y do hemi-cubo.

Este primeiro modelo, que analisava cada parcela como receptora frente a todas as outras como emissoras, implicava em um processamento de N x N elementos, considerando N o número de parcelas no ambiente discretizados.

A grande vantagem apontada para a radiosidade é o fato de ser um modelo que relaciona a geometria entre os objetos do ambiente independente do ponto de vista do observador, permitindo que os dados de luminância das superfícies sejam utilizados na construção da imagem (“rendering”) segundo diversos pontos de vista sem necessidade de efetuar o recálculo da iluminação global. Através de tabelamento dos fatores de forma dos *pixels* do hemi - cubo, otimiza-se o tempo de processamento à custa de memória.

Em trabalho posterior Cohen *et al.* (1988) propõem o método do **Refinamento Progressivo**, que muda a abordagem inicial da radiosidade de forma a permitir maior eficiência do modelo. Partindo da relação de reciprocidade dos fatores de forma, expressa pela fórmula:

$$F_{ij} * A_i = F_{ji} * A_j \text{ (fórmula II.6)}$$

os autores propõem uma abordagem não pela parcela de superfície que recebe a energia, mas pela parcela que **emite** a energia luminosa. Considerando-se o elemento que recebe, a proposição anterior analisava todo o seu contexto para saber a contribuição recebida, que podia inclusive ser muito pouco significativa no contexto do ambiente, bem como examinar-se todas as parcelas emissoras para que se tivesse o resultado da energia recebida pela parcela em um ciclo de interações. Vários ciclos de interações podiam ser necessários até que mudanças significativas na situação de luminosidade das parcelas fosse verificada.

Partindo-se do princípio da emissão a questão pode ser bastante simplificada: se tomarmos como primeira parcela a ter a emissão analisada aquela que tiver maior radiosidade inicial (como uma fonte de luz, p. ex.), a distribuição da energia que ela emite sobre todas as outras restantes pode ser feita em apenas uma rodada de interações, o que, dependendo da participação desta parcela emissora no total da emissão inicial de energia, pode apresentar visualizações bastante aproximadas do resultado já a partir de um primeiro ciclo de interações. Num passo seguinte, nova parcela de radiosidade significativa é tomada e outro ciclo de interações é feito com ela como emissora. Desta forma, o resultado é obtido em N X M interações, onde N representa o número de parcelas totais, e M o número de parcelas tomadas como emissoras para o resultado

esperado, representando o número de ciclos de N interações feitos para cada parcela emissora. O resultado pode ir sendo visualizado a cada ciclo de interações.

II.4 - O MÉTODO MONTE CARLO

O método **Monte Carlo** é uma forma de *ray - tracing* no qual uma amostra estatística é tomada do conjunto de todas as possíveis direções de raios, conforme descrito por P. R. Tregenza em 1983 (apud Tregenza (1993)).

Segundo Tregenza (1993), o método pode ser usado para determinar coeficientes de luz diurna para interiores complexos tomando em consideração tanto geometrias irregulares quanto reflexões não Lambertianas:

“O método pode ser visto como o cálculo repetitivo do percurso de uma partícula de sua emissão por uma fonte de luz até sua eventual absorção. Na emissão, e a cada estágio de reflexão ou transmissão quando o percurso altera, a direção computada de uma partícula é determinada por um número aleatório escalado pela probabilidade de distribuição que descreve o processo físico. Cada partícula carrega um “peso” proporcional à intensidade correspondente ao raio. Este é reduzido a cada reflexão e durante a transmissão através de um meio atenuante. Enquanto o percurso de uma partícula é modelado, a cada interseção com uma superfície, o peso da partícula é adicionado ao contador da superfície. Quando o peso de uma partícula cai abaixo de algum valor arbitrário pequeno, o raio é tido como absorvido, e o processo repetido com a emissão de uma nova partícula. Diferentes categorias de peso podem representar intensidades em diferentes dimensões de cor. O processo é repetido muitas vezes. A iluminância em uma superfície, em relação ao fluxo total saído de uma lâmpada ou zona do céu, é dado finalmente pelo número de partículas recebidas por unidade de área da superfície em comparação com o número total de partículas emitidas.”

A estrutura geométrica para os cálculos do método Monte Carlo pode ser idêntica à descrita para os métodos de elementos de área finita. A vantagem do método Monte Carlo é que formas edificadas complexas podem ser modeladas mais simplesmente que com métodos de área finita, e a quantidade de armazenagem de dados requerida cresce linearmente com o número de elementos, antes que aproximadamente com o quadrado do número. A desvantagem do método Monte Carlo é que o tempo de processamento pode ser significativamente maior.

O método Monte Carlo também pode ser utilizado para determinar fatores de forma. Wallace *et al.* (1989)(apud Foley *et al.* (1993)) propõem um método para aplicação do *ray - tracing* na determinação de fatores de forma para o cálculo da radiação progressiva. Uma amostragem de raios em um hemisfério é colocado sobre o centro da parcela e o percurso de cada raio analisado na interseção com o plano de cada parcela receptora. O fator de forma correspondente a cada raio, que pode ser pré-calculado desde que a amostragem corresponda a um hemisfério local ao plano da parcela emissora, é computado em função da parcela receptora mais próxima (a visível) interceptada pelo raio. O fator de forma pode ser calculado, para cada raio, através do método do ângulo sólido gerado por um disco de área equivalente ao ângulo sólido gerado pela porção visível da superfície interceptada.

II.5 - DESENVOLVIMENTOS POSTERIORES

Os trabalhos de Cohen *et al.* (1985) (1988) e de Wallace *et al.* (ref1989) vão constituir-se em referência presente praticamente em todos os desenvolvimentos posteriores dos modelos de iluminação global.

A partir destas duas abordagens, do hemi-cubo e do ray-tracing, a radiosidade vai ser incorporada à computação gráfica através de sucessivas contribuições no sentido de corrigir deficiências e aumentar a eficiência destes métodos.

Em 1989 Baum *et al.* (1989), descrevem os erros fundamentais (Figura II.6) inerentes ao método do hemi-cubo:

a) erros devidos à **proximidade e posicionamentos relativos**: superfícies com fronteiras comuns têm o fator de forma falseado pelo método em zonas muito próximas à fronteira; o fator de forma varia não só quanto à posição em relação às faces (no Zenit do hemi-cubo, na aresta ou na base) como também quanto à orientação da normal do plano que contém a parcela projetada (radial, paralela ou perpendicular à normal receptora), para o qual propõem uma abordagem numérica quando detectada uma singularidade.

b) erros devidos à **visibilidade**: como a análise é feita considerando-se o centro de cada parcela de elemento finito, a parcela será aceita ou descartada totalmente, sem situações intermediárias. Este fato pode gerar distorções significativas, como por exemplo o descarte de fontes luminosas com impacto significativo no contexto. Propõem uma divisão sucessiva dos elementos até que se possa caracterizar com precisão a visibilidade de alguns elementos particulares, como as fontes.

c) erros devidos ao **falseamento**: devido à resolução finita do *pixel*, diferentemente dos valores variáveis da projeção da parcela, provocando uma aproximação a maior ou a menor. Estes erros podem ser atenuados com uma maior resolução do hemi-cubo.

Propõem um algoritmo onde o hemi-cubo é utilizado até que se detecte (não informa o método de detecção) o que denominam de "violações às suposições fundamentais" que levam aos erros descritos. Nestas circunstâncias um método analítico de avaliação do fator de forma é utilizado. O algoritmo proposto resolve a integral externa do cálculo do fator de forma através do método numérico, enquanto a integral interna é avaliada analiticamente.

Ainda em 1989 Sillion e Puech (1989) propõem um método geral em dois passos para integrar reflexão difusa e especular. Neste modelo utilizam uma extensão do método de Wallace, com um novo método de amostragem de raios para cálculo dos fatores de forma como alternativa ao hemi-cubo. Introduzem um **operador de reflexão** que permite o estabelecimento de um estudo das reflexões após o passo de difusão.

Em 1991 Hanrahan *et al.* (1991)(apud Foley *et al.*(1993) propõem um algoritmo para **Radiosidade Hierárquica Rápida** que será detalhado posteriormente por Auperle (1993). Referenciando o hemi-cubo como solução geral, destaca os erros devidos a singularidades e detalha a abordagem hierárquica.

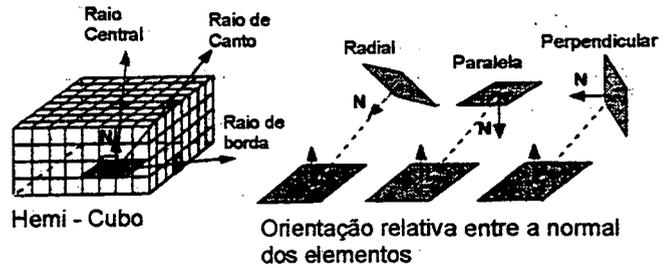
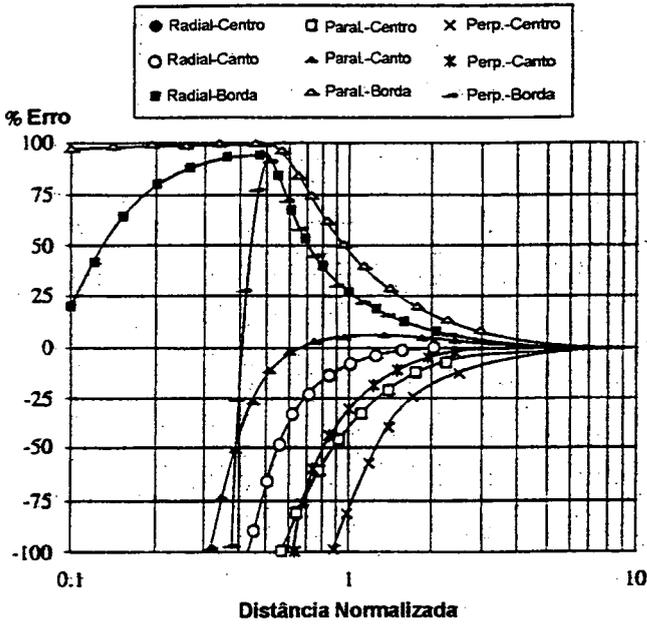


Figura II.6.A:

Erros no cálculo do fator de forma pelo método do hemi-cubo, devido à posição relativa entre as parcelas: raios centrais, de canto e de borda combinados com Normais radiais, paralelas e perpendiculares (9 situações descritas acima). No gráfico ao lado o erro relativo (%) entre os valores calculados pelo hemi-cubo e os valores verdadeiros (Baum *et al.* (1989)).

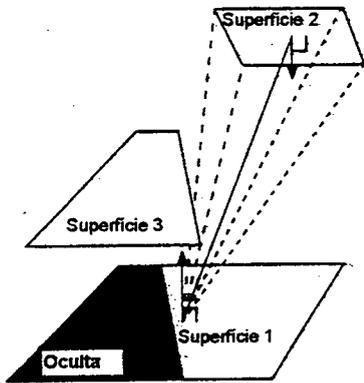


Figura II.6.B:

Erros no cálculo do fator de forma pelo método do hemi-cubo, onde o valor obtido do centro da superfície 1 para a superfície 2 é subestimado comparado ao valor real devido à intervenção da superfície 3. (Baum *et al.* (1989)).

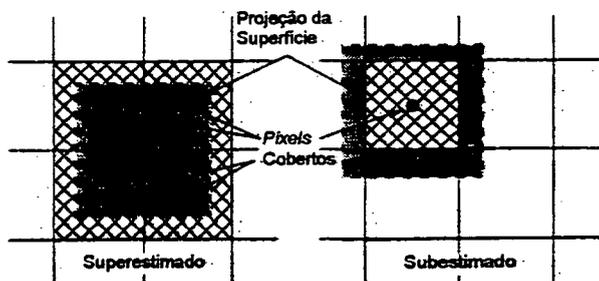


Figura II.6.C:

Erros no cálculo do fator de forma pelo método do hemi-cubo, devido ao falseamento da projeção real das superfícies quando associadas aos elementos finitos do hemi-cubo: a mesma projeção de superfície gera um valor superestimado de 4 pixels (esquerda; no gráfico), ou subestimado de um pixel (direita). (Baum *et al.* (1989)).

O método parte do pressuposto de uma margem de erro tolerável determinada pelo usuário, estabelecendo uma divisão *a priori* dos elementos do cenário. Baseado no Ray Tracing Recursivo, um primeiro nível de análise é determinado por uma amostra de raios que computam o fator de forma e consideram a visibilidade. No caso do valor obtido, comparado à visibilidade, exceder a margem de erro estabelecida pelo usuário, então os elementos de uma dada interação são subdivididos, isolados ou conjuntamente, ligando-se estas subdivisões às suas descendências. O estabelecimento destas ligações garantirá que o transporte de energia será feito dentro dos limites estabelecidos pelo usuário.

No estabelecimento destas ligações Auperle (1993) utiliza o conceito de **importância** dos elementos em análise para o olho do observador, para estabelecer maior ou menor grau de refinamento. O procedimento de refinamento recursivo simultaneamente decompõe o polígono em uma hierarquia de parcelas e elementos, e constrói uma representação hierárquica da matriz de fatores de forma através do registro das interações em diferentes níveis de detalhe.

A estimativa do fator de forma nas singularidades pode ser feita ou pelo ângulo sólido sub-entendido por um disco de área igual à superfície da parcela, ou circunscrevendo-se uma esfera ao redor da parcela e estimando o ângulo sólido nela projetado. Esta hierarquização é dinâmica no processo de cálculo.

Em 1993 ainda Hanrahan e Schröder (1993) propõem uma fórmula para a integral do fator de forma entre dois polígonos quaisquer. No entanto, concluem que a solução não é elementar, dado que envolve funções di-logarítmicas. Reconhecem que o principal valor da fórmula é determinar respostas exatas para configurações poligonais fechadas, podendo ser usada na prática para soluções de referência para verificar aproximações mais eficientes.

Em 1994 Hanrahan e Teller (1994) propõem um algoritmo de **Visibilidade Global** para o cômputo de iluminação, onde a questão da visibilidade entre superfícies é tratada através de "células de visibilidade". Conjuntos de superfícies geralmente delimitadas por fronteiras comuns entre polígonos são associados a "portais de visibilidade", zonas que permitem a passagem da visão, que estabelecem um primeiro nível de relacionamento. A visibilidade é analisada somente entre células que se relacionam através dos "portais". Este método permite excluir relações de cálculo do fator de forma entre superfícies que não se visualizam.

Em tese apresentada à University of Kansas, G. Shea (1994) descreve os métodos do hemi-cubo e do ray-tracing para cálculo dos fatores de forma, bem como os métodos de radiosidade, inclusive híbridos, incorporando tratamentos numéricos e hierárquicos. Propõe um método derivado de Wallace *et al.* (1989) capaz de lidar também com superfícies refletoras.

Müller e Schöeffel (1994) propõem um método para repropagação da radiosidade em ambientes virtuais interativos que utiliza uma lista de fatores de forma e de fatores de sombra. Considerando o método da radiosidade tradicional como um museu ("você pode olhar e andar ao redor, mas não pode tocar nada"), o método procura permitir uma interação com a movimentação de objetos no cenário. Efeitos primários de uma movimentação são computados e depois repropagados ao conjunto da cena. Consideram que o hemi-cubo não é adequado a esta abordagem, utilizando o *ray-tracing*

recursivo. A manutenção de duas listas, uma relativa às interações de radiosidade para cada parcela emissora e outra referenciando os fatores de forma e sombra, atualizadas a cada modificação no cenário, permitem o cálculo mais rápido dessa repropagação.

Schröder (1993) propõe um método de integração numérica para o cálculo do fator de forma em singularidades relativas a polígonos emissor e receptor com fronteira comum. Aponta no hemi-cubo os mesmos erros inerentes apontados por Baum (1989). No seu método as singularidades são tratadas em intervalos onde funções aproximadas estimam o fator de forma com erro relativamente baixo. No entanto, é um método computacionalmente dispendioso:

“Em muitas cenas a maioria das singularidades recai em uma pequena classe de casos. Por exemplo, em cenas arquitetônicas a vasta maioria das interações singulares ocorrem por primitivas reunidas em ângulos retos. Neste caso uma regra derivada de nosso modelo de geometria poderia ser exata. Outra abordagem para lidar com a singularidade, que não tocamos até agora, concernem a métodos simbólicos que subtraíam as singularidades. Muitas dessas técnicas são conhecidas ... e deveriam ser exploradas pela radiosidade. Pode também ser possível reduzir a dimensionalidade da integração abaixo de quatro. Muitas expressões existem para o fator de forma que reduzem as integrais tetra-dimensionais a bi-dimensionais (ou ainda menos). Expressões similares podem ser possíveis para o fator de forma generalizado de funções básicas de maior ordem. Nosso interesse inicial em encontrar formas similares para integrações de maior ordem foram frustradas pela complexidade das expressões resultantes, mas confiamos que formas mais simples podem ser encontradas, as quais podem produzir algoritmos práticos”. (Schröder (1993)).

Entre 1994 e 1996 Keller desenvolve um conjunto de trabalhos (Keller (1995), (1995b), (1996) e (1996b)) que abordam o problema da iluminação global, pela vertente do *ray tracing*, através do método Quasi Monte Carlo, ao invés da abordagem Monte Carlo tradicional. Considerando que um cenário, em computação gráfica é dado como um problema de “representação de fronteiras”, descreve a abordagem Quasi Monte Carlo, que propõe a substituição da amostragem aleatória de raios do método tradicional por uma amostra representada por uma seqüência de baixa **discrepância**, considerada como a medida de desvio de um elemento dentro de um padrão regular de conjunto, o que no caso representa o quanto um conjunto de pontos desvia-se das posições regularmente distribuídas em uma malha espacial (bi ou tri-dimensional).

Como em um computador as amostras aleatórias usadas para integração do Monte Carlo são aproximadas por meio de números pseudo-aleatórios, afirma que existem conjuntos determinísticos de pontos especialmente concebidos para integração, que prometem convergência mais rápida que no Monte Carlo aleatório. Utiliza as seqüências de baixa discrepância (pontos com pequeno desvio da distribuição uniforme) também para o cálculo do fator de forma. Demonstra que o conjunto de pontos determinísticos de baixa discrepância apresenta melhores propriedades de uniformidade que o aleatório, o que é importante para a integração numérica.

Drakos (1996) (1996b) considera que apesar dos inúmeros estudos e avanços nas técnicas de cômputo dos fatores de forma e da equação da radiosidade, a questão da determinação da visibilidade continua problemática. Afirma que houve considerável

progresso recentemente na teoria da partição do espaço, mas pergunta se algumas dessas novas idéias podem ser usadas ou estendidas para fornecer algoritmos simples e rápidos para cômputo da visibilidade.

Khodulev (1996) realiza um trabalho comparando dois métodos: o método Monte Carlo baseado no Ray Tracing Recursivo e o método da Radiosidade Determinística (baseada em amostragem pré-definida de pontos), concluindo pela melhor performance do algoritmo Monte Carlo, considerando-o o principal algoritmo para a análise da iluminação global.

Bastos *et al.* (1996) propõe um método para acelerar percursos em cenas estáticas que envolve a criação de um contínuo de interpolação na reconstrução da radiosidade para regiões amostradas adaptativamente. Esta representação permite múltiplos diferentes níveis de detalhes da função de radiosidade, que é representada por mapas de texturas. O método também envolve o uso de filtros bicúbicos implementados em *hardware* para apresentação da radiosidade.

Podemos citar ainda o trabalho de Rademacher (1997), que descreve uma técnica híbrida que alia uma análise de disco de área equivalente a um método Monte Carlo estatístico; o trabalho de Schmidt (1997) propõe a utilização de computadores com arquitetura de memória distribuída para solucionar o problema da iluminação global através de processamento paralelo. Propõe um método para cálculo do fator de forma de natureza analítica que não sofre, segundo o autor, dos erros inerentes ao algoritmo do hemi-cubo. O método proporciona uma aproximação da integral da radiosidade através de um conjunto de funções de base linear.

Stuttard *et al.* (1996) apresentam um sistema baseado na radiosidade hierárquica descrita por Hanrahan *et al.* (1991) e que utiliza o método proposto por Wallace (1989) para cálculo do fator de forma. O sistema, no entanto, é proposto em termos de processamento paralelo para máquinas em rede.

II.6 - A LUZ NATURAL NOS MODELOS DE ILUMINAÇÃO GLOBAL

O desenvolvimento, na computação gráfica, de métodos fisicamente fundamentados abriu ampla perspectiva para a incorporação da luz natural aos modelos de iluminação global.

Um dos trabalhos pioneiros na incorporação da luz natural às imagens de computador é o de Nishita e Nakamae (1986), conforme descrito por Müller *et al.* (1985):

“Consiste em uma extensão da abordagem ray-tracing, onde subdividem o domo celeste em bandas regulares de fontes. A luminância é assumida como sendo transversalmente uniforme e longitudinalmente não uniforme em cada banda fonte. Cada ponto de amostra P da cena (no contexto ray-tracing: cada ponto de interseção a ser iluminado) é manipulado como efetivo centro do domo celeste devido ao raio imenso do domo. A visibilidade entre P e o céu é determinada pelas linhas amostras (a linha central de cada banda celeste). As linhas de contorno dos objetos da cena são projetados no hemisfério e seccionam as linhas amostras. Como resultado, a seção visível de cada linha modelo é dada em intervalos de ângulos”.

Dobashi *et al.* (1994) (apud Müller *et al.* (1995)) substituem a divisão regular por faixas com contribuições aproximadamente iguais de luminância, com refinamentos locais quando detectadas grandes variações entre faixas contínuas.

Tadamura *et al.* (ref1993) (apud Müller *et al.* (1995)) observam que:

*“...o custo de cálculo do método de bandas fontes é muito alto: especialmente a detecção da interseção entre objetos e linhas amostras, significando mais de 60% do processo. Sugerem um eficiente algoritmo para determinação de visibilidade similar à abordagem do hemi-cubo, e integra este sistema ao seu método de ray tracing: um paralelepípedo é colocado ao redor de cada ponto de amostra da cena, com superfície superior faceando a direção de maior luminância no céu. Cada face do paralelepípedo é subdividida adaptativamente em um número de elementos e a contribuição de iluminância celeste para todos os elementos é calculada. De sorte a determinar se cada elemento é ou não obscurecido por objetos na cena, todos os objetos são projetados em cada superfície do paralelepípedo, usando hardware gráfico. A luminância celeste é calculada somando-se as contribuições assinaladas como desobstruídas para cada elemento. Os resultados apresentados por Tadamura *et al.* provaram a eficiência e precisão de seu método comparado ao das faixas fontes. Quanto maior o número de objetos, mais favorável se torna a aplicação de seu método”.*

Ward (1994) apresenta o sistema **Radiance**, que utiliza o *ray tracing* em uma avaliação recursiva da integral relativa aos pontos de uma superfície, substituindo a noção de energia transferida entre dois pontos pela de energia passando através de um ponto segundo uma direção específica. Com esta formulação, o problema da reconstituição da imagem é mais naturalmente solucionada pelo *ray tracing* porque considera a radiação em termos de incidência na projeção esférica, sem nenhuma menção explícita à geometria do modelo. Incorpora em seu trabalho a iluminação natural através de uma abordagem *ray tracing* que trata o Sol separadamente, mandando-se um raio em sua direção para verificar sua obstrução. Considera que uma abordagem puramente Monte Carlo seria problemática em cenários exteriores simples devido ao pequeno tamanho do Sol em relação ao resto do céu. Para o cálculo da irradiação indireta em um ponto em uma cena, São mandadas poucas centenas de raios que são uniformemente distribuídos sobre o hemisfério projetado. Se algum dos raios encontra uma fonte de luz, é descartado, dado que a contribuição direta é computada separadamente. No sistema Radiance o processo de amostragem é aplicado recursivamente para múltiplas reflexões e não cresce exponencialmente porque cada nível tem seu próprio conjunto de valores indiretos. Ao retirar o Sol como maior fonte de variação na integração do cálculo, pode-se dividir o céu em zonas e analisá-las através de uma amostragem de raios. Em termos gerais, é feita uma avaliação plena da equação da radiosidade para contribuição difusa indireta apenas se necessário, interpolando-se os valores para toda a superfície. Componentes especulares diretos são computados numa base “per pixel”, ocorrendo menos freqüentemente a amostragem hemisférica. A abordagem é similar à dos elementos finitos, não utilizando no entanto uma malha de subdivisão, ajustando-se a densidade dos pontos de cálculo em resposta à iluminação do ambiente. A amostragem do hemisfério não apenas fornece a iluminação indireta total, como também fornece informações detalhadas sobre a localização e o brilho das superfícies visíveis do ponto de avaliação.

A LIGHTSCAPE Technologies (1998) utiliza um método híbrido com radiosidade progressiva para as trocas difusas e complementado por uma aplicação *ray tracing* para um dado ponto de vista. O trabalho refere-se ao método recomendado pela IES [IES89] para o cálculo da contribuição da luz natural, mas não detalha seu modo de utilização.

Trogenza (1993) propõe um conjunto de algoritmos voltados para o estudo da iluminação natural, onde os objetos são divididos numa malha triangular que pode ser hierarquicamente dividida. O algoritmo da radiosidade envolve resolver plenamente a matriz de radiosidade, computando-se, para cada parcela receptora frente a todas as emissoras, a visibilidade entre elas com emissão de raios, que também é utilizada para determinar a componente direta de iluminação celeste (quando o raio resulta desobstruído por qualquer superfície). O céu é dividido em 145 zonas com ângulos sólidos relativamente uniformes, definidos a partir de 7 faixas com variação uniforme de altura e mais uma parcela no topo (Zenit). O cálculo do fator de forma é feito por método numérico. A análise de visibilidade é feita por algoritmos que utilizam coordenadas locais sobre os planos emissores para análise da interseção de raios com o plano e pertinência desta com os triângulos emissores. Trogenza também descreve algoritmos do método Monte Carlo (tornando o método com características híbridas na determinação das reflexões e transmissões), apresentados em trabalho anterior (Trogenza (1983)).

Müller *et al.* (1995) consideram que os simuladores convencionais não suportam a modelagem da luz natural suficientemente bem, não bastando representar o Sol por uma fonte de luz pontual forte. Segundo este autor a integração de uma fonte de luz celeste hemisférica pode ser categorizada em duas formas:

a) Reunião ("gathering"), onde o hemisfério é tratado como uma grande fonte de luz. Para cada ponto no ambiente (no contexto *ray tracing*: cada ponto receptor) a parte visível do domo celeste deve ser determinada e então computada no ponto.

b) Disparo ("shooting"): o domo celeste é subdividido em pequenas parcelas emissoras. Para cada parcela do céu, a luminância é computada e atua como uma fonte de luz na simulação do processo de iluminação".

Müller *et al.* (1995) afirmam que todas as publicações por eles conhecidas usam a abordagem de reunião e propõem um método baseado no disparo, onde o céu é dividido em um número M de parcelas, com $M < N$ (n° de parcelas na cena). O método pode ser diretamente integrado em um sistema de radiosidade e apenas M interações de disparo são necessárias para a simulação da contribuição direta da luz natural. Salvando a matriz de $M \times N$ elementos referentes aos fatores de forma entre parcelas receptoras e parcelas do céu, modificações nos parâmetros do modelo celeste podem ser atualizadas rapidamente. Assim a variação luminosa ao longo de um dia típico utiliza a custosa computação dos fatores de forma apenas uma vez.

Utilizam em seu método a divisão da abóbada celeste proposta por Trogenza (1993). Ao hemisfério celeste é associado um raio variável, mensurável em função do raio da cena, conforme a Figura II.7.

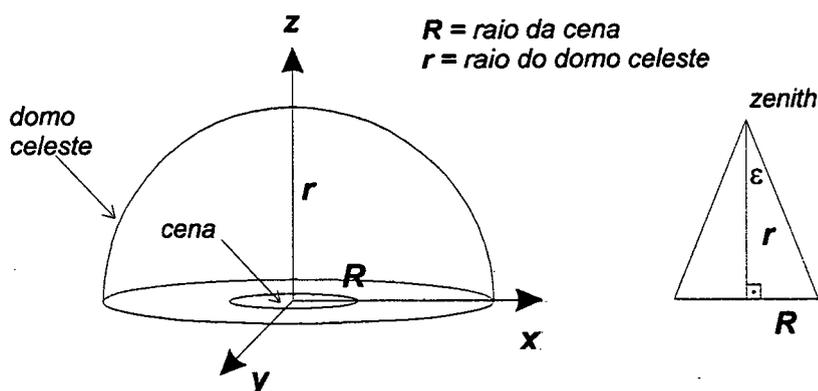


Figura II.7: Definição do raio variável do céu (r) em função do raio da cena (R), segundo Müller *et al.* (1995), onde r é obtido dividindo-se R pela tangente de ε . Definindo-se ε como 1 grau, por exemplo, o raio do domo será cerca de 60 vezes o raio da cena..

A idéia básica é que, aceito ε como um ângulo suficientemente pequeno, cada zona do céu será observada de todos os pontos do cenário aproximadamente (no sentido grosseiro, n. a .) segundo uma mesma direção. A simulação inicial pressupõe a determinação do raio da cena e seu respectivo raio celeste. A partir daí, dados os parâmetros da luminosidade de cada zona celeste, Müller *et al.* (1995) utilizam uma adaptação do método de Wallace *et al.* (1989) para avaliação dos fatores de forma: para cada parcela receptora, um conjunto de cinco raios é mandado (um para o centro e um para cada vértice da zona celeste); se um dos raios resulta obstruído, a zona é subdividida em quatro e acrescentados novos raios (p. ex, o primeiro nível de refinamento resultam em 13 raios, correspondentes aos centros e vértices individuais e compartilhados das quatro sub-zonas contíguas); o procedimento é repetido para cada sub-zona, que pode ser subdividida separadamente caso também tenha raios resultantes obstruídos. Para uma cena de 47.500 parcelas regulares, o método de Müller *et al.* (1995) propiciou, num teste onde só um nível de refinamento foi estabelecido (resultando no máximo em treze raios por parcela, para cada zona do céu) , a emissão de cerca de 70.000.000 de raios para o cálculo do fator de forma celeste. Concluem que:

a) *“O principal foco do sistema é dar suporte a ferramenta de simulação que auxilie os projetistas e engenheiros de iluminação a planejar a iluminação em cenas arquitetônicas. Para este tipo de aplicação tempos de resposta interativos são mais importantes que imagens reconstituídas acuradamente, bem como que os resultados sejam fisicamente corretos.”*

b) *“É necessário um método de reticulagem para as parcelas da cena que permita não apenas a reutilização dos fatores de forma armazenados, mas que também seja capaz de adaptar-se à rápida variação da radiosidade que ocorre quando a luz direta do Sol, ou outro importante emissor, passam a contribuir. A consequência de tal esquema, onde uma retícula básica é repetidamente adaptada, é que pode-se estar apto a recuperar a retícula básica logo que as condições do céu / Sol mudem”*

c) *“Para o teste de visibilidade parcial entre uma parcela emissora e uma receptora o método de ray tracing adaptativo utilizado é bastante custoso*

e causa problemas de falseamento, mesmo se o nível de recursividade é bastante alto. Idealmente, um teste de visibilidade que possa rapidamente estabelecer se dois polígonos totalmente inter-visíveis, parcialmente invisíveis ou totalmente ocultos é necessário. O provimento de tal teste é muito importante para a eficiência de nosso método, e sugere-se como tópico para futuras pesquisas.”

Consideram ainda a necessidade de uma descrição adequada das cores do céu, sugerindo a abordagem de Tadamura *et al.* (1993).

Sillion *et al.* (1997) propõem uma abordagem hierárquica na simulação de iluminação de cenas exteriores. O método utiliza um refinamento progressivo a partir da subdivisão das zonas celestes em função de uma margem de erro estabelecida a priori pelo usuário. Aponta a inadequação do método de Müller *et al.* (1995), que define uma dimensão geométrica da abóbada celeste para o cálculo do fator de forma e utilizando fórmulas que levam em consideração a distância entre o cenário e os elementos celestes, o que não se aplica à análise de fontes situadas no infinito. Propõem um hemisfério que é subdividido em direções e colocado no infinito, com uma subdivisão hierárquica de refinamento, cujo percurso de cálculo é garantido pelo estabelecimento de ligações entre os diferentes níveis de refinamento, estabelecendo uma descendência hierárquica. Em cada nível, a cada posição de refinamento, é associada uma luminosidade que será utilizada na solução da radiosidade. A abordagem utilizada para a definição das condições celestes iniciais da hierarquia é a proposta pelo sistema Radiance construído por Ward (1994), com a definição do grau de radiação para cada direção do céu, considerado seu nível de refinamento. Sem relacionarem-se diretamente com os aspectos ligados ao cálculo do fator de forma e à determinação da visibilidade, bem como à incorporação da luz natural ao método da radiosidade, são bastante relevantes no estudo da iluminação global os trabalhos de Dobashi *et al.* (1996-a) (1996b) (1997), onde abordam questões relativas ao cálculo rápido da distribuição de cores no céu, bem como na visualização de nuvens. Um conceito que introduzem, similar ao *pixel*, que denominam *voxel*, é utilizado como unidade (elemento cúbico) de volume para cálculo de refração dos raios de luz no interior de nuvens. Nestes trabalhos mencionam a utilidade de um método de cálculo do fator de forma, sem no entanto especificar nenhum em particular. Referenciam, no entanto, o trabalho de Cohen *et al.* (1985) além de vários dos mais relevantes, presentes na literatura aqui revista.

Carbonari (1998) propõe um método para avaliar a radiação solar na superfície de edifícios. Seu método baseia-se na dupla projeção: das superfícies em um hemisfério e, posteriormente, na projeção ortogonal no círculo de base, obtendo-se uma projeção do tipo “olho de peixe”; o método não faz referência ao cálculo de fatores de forma ou desenvolvimento posterior, restringindo-se à projeção das obstruções ao céu em um determinado ponto. Ressaltamos finalmente o projeto TaLis referido por Müller (1997), em desenvolvimento integrado nos institutos Fraunhofer Institute for Computer Graphics (ICG, Darmstadt), Fraunhofer Institute for Solar Energy (ISE, Freiburg), Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP, Stuttgart). Este projeto objetiva desenvolver um sistema integrado radiosidade / *ray tracing*, para simulação de iluminação artificial e natural, fundado no trabalho de Müller *et al.* (1995).

CAPÍTULO III - ANÁLISE DOS MODELOS ESTUDADOS

III.1 - ALGUMAS QUESTÕES FUNDAMENTAIS

Do estudo da literatura podemos depreender que os métodos utilizados atualmente para o estudo da iluminação global, entendida como processo que envolve a luz em suas diversas nuances (direta, difusa, etc..) e os objetos com seus diferentes comportamentos frente à luz (especular, difuso, difusos direcionais, etc..), partem basicamente de duas abordagens: a da **Radiosidade** e a **Ray Tracing**, cada uma com suas derivações, ajustes e refinamentos, inclusive denotando-se uma tendência recente em integrar os dois métodos. Da evolução da discussão e aprimoramento dos modelos, algumas questões podem ser consideradas como fundamentais e inerentes às construções dos modelos, cada um com sua peculiaridade.

Podemos categorizá-las como:

- a) Questão da Amplitude dos Modelos;
- b) Questão da Visibilidade;
- c) Questão das Singularidades;
- d) Questão do Tratamento da Luz Natural;
- e) Questão da Coerência das Estruturas de Dados;
- f) Questão da Relação Custo X Benefício (Visualização X Projeto; Tempo Real X Situação Real).

III.1.1 - AMPLITUDE DOS MODELOS

Enquanto a radiosidade lida bem com as superfícies difusoras, o *ray tracing* lida bem com a transmissão / reflexão especular. As superfícies reais, no entanto, apresentam graus diferenciados de especularidade e difusão, sendo consenso no meio que um método pleno deve incorporar os dois tratamentos, mais especificamente a radiosidade complementada pelo *ray tracing*. No entanto, uma simples soma de procedimentos, um procedimento puramente em dois passos, não resolve o problema. É sabido, no entanto, que a maioria das superfícies do mundo real não são completamente difusoras ou completamente refletoras. Há um grau diversificado de comportamentos que misturam um grau de difusão com um grau de especularidade em diferentes níveis (que poderíamos genericamente denominar de comportamento difuso direcional) e o tratamento destas superfícies é problemático em ambas as abordagens. Há que se considerar que os métodos partem de pressupostos iniciais distintos: a radiosidade é uma solução de trocas globais independente do ponto de vista, enquanto o *ray tracing* de pende do ponto de observação. Do ponto de vista prático, isto significa que a radiosidade, quando considerada a matriz plena de trocas, examina todos os aspectos que relaciona cada superfície com todas as outras, mesmo quando esta análise não tem a menor relevância para o foco da atenção. No entanto, uma vez obtida esta relação global, é possível a obtenção de diferentes visualizações a partir dela, sem necessidade de recalculá-la. A abordagem *ray tracing* na forma recursiva, analisa apenas os

raios que partem do observador, evitando uma abordagem global e evitando processamento, sendo no entanto necessário recálculos a cada mudança do ponto de vista. Muito do que se pretende amplificar na abrangência dos modelos referem-se a este aspectos, procurando em ambos os casos circunscrever uma circunstancialidade dos modelos sem perder as características de sua eficiência. Na radiosidade busca-se uma contextualidade restrita que permita uma aproximação de resultados circunscrevendo a análise do fenômeno aos elementos mais importantes e próximos do foco de análise, sem perder as características globais das trocas. No *ray tracing*, por outro lado, busca-se uma ampliação da contextualidade, de sorte que os elementos principais dentro de um cenário que se visualiza de forma dinâmica (mudança de ponto de vista), possam ser atualizados através da recuperação de características que mantinham em estado anterior. Estes aspectos refletem não só na questão da visualização, no que refere à mudança do ponto de observação, como também na questão da movimentação dos objetos no cenário.

III.1.2 - VISIBILIDADE

A utilização de métodos numéricos nos estudos de iluminação têm demonstrado utilidade apenas complementar (na resolução de algumas singularidades, por exemplo) principalmente devido à questão relativa à visibilidade, em praticamente todas as proposições. A aplicação dos métodos numéricos no cálculo dos fatores de forma em ambientes complexos é restrita devido ao fato de as integrais básicas não representarem a realidade da maioria das superfícies como observadas considerando-se a interferência de visibilidade entre diversos objetos do cenário. As tentativas de integração de poligonais complexas, apesar de resultados mais precisos, não revelaram resultados práticos, e as integrais básicas são aplicáveis a poucos casos.

No contexto puramente da radiosidade (somente superfícies perfeitamente difusoras) a questão da visibilidade primordialmente refere-se a como um ponto em uma superfície visualiza todas as outras superfícies do ambiente, dependendo da geometria do ambiente. Esta questão básica de visualização, no entanto, não se esgota aqui. A análise de visibilidade que é feita para obtenção do balanço de radiosidade não soluciona o aspecto da visibilidade das superfícies a partir de um ponto de observação no cenário, a não ser que se recorra a localizar o observador coincidentemente com um determinado ponto em uma superfície com visibilidade do ambiente já resolvida, o que não corresponde à realidade, dado que muito dificilmente o olho do observador se encontrará em tal situação. Por outro lado, resolvida a matriz da radiosidade, seja no modo pleno, seja no modo de refinamento progressivo, a solução de visibilidade para um ponto de observação é bem mais simples, pois trata apenas de uma análise de profundidade para determinar a superfície que está visível.

A determinação do fator de forma, entretanto, é bastante complexa, envolvendo a maior parte do processo computacional, sendo resolvida, na maioria dos casos, pela aplicação do método do hemi-cubo complementado numericamente, ou pela adaptação *ray tracing* proposta por Wallace *et al.* (1989) para utilização no método da radiosidade, onde a cada raio de amostragem interceptado por uma superfície em primeiro plano atribui-se um valor correspondente de fator de forma.

No contexto *ray tracing* recursivo, a questão da visibilidade é o cerne de sua resolução: a solução da questão da visibilidade através do percurso dos raios e seus desdobramentos (reflexões / transmissões / absorções) refere-se não só a visibilidade da

superfície como também a relação entre o que é visível e o que não é visível mas interfere diretamente na visualização através das sucessivas influências dos elementos ocultos sobre os visíveis.

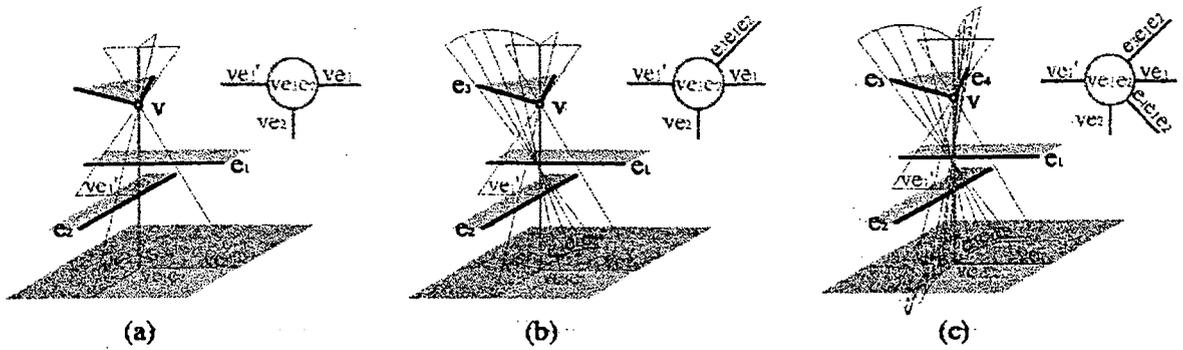
Em seu trabalho sobre visibilidade global Hanrahan *et al.* (1994) consideram que a determinação da visibilidade na síntese de imagens é a operação geométrica mais dispendiosa, classicamente tratada através de algoritmos de remoção de superfícies ocultas que reconstituem apenas as partes da cena visíveis de um ponto. Em sua proposição uma estrutura de dados que representa as relações de visibilidade entre todas as superfícies do cenário é construída em quatro estágios: primeiro é criada uma subdivisão espacial que interliga células poliédricas convexas através de superfícies que compartilhem bordas e contenham regiões transparentes ou então portais (áreas não obstruídas por superfícies) Um exemplo bastante compreensível é a interligação entre dois quartos, que constituiriam duas células, através de uma porta aberta, um portal. A partir desta subdivisão é realizado um estudo de visibilidade polígono a polígono entre as células que mantêm relação de visibilidade, estabelecendo-se uma hierarquia de ligações bem como uma estrutura de informação sobre a propagação incremental da visibilidade através das células. As relações são estabelecidas em termos de **total** ou **parcialmente** (em vários níveis) **visível** ou **oculta**. O terceiro passo consiste na determinação de blocos de células que mantêm relação de visibilidade; o quarto passo consiste na manutenção e atualização das relações estabelecidas em função de possíveis modificações.

Em 1996 Drettakis e Sillion (1996) introduzem uma abordagem que incorpora o tratamento de reticulados descontínuos na construção da radiosidade hierárquica, complementando o modelo com determinação de visibilidade através de retroprojeção. As malhas descontínuas são compostas por elementos (células ou faces) de forma e tamanhos diferenciados, aos quais é associada uma retícula. Esta configuração geométrica é capaz de modelar com mais eficiência as zonas de sombras e fronteiras, mas apresenta inconvenientes para a construção de uma hierarquia de radiosidade, dado que necessita de informações precisas de visibilidade. A retroprojeção complementa este aspecto estabelecendo, para cada célula ou face a exata condição de visibilidade de cada ponto do reticulado associado à superfície em relação às fontes de luz, eliminando desta forma erros de cálculo relativos a fontes. Ao final resulta uma estrutura hierárquica mista que começa na raiz, como uma *quadtree* normal, e tem descendências que podem ser subdivisões *quadtree* regulares, triângulos individuais ou aglomerados de triângulos. Dada a retícula e as retroprojeções, duas importantes modificações podem ser incorporadas ao tratamento das ligações de iluminação direta: caracterização das ligações como **parcial**, **oculta** ou **visível** pode ser acuradamente realizada após o passo de reticulagem descontínua, e o cálculo dos valores de iluminação nos vértices durante a solução é exato. A estimativa do fator de forma área x área pode ser significativamente implementada uma vez que cada amostra da função principal é calculada com a exata porção visível da fonte. Esta implementação dá-se complementando a abordagem *ray tracing* e estimativa de disco de área equivalente, tradicionalmente, segundo o autor, utilizada na determinação da visibilidade na radiosidade hierárquica. Os autores reconhecem, entretanto, que as retículas descontínuas híbridas podem conduzir a formas triangulares nem sempre adequadas ao tratamento de elementos finitos, pela excentricidade, sendo inclusive difícil detectar quando é conveniente sua adoção à da hierarquia em *quadtree*, bastante conhecida e de manuseio rápido e elementar.

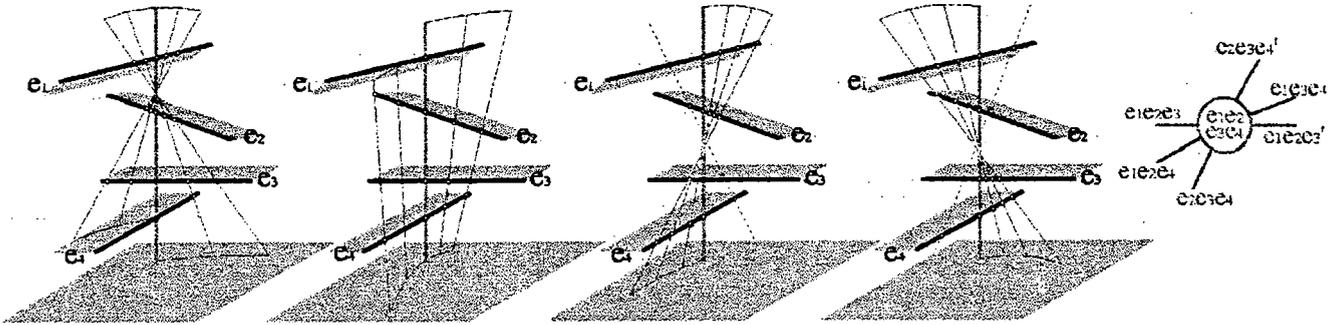
O aspecto relativo a modificações de visibilidade determinada pela movimentação / inserção / subtração de elementos no cenário é abordada mais detalhadamente por Drettakis e Sillion (1997). Partindo do trabalho realizado por Müller *et al.* (1994), observam que a introdução no método do refinamento progressivo de uma inteligente estrutura de dados relacionando fatores de forma e ligações entre diferentes superfícies objetivando a rápida propagação de variações na radiosidade contém potencialidade para analisar contextualmente modificações realizadas na geometria do ambiente. Consideram que algumas das limitações na solução do refinamento progressivo podem ser endereçadas ao contexto da radiosidade hierárquica. Modificações em um objeto implicam em modificações restritas na matriz hierárquica de fatores de forma, e conseqüentemente em suas ligações. A detecção do contexto de modificação das ligações entre os objetos envolvidos na modificação da visualidade gerada pelo movimento é problemática. Trata-se de estabelecer novas ligações hierárquicas e subtrair outras anteriormente estabelecidas. Propõem uma abordagem que consiste num feixe de “flechas” que, a partir das circunstâncias provocadas pelo objeto modificado no contexto das ligações, estabelece novos refinamentos hierárquicos que são incorporados à estrutura da representação hierárquica, com suas respectivas ligações, como descendência do elemento subdividido, que não é subtraído da representação mas colocado no estado de **ligação passiva**. Com relação à atualização do cálculo dos fatores de forma, o método mantém uma estrutura de representação para o ocultamento em duas partes para cada ligação: uma relativa ao objeto em movimento e outra relativa ao restante do cenário. O exame das ligações é feito em uma região da representação hierárquica contextualizada pelas ligações estabelecidas com o objeto em movimento. Supondo-se um determinado nó da hierarquia (em tempo, constituída a partir de *quadrees*), todas as suas descendências são examinadas quando está passivo; o nó é reativado quando as descendências estão ativas, implicando na desativação da descendência. Quando as descendências não estão todas ativas, examina-se na escala inferior da descendência das inativas a nova circunstância de visibilidade. Ambientes complexos submetidos a sucessivas mudanças de condições de visibilidade, no entanto, podem gerar um acúmulo crescente de elementos inativos na hierarquia, caso sejam preservados, ou então é necessário um sistema de descarte de fragmentações inativas para alívio da dimensão da estrutura (o que pode ser feito a partir da eliminação de níveis mais profundos de refinamento dos segmentos inativos da hierarquia).

Em outro trabalho praticamente simultâneo com outros autores, Drettakis *et al.* (1997) propõem o **Esqueleto de Visibilidade** (“*Visibility Skeleton*”), uma ferramenta multi-uso “poderosa e eficiente” para visibilidade global. O Esqueleto de Visibilidade é uma estrutura de gráfico onde os nós correspondem a linhas de corte extremas (“*extremal stabbing lines*”) e os arcos correspondem a linhas de enfileiramento (“*swaths lines*”). Estas linhas de corte e enfileiramento definem as relações de visibilidade entre os diferentes objetos; a linha de corte relaciona vértices, bordas e faces, de tal sorte que porções de visibilidade do espaço são definidas para o nó através das retas que podem tangenciar simultaneamente os diferentes elementos relacionados ao nó. Exemplos são representados na Figura III.1.

A construção do esqueleto é bastante complexa, dado que envolve a definição de uma série de elementos que constituem a estrutura. O resultado obtido ao final é uma segmentação do espaço definida por conjuntos de retas às quais, comparando-se a posição de um ponto à posição das diferentes retas estabelece-se a pertinência do ponto aos diferentes segmentos de visibilidade. O mecanismo permite estabelecer em que posição do espaço uma determinada borda que estava oculta passa a mostrar-se, ou que

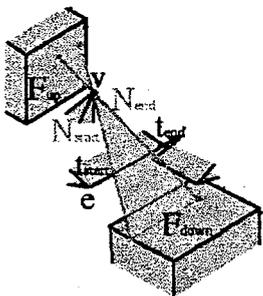


III.1.A - (a) Nó do vértice v com bordas e_1 e e_2 recebe os arcos que os relacionam; (b) é acrescentado o arco que relaciona a borda e_3 com o conjunto; (c) acrescentado o arco que relaciona a borda e_4 com o conjunto anterior.

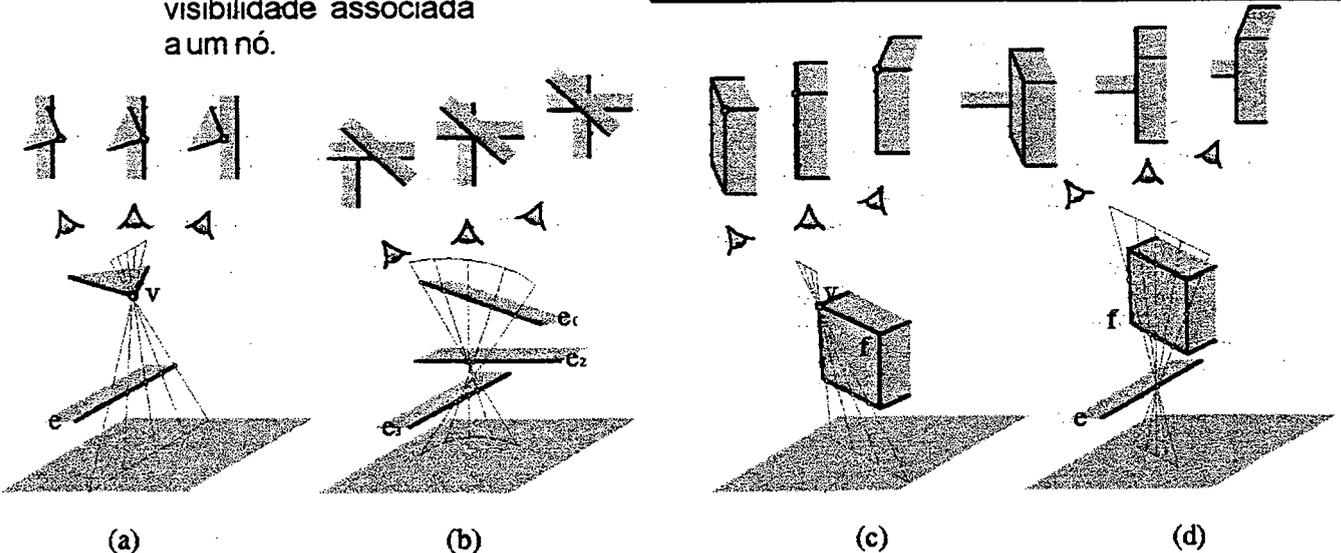


III.1.B - Ao nó $(e_1e_2e_3e_4)$, que relaciona as bordas e_1, e_2, e_3 e e_4 , são associados seis arcos que relacionam as bordas em conjuntos de 3: $e_1e_2e_3, e_1e_2e_4, e_2e_3e_4, e_1e_2e_3', e_1e_3e_4$ e $e_2e_3e_4'$. Há outras possibilidades de arcos relacionando 3 bordas que podem ser associados ao nó.

Figura III.1 - Quatro situações analíticas distintas descritas por Drettakis *et al.* (1997) na construção do "Esqueleto de Visibilidade": (A) Passos de construção de um nó; (B) Diferentes representações de arcos em um nó; (C) Representação da visibilidade; (D) Exemplos de relações de visibilidade entre diferentes tipos de elementos (vértices, bordas e faces).



III.1.C - Representação de visibilidade associada a um nó.



III.1.D - Representação dos limites de visibilidade no plano da base para um observador em relação a: (a) um vértice v e uma borda e ; (b) três bordas e_1, e_2 e e_3 ; (c) um vértice v e uma face f ; (d) uma face f e uma borda e .

porção da borda está visível do ponto, ou então se uma determinada face está visível ou não do ponto. A estrutura, segundo os autores, é capaz de fornecer informações de visibilidade precisas e de caráter global sobre um ponto ou elemento com respeito ao polígono face que está ligado, o que é necessário para analisar as transferências de energia na radiosidade hierárquica com o grau de precisão adequada no cálculo dos fatores de forma. A estrutura do esqueleto exige o pré-processamento da geometria do cenário para o seu estabelecimento. Para um ambiente interior composto de 1488 polígonos foram gerados cerca de 1.266.000 nós e de 3.087.000 arcos, consumindo cerca de 32 minutos de processamento e gerando uma estrutura de 416 Mb de memória (Processado numa Silicon SGI Onyx2 R10000, de 195 Mhz). Para 756 polígonos foram cerca de 445.000 nós e 1.074.000 arcos, consumindo 5,5 min. e 135 Mb de memória. Para 312 polígonos, 69.000 nós e 165.000 arcos, consumindo 37 segundos e 21 Mb de memória. O número de polígonos variados referem-se também a ambientes distintos, que configuram situações diferenciadas de visibilidade. A complexidade do esqueleto justifica-se pelo objetivo de permitir rápida análise de visibilidade quando da movimentação de objetos no cenário.

III.1.3 - SINGULARIDADES

As singularidades podem ser definidas como situações de comportamento particular dentro da abordagem geral de cada um dos métodos.

No método da radiosidade resolvido pelo hemi-cubo, as singularidades referem-se às zonas próximas de encontros entre superfícies (os "cantos"); na projeção de superfícies sobre o hemi-cubo em posições particulares, como próximo às arestas e às bases. Baum *et al.* (1989) demonstram que superfícies com orientações de normais diferentes, mas com mesma projeção no hemi-cubo, apresentam distorções no valor do fator de forma; no processamento de fontes de luz, que podem ser superestimadas ou subestimadas em função de definição inadequada de visibilidade; ou pelo falseamento inerente ao método de elementos finitos, pela aproximação das áreas reais às áreas somatórias de unidades de projeção nas faces do hemi-cubo. Para parcelas muito pequenas, este falseamento pode ser bastante significativo. Embora no método do refinamento progressivo a correção destes aspectos pode ser bastante diluída, dado que ela é resolvida a cada ciclo de interações juntamente com o cálculo do fator de forma, no caso de serem necessários inúmeros ciclos de interações o tratamento das singularidades passa a ser computacionalmente dispendioso. No caso dos modelos com poucas fontes intensas, como geralmente ocorre nos projetos de iluminação artificial, com poucos ciclos de interações iniciais, particularmente relativos às principais fontes emissoras, boa parte da energia luminosa é distribuída nestes poucos ciclos, restando num segundo momento as trocas difusas entre as superfícies. O crescimento do número de fontes, com uma distribuição mais equitativa de energia entre elas, no entanto, tende a agravar este problema, dado que aumenta significativamente a necessidade de ciclos de interações para distribuição da maior quantidade de energia luminosa, como na distribuição da luz natural (como veremos no próximo tópico).

No método Monte Carlo, considerado da perspectiva de uma amostragem de raios com baixa discrepância (Quasi-Monte Carlo - QMC) cuja maior eficiência foi demonstrada por Keller ((1995) a (1996b)), não são verificadas todas as singularidades encontradas no hemi-cubo, mesmo porque o QMC não enfrenta a mesma natureza de fenômeno que a radiosidade. No entanto situações singulares ocorrem e exigem também

tratamento diferenciado. No QMC, no entanto, quase todas as situações particulares podem ser tratadas a partir de um refinamento na amostragem de raios da região onde detectou-se a singularidade. Basicamente, a detecção de grandes contrastes de energia, mudanças de planos e características dos materiais e objetos conduzem a uma análise mais detalhada da região, pois devem significar fontes parcialmente ocultas, mudanças de planos de profundidades ou de fronteiras de superfícies que devem então ser mais precisadas.

O fato é que, apesar de conceitualmente diferentes, ambos os métodos manipulam o que poderíamos chamar de **pequenas parcelas sucessivas de aproximação**, cada um a seu modo, de valores relativos a aspectos que, nos objetos da realidade, apresentam condições de variabilidade e descontinuidade que não obedecem a padrões homogêneos de variação. Estes aspectos, que em teoria teriam melhor representação do ponto de vista puramente matemático, na prática não podem ser tratados de outra forma e, como veremos adiante, não podem ser refinados indefinidamente, mas até o limite de resultados práticos.

III.1.4 - LUZ NATURAL

A caracterização da luz devida ao céu e ao Sol nos modelos de iluminação global é feita, nas abordagens mais recentes, pelos seguintes aspectos:

a) A presença do Sol como fonte pontual, devido ao seu pequeno raio em relação ao hemisfério celeste frente à grande intensidade da luz que emite. A grande variabilidade de sua posição no céu, ao longo de um dia (percorre 15 graus de sua órbita por hora) pode significar, nas zonas próximas do Equador, diferenças de cerca de 180 graus entre as direções do nascer e do por do Sol.

b) A presença de uma grande fonte de luz difusa, a abóbada celeste, com luminosidade bastante variada, seja em relação à posição do Sol, seja em relação à presença de nuvens. Geralmente as condições da abóbada têm sido representadas ou por um céu limpo, onde se pode atribuir energia diferenciada a cada direção do céu em função da posição do Sol, ou por um céu totalmente nublado, representado por faixas de luminosidade constante em relação ao Zenit (CIE(1973), IES(1984), Baker *et al.* (1993)). No entanto, há inúmeros trabalhos buscando a modelagem de condições celestes em presença parcial de nuvens (Gillette (1981), Ruck *et al.* (s/ data), Dobashi *et al.* (1996)).

Através destes dois aspectos, o estudo da luz natural introduz nos modelos computacionais novas condições de abordagem. Vista da perspectiva da troca de energia entre superfícies num cenário tri-dimensional geométrico, a componente natural introduz um elemento de referencial necessariamente espacial / geográfico e de características obrigatoriamente dinâmicas, com efeito impactante, da ótica arquitetônica e urbana. Para ser efetivamente útil do ponto de vista arquitetônico e urbano o modelo deve permitir a simulação de várias situações ao longo de um dia e de um ano, sob condições climáticas distintas (no mínimo duas: céu limpo e céu encoberto).

Ainda quanto à questão do referencial espacial / geográfico, as implicações nos métodos analíticos de elementos finitos aproximativos para o cálculo dos fatores de forma, seja na abordagem do hemi-cubo (Cohen *et al.* (1985) e suas descendências) seja na do fator de forma calculado pelo *ray tracing* (Wallace *et al.* (1989) e suas

descendências), são significativas, dado que tanto o hemi-cubo quanto a amostragem de raios utilizados para computar o fator de forma, são colocados sob um sistema de referência local. Somente desta forma ambos os métodos podem tirar partido de uma associação direta do fator de forma à unidade elementar. Em um sistema de referência geral, o fator de forma forçosamente depende, também, ou da normal do plano emissor, ou da normal do plano receptor, conforme o caso. Desta forma, a mudança de posição do Sol no céu, variando as condições de iluminação direta e indireta, implica em atualizações necessariamente diferenciada para cada sistema localizado de referência, que não estabelecem entre si, a priori, nenhuma relação. A posição do Sol assinalada no hemi-cubo de uma parcela não guarda necessariamente nenhuma relação com a posição do mesmo Sol no hemi-cubo de outra parcela. Da mesma forma na amostragem de raios, essa posição deve ser atualizada para cada ponto de análise. Mudanças nas condições celestes, portanto, devem necessariamente ser trazidas a todos os sistemas locais para serem integradas à análise.

Tomemos o sistema proposto por Müller *et al.* (1995). Em seu modelo o hemisfério celeste é dividido em zonas fixas que são gradativamente incorporadas ao processo de radiosidade na proporção definida de sua visibilidade. Os fatores de forma são armazenados em uma lista que, além de permitir a rápida atualização das condições celestes, possibilita uma abordagem integrada da questão da iluminação natural no que concerne às relações interior / exterior. O tratamento de cenas interiores e exteriores tem sido tradicionalmente diferenciados, dado que geralmente no tocante à visibilidade os elementos interiores de um ambiente (considerado como representação discretizada) geralmente estão sujeitos a pouco tempo de insolação direta ou à visibilidade de uma pequena porção da abóbada, ou mesmo nenhuma, o que ocorre em muitos casos; o contrário ocorre com a grande maioria das superfícies externas, geralmente sujeitas à visibilidade de significativa parcela do hemisfério celeste e a longos períodos de exposição ao Sol. O método traz implícito a possibilidade de rotação do modelo, ou da abóbada, de sorte a permitir estudos de implantação com orientações variadas, dado que a manutenção da lista de fatores de forma associados a zonas do céu (que mantêm um referencial espacial/geográfico) permite a extrapolação desta lista de uma orientação para outra, embora não haja menção dos autores a esta possibilidade.

No trabalho de Sillion *et al.* (1997), centrado na análise de cenários exteriores, o céu é tratado de forma hierarquizada através de uma estrutura *quadtree*. A grande vantagem da abordagem propiciada por este método é que trata de maneira unificada os elementos do cenário e da abóbada, que também é tratada através da mesma hierarquia.

A representação da geometria é dada por uma hierarquia ascendente, construída do maior nível de refinamento para o menor, onde, em princípio, nenhum elemento utiliza o maior nível de refinamento na representação, senão que um pequeno conjunto de elementos em diferentes níveis de representação.

A representação em *quadtree* da abóbada, dá-se entretanto, através de parâmetros angulares definidos por um azimute inicial e final e por uma altura inicial e final. A representação de um elemento da abóbada é dada por parâmetros (u, v) num espaço de representação [altura inicial, altura final] x [ang inicial, angulo final], onde a representação inicial da abóbada corresponde aos parâmetros (u, v) $[0, \pi/2] \times [0, 2\pi]$. A radiação é computada através da amostragem de qualquer distribuição de luz celeste dada, em seu nível mais fino de detalhe, e criando uma representação piramidal das médias dos valores amostrados. Quando um elemento é obstruído, o valor da radiação a

ele associado é subtraído da pirâmide. Se um elemento é dividido no nível mais fino da hierarquia, um novo valor é obtido por sub-amostragem. O Sol, particularmente, é tratado como fonte paralela (ou seja, todas as superfícies a ele se expõem segundo uma mesma direção).

As fontes celestes, no entanto, são consideradas no modelo como **externas**, ou seja, não fazendo parte da geometria do cenário, sendo tratada pelo método proposto como fonte emissora de energia. Este tratamento diferenciado assegura que “... *para as ligações ordinárias superfície - superfície do cenário as bem-estabelecidas fórmulas sejam usadas para computar a irradiação, e para fontes externas nossa nova formulação é aplicada. Assim, o engenho de refinamento não necessita conhecer o tipo de objetos interagindo com cada um dos outros e utiliza um procedimento de refinamento genérico.*” (Sillion et al. (1997)).

A limitação do método proposto aos cenários exteriores é bastante compreensível, se considerarmos aspectos já expostos. A representação hierárquica é mais útil quando pode sintetizar bastante os níveis mais detalhados de refinamento, o que é o caso, como já citamos, dos cenários exteriores expostos a significativas porções do céu. No entanto, nos cenários interiores, representação hierárquica de pequenas porções do céu em condições complexas de visibilidade podem significar explorar exaustivamente o espaço de representação em granularidade bastante elevada (representações excessivamente concentradas na base da pirâmide), com grandes implicações no tempo de processamento e obtenção de resultados.

Outra condição muito importante que o estudo da iluminação a partir da luz natural introduz nos modelos de análise refere-se ao método de refinamento progressivo aplicado à radiosidade. Se considerarmos um cenário iluminado apenas por uma fonte de luz, é fácil determinar o fator de forma a partir desta fonte e distribuir a energia. A quantidade de energia distribuída é significativa inclusive para que se possa testar novo posicionamento ou fonte. A luz natural, por outro lado, como fonte inicial de energia tem características de múltiplas fontes. Para que se possa considerá-la é necessário um estudo de visibilidade no conjunto de objetos do cenário para que se possa determinar quais parcelas inicialmente receberão diretamente luz do Sol e da abóbada, e quanto receberão para uma dada condição do céu. Algumas, ou mais provavelmente várias parcelas de superfície do cenário receberão luz inicial da abóbada, e algumas particularmente diretamente do Sol. Estas parcelas constituem a distribuição inicial de energia que pode ser sucessivamente refinada a partir da redistribuição da energia das parcelas de maior emissão de luz. Mesmo assim, esse caminho pode conter armadilhas, dado que uma parcela que recebe muita luz natural inicial, no cenário, não tem necessariamente importância no contexto de maior interesse, dependendo das características do cenário, no sentido de definir as principais características da iluminação. Isto não ocorre, ou tem menor probabilidade de ocorrer, na observação de uma condição de projeto de iluminação artificial, onde a posição da fonte de luz é intencional e, com grande probabilidade, colocada na zona de maior interesse do cenário. Esta condição estabelece quase que um preâmbulo obrigatório no processamento da luz natural, que consiste na determinação da entrada inicial de energia, com todos os seus aspectos relativos à visibilidade.

III.1.4 - COERÊNCIA ENTRE AS ESTRUTURAS DE DADOS

Um dos grandes problemas ao lidar com a questão global de iluminação utilizando-se o método da radiosidade e *ray tracing* em dois passos, com complementações de tratamento numérico, estruturas de hierarquização, listas de fatores de forma, mapas da abóbada, ligações entre elementos com finalidades de agrupamento, etc, é criar estrutura de dados consistente com todas as referências. De maneira geral, a simplicidade está ligada à aleatoriedade, de forma que abordagens bastante simplificadas são repetidas indefinidamente até que se atinjam resultados satisfatórios. O reconhecimento de situações particulares e a aplicação de tratamentos específicos (como a hierarquização, por exemplo) exigem estruturas complementares de representação. Na hierarquização da abóbada celeste preconizada por Sillion *et al.* (1997), é necessária a armazenagem de uma representação da abóbada celeste para cada nível de refinamento da hierarquia, uma representação total da pirâmide. A proposição de Drettakis *et al.* (1996) aplicada a este modelo somente teria utilidade prática quanto ao Sol, mas somaria complexidade às estruturas de dados. Somemos a este conjunto o esqueleto de visibilidade (Drettakis *et al.* (1997)) e teremos uma complexidade de representação difícil de ser imaginada.

Quando falamos em Programação Orientada ao Objeto, demandas adicionais podem surgir devido à essa necessidade de estruturação dos dados, como descrevem Sillion *et al.* a necessidade de criar uma classe *generic edge* (borda genérica) para permitir unificação de procedimentos e aplicação de funções específicas de uma classe tanto à geometria do cenário quanto à caracterização da abóbada celeste: trata-se também de uma forma de hierarquia que se tornou necessária para tratar unificadamente uma representação em coordenadas tridimensionais do cenário com uma representação angular similar às coordenadas celestes. A presença cada vez maior da Programação Orientada a Objetos nos métodos computacionais, se por um lado permite uma concepção mais adequada da descrição e comportamento dos elementos objetos de programação, por outro lado demanda concepções harmônicas na definição das classes, de tal sorte que as funções possam manipular adequadamente os diferentes tipos de dados das diferentes classes.

Ao criticar o método da radiosidade frente ao Monte Carlo, Eric Veach (Shirley *et al.* (1997)) considera que:

"... a coisa espantosa é que os algoritmos de radiosidade necessitam ser muito 'complicados' para serem eficientes. À medida que você implementa reticulagem descontínua, funções básicas hierárquicas, agrupamento, recolhimento de flechas, de quantas linhas de código estamos falando? E pode você de fato crer que ele não se esvazia ("core-dump" no original, n.a) e computará um resultado razoável em uma porção de tempo razoável?"

III.1.6 - RELAÇÃO CUSTO X BENEFÍCIO

Depreende-se da literatura que não há um modelo total, que resolva todos os aspectos da iluminação global, inclusive tratando adequadamente a luz natural. A questão básica da escolha está na relação entre a finalidade pretendida com o modelo

de análise (movimento, animação, foto-realismo, arquitetura, etc), que chamaremos de benefício, e as demandas em tempo de processamento e capacidade de armazenamento de memória, que chamaremos de custo.

Stephen Westin (Shirley *et al.* (1997)) considera, a respeito da opção básica entre radiosidade e Monte Carlo que, se a intenção é caminhar ao redor de todo o ambiente, calculando a iluminação para todos os objetos, indiferente à oclusão ou distância, a radiosidade é mais adequada; por outro lado, se deseja-se provar o ambiente, gastando esforço similar para qualquer direção incidente, o mais adequado é Monte Carlo. No entanto pondera que um caminha em direção ao outro: reticulagem hierárquica é basicamente um modo de fazer um algoritmo baseado em retícula comportar-se mais como Monte Carlo, gastando esforço para as contribuições de iluminação antes que com a complexidade geométrica; e qualquer cálculo Monte Carlo bem desenhado usa métodos determinísticos onde quer que prático, e atenta para tirar vantagem da coerência espacial.

Ashdown (1997) considera que não há ainda uma obra definitiva sobre iluminação global porque a pesquisa a este respeito ainda é um tópico em aberto. Afirma que foram produzidos próximos de 100 *papers* e teses a respeito de iluminação global apenas nos últimos 6 meses de 1996:

“Atualmente a melhor fonte de informação compreensível e atualizada em técnicas de iluminação global são as mais recentes teses MSc e PhD....As teses PhD, em particular são extensas – os pobres estudantes são requisitados a demonstrar seu profundo conhecimento do campo, o que geralmente significa 50 páginas de prólogo para o seu atual tópico de pesquisa, e uma bibliografia com no mínimo 50 referencias.”

No contexto desta produção, no entanto, à mesma época, pondera Pete Shirley (Shirley *et al.* (1997)), pessimista, sobre o futuro dos modelos fisicamente corretos:

*“É **MUITO** (sic) difícil obter um trabalho sobre rendering no SIGGRAPH, mesmo com boas revisões. É fácil obter brinquedos baseados em ‘frutas penduradas baixo’ no SIGGRAPH. Claramente estamos fazendo algo muito errado (voce poderia corretamente dizer que o SIGGRAPH está fazendo algo bastante errado - nos temos que imaginar onde está nossa parte da culpa). Penso que parcialmente é devido a que o pessoal gráfico pense que desenhos Toy Story sejam suficientemente bons. Eu, entretanto, desejo realidade virtual que pareça real e seja preditiva - não desejo um mundo virtual de ‘cartoon’. Estamos muito longe de conseguir coisas que pareçam reais, e de compreender o comportamento de nossos algoritmos. Nenhum programa em uso oferece estimativas de erro úteis. Temos modelos de reflexão local totalmente inadequados. Muitos algoritmos são monopolizadores de memória. Muitos algoritmos fazem um trabalho muito pobre com dielétricos (água, vidro). Penso que precisamos criar nossos próprios modelos “grande desafio”, e tornar público que eles não podem ser feitos atualmente (p. ex. um humano sentado em uma escrivaninha iluminado pela luz do céu), a fim de que nosso campo não seque e se desenvolva.”*

Estas colocações reforçam a necessidade de delimitar adequadamente esta relação custo benefício, dado que a construção de sistemas bastante abrangentes é complexa, de altos custos, e atualmente disseminada apenas nos laboratórios de pesquisa.

III.2 - APROFUNDANDO O HEMI-CUBO

Considerando o hemi-cubo como um sistema de referência local, conforme descrito em Cohen *et al.* (1985), tomando-se um raio que parta da origem em direção ao hemi-espaco referenciado pelo hemi-cubo, a posição em que este raio interceptará uma das faces do hemi-cubo não é óbvia. As faces do hemi-cubo são definidas por cinco planos correspondentes às coordenadas $x = 1$; $x = -1$; $y = 1$; $y = -1$; $z = 1$. Um raio genérico, na grande maioria dos casos, interceptará 3 dos planos, nos pontos em que uma das coordenadas do ponto corresponda à definição do plano: O plano $x = 1$ será furado pelo raio em seu ponto de coordenada $(1, y, z)$, ou o plano $x = -1$ no ponto $(-1, y, z)$; o plano $y = 1$ no ponto $(x, 1, z)$ ou o plano $y = -1$ no ponto $(x, -1, z)$; o plano $z = 1$ será interceptado pelo raio no ponto $(x, y, 1)$, conforme a Figura III.2:

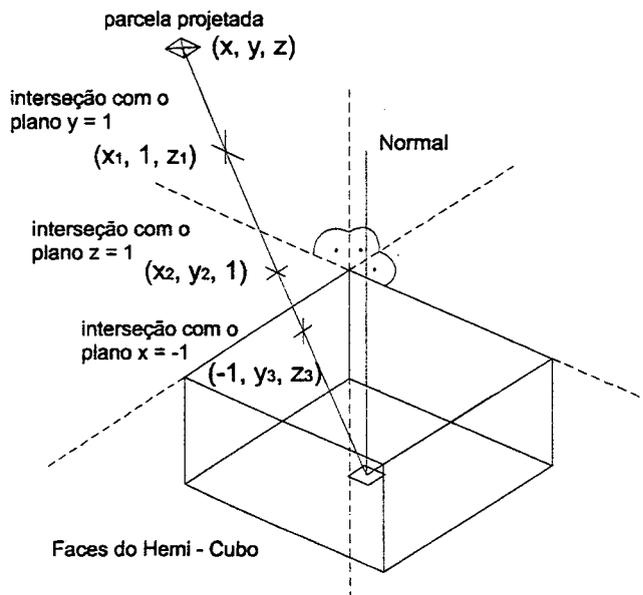


Figura III.2 - Interseção de um raio, unindo a parcela no centro do hemi - cubo a uma parcela projetada, com três faces distintas em três pontos distintos.

É necessária uma análise para se determinar qual dos pontos corresponde à projeção contida na face delimitada pelo hemi-cubo, que terá, entre suas três coordenadas, um valor obrigatoriamente igual a 1 ou -1, conforme a face do hemi-cubo em que se encontrar. Cohen *et al.* (1985) mencionam planos de corte que mantêm relações específicas entre coordenadas, do tipo $z = x$, $z = -x$, $z = y$, $z = -y$, que servem de referência para determinação da interseção do raio com a face que está contida no hemi-cubo. No artigo não são mencionados planos de corte que relacionem as coordenada x e y , mas que também são necessários, quando a abordagem é a de projetar a parcela no

hemi-cubo. Estes planos são definidos pelas relações $x = y$ e $x = -y$, que definem quatro quadrantes correspondentes às quatro faces laterais do hemi-cubo, conforme representado na Figura III.3:

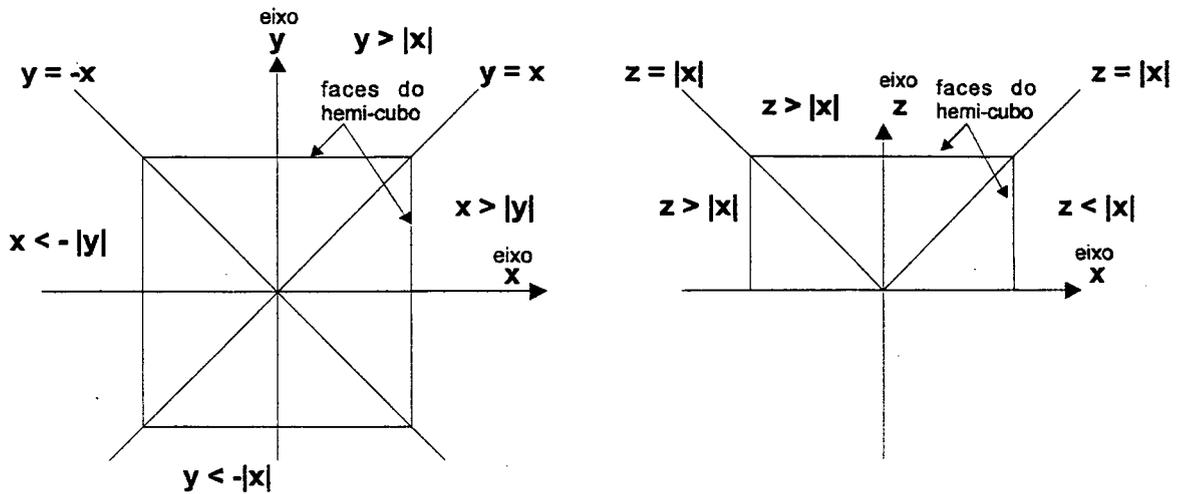


Figura III.3 - Planos delimitantes das continências às faces do hemi-cubo, com as respectivas equações que os delimitam. No plano vertical existe também a relação entre z e $|y|$, que não está representada na figura, mas pode ser deduzida desta.

Uma estratégia de abordagem que dispensaria a necessidade dos planos de corte seria lançar o raio que passa pelo centro de cada parcela do hemi-cubo no espaço e verificar quais as superfícies interceptadas, apoiado em uma análise de profundidade (quando duas superfícies são interceptadas pelo mesmo raio, prevalece a projeção da que se encontra à menor distância). Para esta abordagem, no entanto, seria necessário analisar a interceptação de todas as superfícies para todos os raios. Outra possibilidade seria projetar cada lado da superfície no hemi-cubo e analisar os hemi-planos criados em cada face para delimitar a pertinência de uma parcela ao hemi-plano. Por exemplo, supondo-se que uma superfície triangular projete-se apenas sobre a face superior do hemi-cubo (que representa a maior parte do hemisfério que envolve a parcela), cada aresta definirá uma função do tipo $x = ay + b$, onde o ponto pertencente à superfície atenderá ou à condição $x \geq ay + b$, ou à condição $x \leq ay + b$. O atendimento à condição de pertinência para os três lados, define a continência de uma parcela à superfície. Esta abordagem é muito complexa quando as arestas projetam-se em faces diferentes, e em muitos casos as arestas podem projetar-se em até 3 faces. No entanto, esta estratégia de abordagem pode ser útil em outro sistema de referência que não o hemi-cubo, como veremos adiante.

A abordagem da projeção por elementos finitos considera a superfície subdividida em elementos suficientemente pequenos para serem projetados com dimensão equivalente ao parcelamento do hemi-cubo, de forma que, projetando-se os elementos discretos no hemi-cubo, a projeção corresponde a um pixel. Esta suposição conduz a resultados satisfatórios na grande maioria dos casos, embora em algumas situações pode haver projeções repetidas em um pixel, enquanto outro não recebe nenhuma, gerando um "furo" em alguns pixels da projeção.

Tomando-se as coordenadas locais (relativas ao hemi-cubo) do centro de um elemento discreto, dadas por (x, y, z) , a determinação das coordenadas do ponto de

interseção do raio que une o centro do hemi-cubo com o centro da parcela, representado pelas coordenadas (x', y', z') , pode ser obtido por proporcionalidade de triângulos, após definida a face que receberá a projeção, através dos planos de corte.

Determinadas as coordenadas (x', y', z') , onde um dos três valores é obrigatoriamente 1 ou -1, conforme a face do hemi-cubo, é necessário referenciá-la ao índice correspondente da parcela no hemi-cubo para os valores relativos às coordenadas não obrigatoriamente unitárias, alguma relação do tipo:

$$y'' = \text{int}(y' / dl)$$

onde y'' é uma das referências à matriz de fatores de forma pré-calculados do hemi-cubo, e dl é a dimensão lateral de uma unidade do hemi-cubo. Este referencial tem que ser obtido para duas das coordenadas de projeção, na grande maioria dos casos.

III.3 - FATOR DE FORMA VIA RAY TRACING

A aplicação do método *ray tracing* na determinação dos fatores de forma consiste em centrar um hemisfério local em uma parcela e emitir um feixe de raios de amostragem desse espaço hemisférico (Tregenza (1993)). Para cada raio é computada a interseção com os demais elementos superficiais: geralmente é identificado o ponto de interseção do raio com o plano que contém o elemento superficial; as coordenadas da superfície e da interseção são transferidas para um sistema local com a face XY situada sobre o plano da superfície, analisando-se a pertinência em um contexto bidimensional, local.

O fator de forma associado a cada raio corresponde a uma porção angular do espaço hemisférico obtido através de um círculo de área angular equivalente a uma fração correspondente a um raio, multiplicado pelo coseno do ângulo formado entre o raio e o Zenit do hemisfério local. Este valor somente pode ser pré-calculado quando a amostragem de raios corresponder a um hemisfério de referência local, pois em um sistema de referência geral o fator de forma dependeria também do ângulo formado com a normal da parcela que emite o raio. O método permite um detalhamento sucessivo quando a amostragem inicial detecta variações significativas. Também pode ser aplicado no refinamento progressivo, dado que, tomada uma parcela emissora, pode-se calcular os fatores de forma que a relaciona com as demais no momento do cálculo, sem necessidade de ser pré-calculado.

CAPÍTULO IV

UMA NOVA ABORDAGEM ATRAVÉS DE UM MODELO ESFÉRICO UNIFICADO

O modelo que proporemos, voltado para a análise da iluminação natural em arquitetura e urbanismo, tem como fundamento a unificação dos diferentes elementos de análise num espaço referencial único, definido vetorialmente, capaz de integrar os diferentes momentos da análise de forma eficiente.

Como eficiência, aqui, é colocada a precisão física dos resultados da análise frente a um tempo de processamento compatível com o desenvolvimento do projeto arquitetônico e urbano. Não se trata de estabelecer um procedimento em dois passos, juntando radiosidade e ray-tracing, e sim de um forma unificada de tratar não só o espaço de representação como também os diferentes aspectos da reflexão / transmissão da luz (especular, difusa, difusa direcional), como será detalhado ao longo deste capítulo.

A estrutura principal do modelo foi definida a partir das condições impostas à análise da iluminação natural. Supondo-se um conjunto de superfícies planas delimitadas por polígonos, as quais estejam submetidas apenas à iluminação natural, para que se possa conhecer o resultado das trocas luminosas entre estas superfícies é necessário, aplicando-se o método da radiosidade:

- a) Determinar a visibilidade de cada parcela da superfície em relação ao céu;
- b) Definir o fator de forma de cada superfície em relação às regiões do céu a que está exposta.
- c) Determinar as condições do céu em uma dada circunstância;
- d) Determinar a exposição das superfícies ao Sol, definindo-se também a contribuição inicial de luz em cada parcela exposta ao céu;
- e) Determinar, para cada superfície exposta, a distribuição da luz que emite a todas que lhe são visíveis, implicando na determinação da visibilidade entre cada parcela e o conjunto de todas as outras, bem como no cálculo do fator de forma entre os diferentes pares de parcelas;
- f) através de interações sucessivas, redistribuir a energia nas inter-reflexões / transmissões, até que um equilíbrio aceitável seja atingido.

Pelo menos dois conceitos são fundamentais e, como demonstra a literatura, devem ser incorporados a qualquer modelo que pretenda resultados fisicamente consistentes em tempo útil: o refinamento progressivo e a hierarquia.

O refinamento progressivo, que consiste em analisar as trocas luminosas a partir da emissão das superfícies de maior luminância (Cohen *et al.* (1988)), permite obtenção de resultados práticos imediatos, ou quase imediatos, no caso da luz natural.

Quando há grande concentração de energia em uma fonte e esta fonte é antecipadamente conhecida, o refinamento progressivo apresenta resultados praticamente imediatos; no caso da luz natural está limitado ao processamento inicial da abóbada e da visibilidade para determinar as fontes iniciais. A obtenção de resultados, portanto, depende das características do ambiente em sua relação com a abóbada celeste, dependente das condições geográficas, climáticas e meteorológicas.

A hierarquia, por outro lado, é plenamente aplicável e permite grande incremento de eficiência, principalmente no tocante à exposição à abóbada celeste.

A definição de listas de referência / ligações, bem como o conceito de importância referido por Auperle (1993), ao qual daremos nova interpretação, são muito úteis na montagem de uma estratégia para o refinamento progressivo e construção de hierarquias, dado que a probabilidade maior é que ocorra um grande número de parcelas expostas à luz natural (já que é suposto o desenvolvimento do projeto com o seu melhor aproveitamento), nem todas de igual influência no contexto da análise. Por outro lado, alguns aspectos das abordagens tradicionais podem ser melhorados, particularmente no que concerne aos decorrentes das características do referenciamento local dessas abordagens, que dificultam a integração da análise dos diferentes aspectos do fenômeno lumínico, como por exemplo a reflexão especular no computo da radiosidade. Aspectos relativos à accidentalidade dos métodos no tratamento da visibilidade também podem ser melhorados.

Para tanto, algumas contribuições de outras áreas que não diretamente voltadas à nossa preocupação específica podem ser bastante úteis na delimitação do problema e proposição de uma solução.

IV.1 - UMA CONTRIBUIÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Há que se considerar que os meios computacionais apresentaram recentemente significativo desenvolvimento, não só do ponto de vista de rapidez e capacidade de memória, como também das técnicas de análise de problemas e programação de tarefas. A aplicação de técnicas de Inteligência Artificial na solução de problemas especializados complexos ampliou-se muito na última década, apresentando resultados concretos no tratamento otimizado de muitas tarefas antes tratadas apenas do ponto de vista repetitivo, não seletivo, ou mesmo no tratamento de problemas até então insolúveis do ponto de vista prático.

Conceito recente e muito polêmico, a **Inteligência Artificial** tem gerado muitas discussões e muitas soluções, desde mísseis teleguiados até as "casas inteligentes". Tomaremos como definição adequada a proposta por Rich e Knight (1994):

"Inteligência Artificial (IA) é o estudo de como fazer os computadores realizarem coisas que, no momento, as pessoas fazem melhor. É claro que esta definição é um tanto efêmera por causa de sua referência ao estado atual da ciência da computação. E ela não consegue incluir áreas de impacto potencialmente grande, a saber, problemas que não podem presentemente ser solucionados muito bem nem pelos computadores nem pelas pessoas. Mas ela fornece uma boa noção sobre o que constitui a inteligência artificial e evita as questões filosóficas que dominam as tentativas de definir o significado

tanto de 'inteligência' quanto de 'artificial'. É interessante notar, porém, que tal definição sugere uma semelhança com a filosofia ao mesmo tempo que a evita. A filosofia sempre foi o estudo das áreas do conhecimento que eram tão pouco conhecidas que não tinham se tornado disciplinas distintas em si mesma. À medida que áreas como a matemática e a física tornaram-se mais avançadas, elas se separaram da filosofia."

A definição é adequada, de nossa perspectiva, porque o que nos interessa é uma forma de abordagem das técnicas de programação e do conhecimento especializado, no caso a iluminação natural em Arquitetura e Urbanismo.

Mesmo no contexto desta definição, a Inteligência Artificial tem um universo de aplicação bastante amplo, que vai desde a reprodução das ações humanas, como a fala, a visão, o movimento, o reconhecimento de padrões complexos, até a execução de diferentes tipos de tarefas, realizáveis ou não pelos humanos.

Estamos interessados na realização de tarefas especializadas dentro de um campo de conhecimento, Arquitetura e Urbanismo, que reúne várias ciências, como a Física, a Matemática, a Biologia, a Astronomia, isto para tratar um de seus aspectos: a **Luz**.

Interessa-nos então, dentro do campo da Inteligência Artificial, o ramo voltado para o desenvolvimento dos "Sistemas Especialistas":

"Além das tarefas comuns, muitas pessoas podem executar também uma ou talvez mais tarefas especializadas nas quais é necessária experiência cuidadosamente adquirida. Exemplos destas tarefas incluem projetos na área de engenharia, descobertas científicas, diagnósticos médicos e planejamento financeiro. Programas que conseguem solucionar problemas nesses domínios enquadram-se também sob a égide da inteligência artificial.

Uma pessoa que sabe executar tarefas em diferentes categorias de atividades aprende as técnicas necessárias em uma ordem padrão. Primeiro as habilidades de percepção, lingüística e de senso comum. Mais tarde ... são adquiridas as habilidades especializadas....Apesar de as habilidades especializadas requererem conhecimentos que muitos de nós não temos, elas em geral requerem muito menos conhecimentos do que as habilidades comuns e é mais fácil representar e lidar com esses conhecimentos dentro de programas.

Como resultado, as áreas de aplicação onde atualmente a IA está mais florescendo como disciplina prática (em oposição a uma disciplina puramente de pesquisa) são basicamente os domínios onde se exigem apenas conhecimentos especializados, sem o auxílio do senso comum. Existem milhares de programas chamados sistemas especialistas em operação cotidiana em todas as áreas da indústria e do governo. Cada um destes sistemas tenta resolver parcial ou totalmente um problema prático e significativo que anteriormente exigia o escasso saber de especialistas." (Rich e Knight (1994))

Para Waterman (1986), diante da dificuldade de desenvolver programas completos de propósitos gerais, os cientistas da IA (Inteligência Artificial) entenderam dever concentrar-se no desenvolvimento de métodos gerais e técnicas para uso em programas mais especializados. A década de 70 foi dedicada às técnicas de **“representação”**: o modo de formular um problema pode torná-lo mais fácil de resolver; e de **“pesquisa”**: o modo de controlar inteligentemente a pesquisa de uma solução pode dispensar longos processamentos ou exigências de muita capacidade de memória dos computadores. Esta estratégia deu resultados mas não provocou rupturas.

“Não foi senão ao final da década de 70 que os cientistas da IA começaram a realizar algo absolutamente importante: o poder de resolver problemas de um programa vem do conhecimento que possui, não apenas dos formalismos e esquemas de inferência que emprega. A ruptura conceitual foi feita e pode ser formulada com absoluta simplicidade:

Para fazer um programa inteligente, abasteça-o com grandes quantidades de conhecimento específico, de alta qualidade, sobre alguma área problema.

*Esta realização levou ao desenvolvimento de programas de computador com propósitos muito específicos, sistemas que eram especialistas em alguma limitada área de problemas. Estes programas foram chamados **sistemas especialistas** e um novo campo começou.”*

Não se trata, neste trabalho, de desenvolver um sistema especialista, mas de recorrer a alguns de seus postulados no sentido de melhor solucionar nosso problema específico. A utilização de algumas técnicas de programação conceituadas pelo ramo da Inteligência Artificial permite, sem pretensões de criar um sistema inteligente, modelar procedimentos mais eficientes mesmo da perspectiva de realização de tarefas conhecidas, como veremos adiante.

Temos então uma explicação para a questão que espanta Veach (Shirley *et al.* (1997)): **para ficar mais rápidos, os algoritmos da radiosidade ficam mais complexos porque a eles se agrega mais conhecimento.**

Buscaremos delimitar o campo de aplicação que nos interessa a partir da obra de Rich e Knight (1994), que oferece um amplo painel dos principais conceitos e suas aplicações. Tomemos a resposta do autor dada à pergunta **“O que é Inteligência Artificial?”**

*“Um dos poucos resultados rápidos e difíceis a surgir nas três primeiras décadas da pesquisa em IA é que **a inteligência requer conhecimento**. Para compensar sua principal característica, a indispensabilidade, o conhecimento possui algumas propriedades menos desejáveis, incluindo: ele é volumoso; é difícil caracterizá-lo com precisão; está constantemente mudando; **difere de simples dados por organizar-se de uma maneira que corresponde ao modo como será usado.**”* (grifo nosso).

Rich e Knight (1994) concluem que uma técnica de IA é um método que explora o conhecimento, que deve ser representado de tal forma que: capture generalizações; seja compreendido pelas pessoas que o fornecem; possa ser facilmente modificado para corrigir erros e refletir mudanças do mundo e da nossa visão do mundo;

possa ser usado em inúmeras situações, mesmo não sendo totalmente preciso ou completo; possa ser usado para ajudar a superar o seu próprio volume. Segundo ainda estes autores, para o desenvolvimento de um sistema que solucione um problema específico, é necessário:

a) Definir o problema precisamente. Esta definição tem de incluir especificações precisas sobre qual será a situação ou situações iniciais e também sobre quais situações finais serão consideradas aceitáveis para o problema.

b) Analisar o problema. Umas poucas características importantes podem ter enorme impacto sobre a propriedade de várias técnicas possíveis para a solução do problema.

d) Escolher a melhor ou melhores técnicas de solução de problemas e aplicá-las àquele problema em particular.

Embora os problemas objetos da IA sejam de diferentes naturezas, podem, de maneira geral, ser definidos como uma busca em um espaço de estados (iniciais, intermediários e finais). A aplicação do conhecimento, representado por regras aplicáveis aos estados, conduzem a busca a diferentes estados até que um satisfatório ou final seja atendido.

As características do problema induzem o tipo de busca. No caso de um jogo de xadrez, a transformação de um estado a outro é irreversível, já que o lance não pode ser desfeito, o que não impede que na seqüência de lances volte-se a atingir um mesmo estado já percorrido anteriormente. A demonstração de teoremas matemáticos, por outro lado, permite que se retorne a um estado anterior caso não se atinja progresso em um conjunto de mudanças de estado. Estas duas situações caracterizam dois métodos de busca: um onde o retorno aos estados anteriores é permitido, e outro em que não.

Outra caracterização do espaço de busca refere-se ao modo como as circunstâncias geradas nos diferentes estados é analisada. A **busca em amplitude** consiste na geração de diferentes possibilidades de estados a partir de todas as possibilidades de um estado atual, de forma a selecionar, entre as possíveis, aquela ou aquelas que devem conduzir à solução. A **busca em profundidade** consiste na exploração de uma seqüência de estados sucessores de forma a percorrer uma possibilidade de caminho na busca de uma solução, sem passar por todas as possibilidades de cada estado sucessor. Cada um destes métodos tem suas vantagens e desvantagens.

Segundo Rich e Knight (1994):

“a busca em profundidade requer menos memória, já que apenas os nós do caminho corrente são armazenadas. Isto contrasta com a busca em amplitude em que toda a árvore gerada até o momento precisa ser armazenada.

Por acaso, ou se houver cuidado na ordenação dos estados sucessores alternativos (grifo nosso), a busca em profundidade pode encontrar a solução sem examinar grande parte do espaço de busca. Isto contrasta com a busca em amplitude na qual todas as partes da árvore precisam ser examinadas no nível n antes de serem examinados os nós no nível $n+1$. Isto é

particularmente significativo se existirem muitas soluções aceitáveis. A busca em profundidade pode parar quando uma delas for encontrada.”

A solução pode ser um estado, como no xadrez, onde o estado final é a captura do rei adversário; ou pode ser um percurso no espaço de busca, como por exemplo achar o menor caminho para percorrer várias cidades interligadas por diferentes estradas.

De sorte a melhorar ou apressar os mecanismos de busca, desenvolveu-se a **heurística** (segundo Rich e Knight (1994)):

*“A **heurística** é uma técnica que melhora a eficiência de um processo de busca, possivelmente sacrificando pretensões de completeza. A heurística é como um guia turístico. Ela é válida no sentido de que aponta para direções geralmente interessantes; é imprópria no sentido de que pode deixar de fora pontos de interesse para determinados indivíduos.”*

Além da questão da representação do problema, há também a questão da representação do conhecimento: o **conhecimento declarativo** é aquele em que o conhecimento é especificado, mas o uso que será feito dele não é fornecido. Por outro lado, a **representação procedimental** é aquela em que as informações de controle necessárias ao uso do conhecimento estão embutidas no próprio conhecimento. Para utilizar uma representação procedimental precisamos ampliá-la com um interpretador que siga as instruções fornecidas no conhecimento.

Na classe procedimental está o conhecimento baseado em regras formadas por operadores lógicos, geralmente no formato:

SE (declaração lógica ou condição) ENTÃO (declaração lógica ou procedimento)

O conjunto da aplicação das regras pode seguir duas linhas de raciocínio:

a) Encadeamento para frente: que codificam conhecimentos sobre como responder a certas configurações de entrada.

b) Encadeamento para trás: que codificam conhecimentos sobre como atingir determinados objetivos.

A manipulação do conhecimento aqui, no entanto, foi embutida no programa, ao invés de uma base de conhecimento em disco, pelas implicações no tempo de processamento com acesso a informação em disco.

Podemos definir as seguintes categorias de conhecimentos entronizados no modelo que geram ações sobre os objetos do sistema e seus estados:

a) Conhecimentos Físicos: utilizados nesta etapa para a definição do estado da abóbada e do Sol, nesta etapa, e , no desenvolvimento posterior do sistema, na definição das trocas de radiação difusa e especular. Utilizamos os algoritmos propostos por Tregenza (1993).

b) **Conhecimentos Geométricos:** aplicados na manipulação dos objetos e seus estados, constituem o conhecimento unificador de todas as ações, garantindo a unicidade dos resultados. É essencial na definição dos fatores de forma, do estado da abóbada e do globo, da visibilidade dos vetores de parcelas e na definição final das trocas luminosas.

c) **Conhecimento Arquitetônico:** sobre a iluminação natural, não explícito, mas implícito na definição de procedimentos, tais como permitir “girar” com eficiência o projeto arquitetônico em busca de uma orientação mais adequada, ou investigar o tempo de exposição à luz direta do Sol, ao longo de uma data, em determinado ponto do espaço e segundo uma direção, propiciando o estudo do ofuscamento; ou ainda eliminar a concepção de “dentro” e “fora”, excessivamente simplificadora para tratar ambientes complexos de características intermediárias, onde esta classificação torna-se confusa. Este conhecimento também será importante da conceituação da “importância”.

d) **Conhecimento Lógico:** deve-se observar que o método visa não somente aplicar a geometria vetorial esférica, mas também fazê-lo a partir de premissas lógicas que permitam objetivamente a determinação dos elementos buscados a partir do conhecimento de postulados aplicáveis às diferentes etapas do processo. Desta forma, procurou-se evitar procedimentos aleatórios, como projetar todos os vetores para descobrir quais configuram os elementos projetados esfericamente.

Reservou-se especial atenção a dois aspectos: a **ordem de construção e representação** dos diferentes objetos em um referencial comum, estabelecendo-se um forte vínculo entre posição (indexadores) e elementos (propriedades físicas e geométricas, valores); a **perspectiva correta** de observação das diferentes etapas do problema, que permitiu, entre outras coisas, tirar maior proveito da ordem dos elementos e das características particulares de cada situação.

Somado aos conhecimentos anteriores, o conhecimento lógico ditou vários procedimentos, tais como: desmembrar situações complexas em situações intermediárias de solução mais simplificadas; aplicar, sempre que possível, a técnica precisa de definição de um resultado; testa inicialmente sempre as situações de maior probabilidade de ocorrência, evitando-se verificações na maioria das vezes desnecessárias.

Os preceitos de busca para elaboração do modelo de análise partiram da aplicação dos seguintes métodos:

i) **Tabelamentos de dados**, aplicados às etapas que permitem pré-cálculo de dados necessários aos procedimentos do sistema, de forma a evitar repetições, desde que dentro de limites aceitáveis de capacidade de memória, como por exemplo o próprio globo, ou as datas anuais em formato de números inteiros, ou as características dos materiais.

ii) **Exegese dos postulados matemáticos aplicáveis ao fenômeno**, de forma a permitir o conhecimento do comportamento dos fenômenos lumínicos nos limites de validade das funções matemáticas que os representam, permitindo estabelecer procedimentos inteligentes aplicáveis a cada situação característica do fenômeno. O nível de simplificação atendeu às disponibilidades computacionais na elaboração do sistema.

iii) **Hierarquia de busca**, estabelecendo-se árvores de decisões para implementação de métodos otimizados na obtenção das respostas exigidas em cada tarefa.

A análise detalhada da configuração do problema bem como o percurso para sua solução permitiram estabelecer uma série de premissas lógicas que hierarquizaram o procedimento, de forma a aprofundar-se a análise de cada segmento de conhecimento aplicável no momento da análise.

A utilização de um postulado geométrico como o cosseno do ângulo formado entre dois vetores no espaço, além de conclusões de natureza geométrica, como o descarte de parcelas ocultas a um plano opaco, permitiram também o estabelecimento de um sentido Horário / Anti-Horário de análise para a definição do sistema, que não se fundamenta em nenhum postulado ou teorema, mas que garantiu o ordenamento de intervalos sempre em ordem crescente; este ordenamento, por sua vez, permitiu a definição das projeções esféricas apenas por um conjunto de intervalos, como veremos adiante. A ordem de construção e análise dos objetos e seus estados também obedeceram preceitos lógicos que unificaram um sem número de tarefas, otimizando o sistema. Como exemplo temos a ordem do globo, da abóbada e das diferentes matrizes de análise e de resultados.

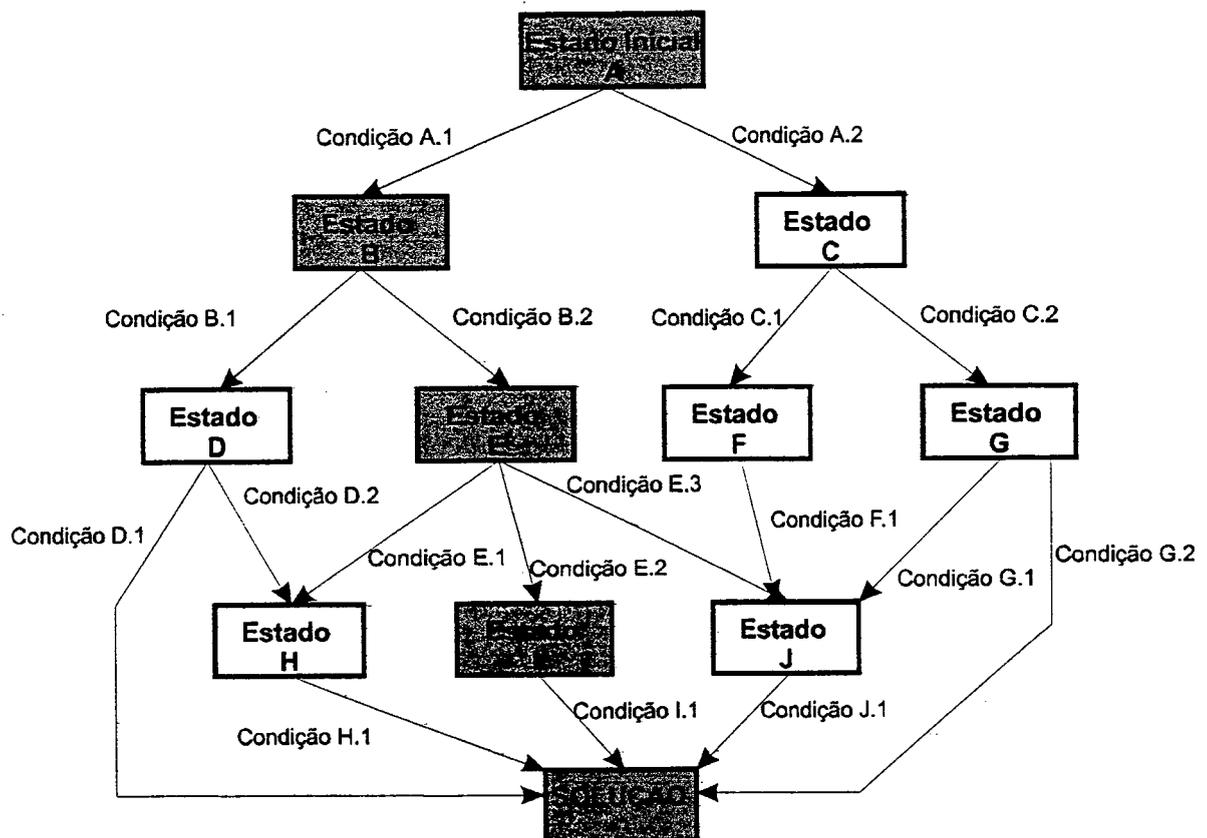


Figura IV.1: Exemplo de algoritmo de busca em profundidade, ressaltando-se um percurso que atinge a solução sem percorrer todos os estados do espaço de busca.

A estrutura lógica fundamental do sistema pode ser definida como um algoritmo de **“busca em profundidade com encadeamento para frente”**, onde a cada segmento do procedimento é verificado o estado de determinados objetos, ou de

conhecimentos gerados a partir de sua manipulação, enquadrado em uma determinada circunstância de conhecimento que determina uma ação específica àquele segmento, que por sua vez propõe uma nova situação para o segmento seguinte. (Figura IV.1).

Por exemplo, quando se toma um plano receptor, este só é processado se não for transparente. No passo seguinte, tomado o foco receptor, o plano emissor só é processado se não contiver o foco receptor; em seguida, o triângulo emissor só é processado se o foco for leitoso, ou se, no caso de ser opaco, pelo menos um dos três vértices formar com a normal receptora um ângulo menor que noventa graus, o que indica que pelo menos parte do elemento emissor é visível pelo foco receptor.

A própria característica do conhecimento geométrico aplicável ao problema, que possibilita o enquadramento da análise em diferentes segmentos de ações, que são percorridos em busca de uma situação aceitável, propiciaram a estruturação de busca da profundidade de forma a sempre otimizar o percurso.

IV.2 - ESTRUTURA GERAL DOS ELEMENTOS DO MODELO

IV.2.1 - O GLOBO ASTRONÔMICO: UM REFERENCIAL ÚNICO

O comentário de Cohen *et al.* (1985) sobre a dificuldade de trabalhar com um referencial esférico de parcelas uniformes não representa, em si, um obstáculo à adoção de um globo de referência, embora seja bastante verdadeira quando consideramos a utilização de cossenos diretores em processos "cegos", o que demanda excessivo tempo de processamento. Por que o termo "cegos"? Nos modelos estudados, a visibilidade é decorrência da investigação do espaço, seja pela emissão de raios (*ray tracing*), seja pela projeção por elementos finitos (hemi-cubo). Sem objetivo de depreciá-los, podemos comparar a emissão de raios a um cego tateando em uma direção de braços estendidos: se encontra um obstáculo em algum de seus membros, para e investiga o espaço em maior profundidade para melhor compreendê-lo antes de prosseguir em nova rota. A projeção de elementos finitos, que confronta todas as parcelas com todas as parcelas, pode ser comparada a um cego que dispara em todas as direções, com regularidade, indo observar ao final o que foi atingido nas diferentes direções.

No entanto, a geometria esférica pode ser bastante adequada se dispusermos de uma estrutura de dados que permita trabalhar não com os dados vetoriais em si, mas com uma referência a eles. Ainda mais quando se pode determinar com precisão o conjunto dessas referências.

O fundamento do método que descreveremos é a adoção de um referencial espacial único e uma abordagem que parte da definição da visibilidade e utiliza métodos que determinam precisamente a projeção de superfícies delimitadas por polígonos no sistema único de referência.

O referencial que adotamos é bastante similar à proposição de divisão da abóbada celeste proposta por Tregenza (1993), consistindo de uma divisão da esfera celeste em faixas de variação uniforme na altura, divididas em ângulos de azimute de forma a subdividir cada faixa em parcelas iguais, sendo que no conjunto das faixas as parcelas representam ângulos esféricos aproximadamente iguais. Duas diferenças básicas, no entanto, são verificadas em nossa proposta:

a) Tregenza (1993) propõe 145 parcelas numeradas a partir da faixa mais próxima do horizonte, na direção Norte, sentido N-L-S-O, em direção ao Zenit, com uma parcela no Zenit. Nosso modelo começa com uma parcela no Zenit, seguindo o mesmo critério de giro que Tregenza (NLSO), do alto pra o horizonte, continuando abaixo do horizonte em faixas sucessivas e simétricas do hemisfério acima do horizonte, até atingir o Nadir, com uma última parcela. Neste tipo de indexação, a primeira metade das parcelas do globo correspondem à abóbada celeste visível acima do horizonte, e a segunda metade das parcelas, o hemisfério do globo celeste abaixo do horizonte. Em nosso estudo utilizamos globos com divisões entre aproximadamente 5.000 e 50.000 parcelas, chegando inclusive a fazer verificações gráficas e de cálculo com globos de até 500.000 parcelas.

b) A proposição de Tregenza (1993) é uma modelagem do céu para integração em um método de radiosidade, enquanto que o globo constitui um sistema de referência representado por pequenos ângulos sólidos em todas as direções, com uma estrutura de dados mais complexa que permite a sua manipulação como sistema de referência do modelo através dos índices.

Este globo, que chamaremos, sem pretensão, de astronômico, permitirá: representar o céu associado aos índices, inclusive com a posição do Sol como referência única para todos os elementos da análise; representar as relações de visibilidade entre as superfícies e a abóbada celeste, bem como da visibilidade das superfícies entre si, também em um referencial único através dos índices; representar as diferentes direções do espaço passíveis de constituírem, por exemplo, percurso de raios luminosos em processos de multi-reflexão, também em um referencial único através dos índices.

Finalmente, o globo permitirá a definição de um conjunto de representação de direções que caracterizam um polígono nele projetado, sem necessidade de projetar todos os seus elementos, apenas seus limites, e sem recorrer a métodos cegos, mas a um método de determinação preciso e de operações elementares. A estrutura de dados do globo astronômico consiste de:

a) Números inteiros representando o número de parcelas e o número de faixas em que está dividido o globo (descontados o Zenit e o Nadir como faixas), e um decimal representando a variação angular entre a altura que delimita cada faixa.

b) Para cada faixa (incluídos o Zenit e o Nadir), um vetor de valores consistindo de um decimal indicando o ângulo sólido de cada parcela da faixa, outro decimal representando o passo angular de variação horizontal entre os elementos da faixa, dois inteiros representando os índices da primeira e da última parcela de cada faixa.

c) Para cada índice apontando uma parcela do globo, um conjunto de três decimais representando os cossenos diretores da direção do centro de cada parcela, em relação ao centro do globo.

d) Adicionalmente, para efeitos de verificação e visualização de resultados nesta tese, foram acrescentados os cossenos diretores dos quatro vértices de cada parcela, que não são, no entanto, necessários à análise no interior do modelo.

No quadro IV.1 temos uma descrição do fracionamento dos globos utilizados:

faixas	30	40	60	90	135	200	300
parcelas	5.870	10.416	23.404	52.602	118.296	259.586	583.902

Na Figura IV.2 temos um globo dividido em 90 faixas num hemisfério (180 no total), contuído de 52.602 parcelas.

O globo pode ser subdividido através de um sistema de *quadthree*, estabelecendo-se sucessivos níveis de refinamento descendente, ou mesmo processar agrupamento de parcelas em hierarquias ascendentes.

Na essência o globo consiste de uma modulação em termos de coordenadas **azimute / altura** associada a um conjunto de índices que as relaciona com os cossenos diretores. Assim sendo, é bastante rápido localizar uma coordenada desse tipo no globo, associando-se-lhe um índice. Da mesma forma, apenas um pouco mais complexa, é a determinação da posição de cossenos diretores, que são antes convertidos em coordenadas daquele tipo. A localização é dada pelo algoritmo abaixo:

```

int Localiza(vet2 v2)
{
    int F, K, p;
    if((v2.h >= gl->hs) && (v2.h <= pi/2))
        p = 0;
    else
    {
        if((v2.h <= -gl->hs) && (v2.h >= -pi/2))
            p = gl->nvert-1;
        else
        {
            F = int((gl->hs - v2.h)/ gl->ph);
            K = int((v2.a + (gl->pa[F]/2))/gl->pa[F]);
            p = gl->vi[F] + K;
        }
    }
    return p;
}

```

onde:

pi = constante 3,1415.....
v2.h e v2.a = altura angular e azimute de um vetor unitário v2.
gl->hs = variação de altura angular das faixas de um globo.
F = índice da faixa do globo que conterá v2
gl->pa[F] = variação angular do azimute das parcelas na faixa F.
gl->vi[F] = índice do vértice inicial da faixa F.
p = índice da posição do vetor v2 no globo.

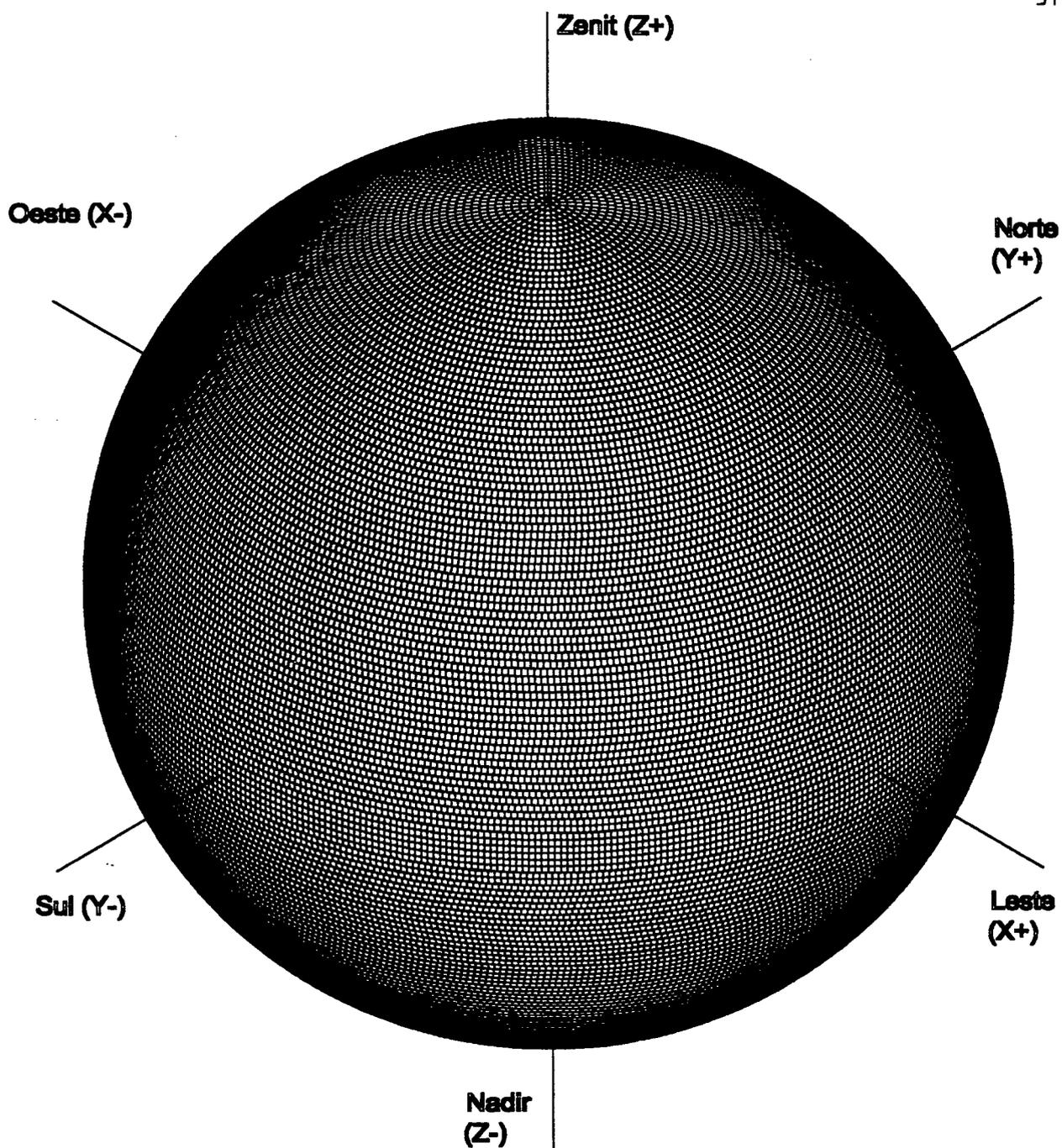


Figura IV.2: Globo de parcelas dividido em 90 faixas num hemisfério, com 52.602 parcelas, superposto ao eixo cartesiano e com a referência dos pontos cardeais.

IV.2.2 - O PROJETO

O projeto utilizado no modelo é representado sob dois aspectos: características geométricas / espaciais e características físicas dos materiais.

a) Características geométricas / espaciais: apoiado em um sistema cartesiano tradicional (eixos X, Y e Z), o sistema de referência do projeto tem orientação coincidente do eixo Z+ com o Zenit, o eixo X+ com a direção Leste e o eixo Y+ com a direção Norte. Sobre estes eixos apoiam-se os cossenos diretores tanto quando obtidos a partir dos elementos de projeto quanto do globo astronômico. A estrutura geométrica adotada obedece a uma hierarquia Objeto::Plano::Triângulo::Vértice, que permite lidar não diretamente com os vértices, mas com suas referências em uma tabela, constituindo os polígonos. Esta estrutura tradicional, no entanto, é complementada por dados adicionais visando o percurso no processamento do modelo.

Os objetos são constituídos de planos, que são delimitados por vértices (no estágio atual com 3 ou 4 vértices) e possuem uma normal constituída de 3 cossenos diretores (x, y e z) e pela distância perpendicular do plano à origem do sistema cartesiano. Os planos são subdivididos em triângulos menores, conforme critérios que serão colocados adiante, Estes triângulos são representados pelos índices dos vértices em uma lista única de coordenadas dos triângulos. Desta forma, o projeto pode ser representado por 5 listas:

- **Lista de Objetos**, cada um indicando o número de planos, de vértices, de triângulos e de vértices de planos que o constitui, bem como o índice dos primeiros elementos de cada uma desta categoria nas listas seguintes.

- **Lista de Planos**, cada um contendo a normal, o primeiro e último triângulos que o formam, o número de vértices que o delimita e o índice de cada vértice. A cada plano é atribuído também um índice para uma lista de materiais, implícita aqui a suposição de que a modelagem do projeto considere a relação **plano <> material**.

- **Lista de Triângulos** contendo, para cada um, os índices dos três vértices que o delimitam, um índice de importância, o índice do plano que o contém, valor decimal para atribuição de energia luminosa em cada face (para o caso de materiais não opacos), e as coordenadas de seu ponto médio.

- **Lista de Vértices** contendo os vértices que delimitam os planos, no formato decimal (x, y, z).

- **Lista de Vértices** contendo os vértices que delimitam os triângulos, no mesmo formato decimal.

No estágio atual do trabalho foram utilizados na representação dos planos, polígonos delimitados por 3 ou 4 arestas, sem ângulos internos superiores a 180 graus, bem como um fracionamento dos planos constituído por malha triangular quadrática, fracionando-se o plano de 4 vértices em dois triângulos e subdividindo-se os triângulos através do parcelamento dos lados em igual número de divisões, estabelecendo-se uma malha de triângulos proporcionais ao gerador, em quantidade igual ao quadrado do número de divisões do lado. Entretanto, outras composições são conceitualmente possíveis dentro da mesma estrutura de dados. A Figura IV.3 representa um projeto em DXF e seu fracionamento. No exemplo foram considerados apenas quatro retângulos como piso exterior, para simplificar. No entanto o método comporta a modelagem do solo através de malhas quadrangulares ou triangulares, não se diferenciando conceitualmente dos objetos construídos.

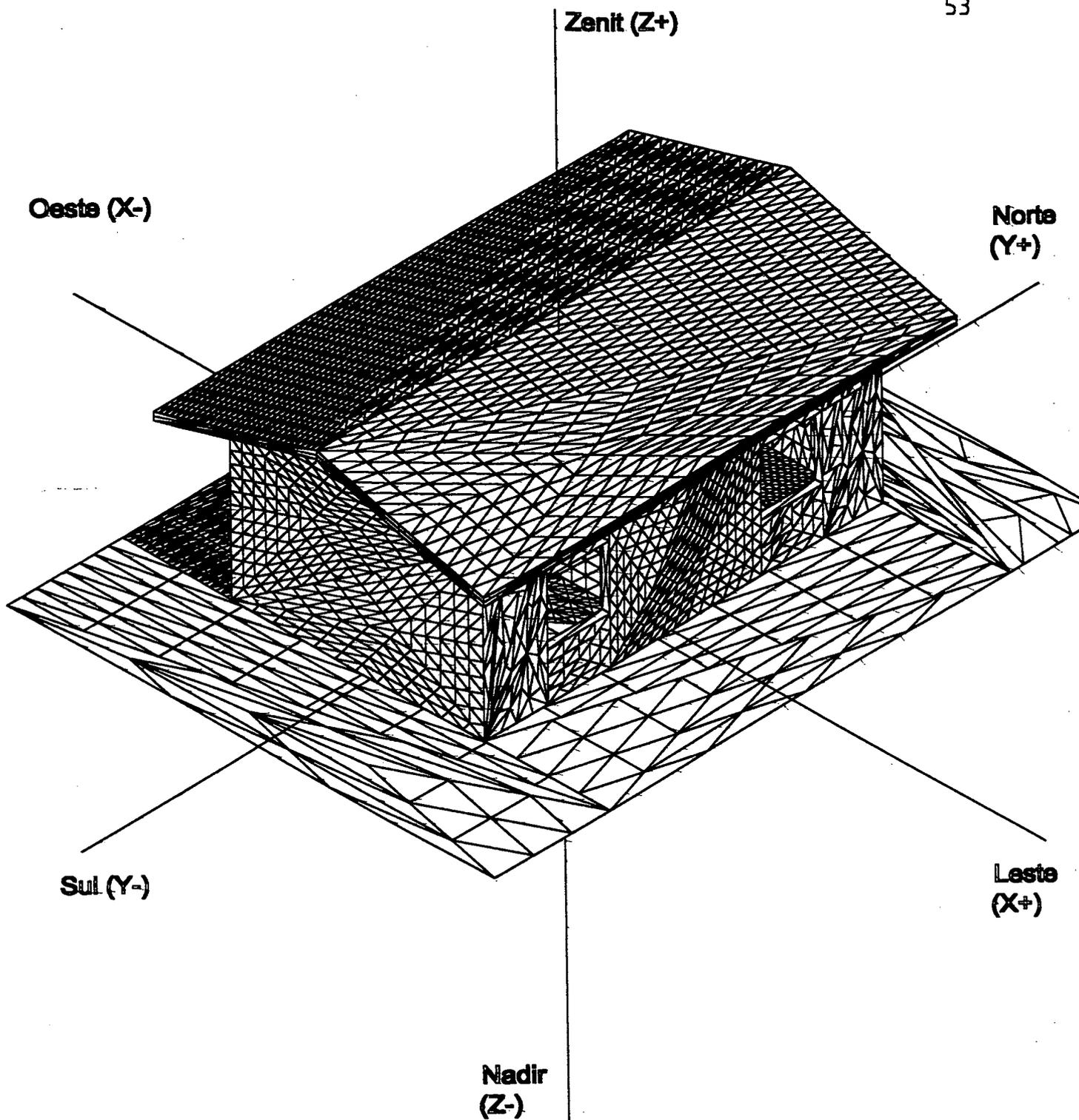


Figura IV.3: Exemplo de projeto desenvolvido no editor gráfico e convertido do formato DXF para a estrutura Objeto :: Plano :: Triângulo :: Vértice . O projeto inicial, de cerca de 40 faces retangulares foi convertido em cerca de 80 triângulos, que depois foram fracionados em 22.382 triângulos.

b) Características físicas dos materiais: estabelecemos de início três tipos de materiais: opacos, translúcidos difusos(que chamaremos leitosos) e transparentes. A modelagem parte do pressuposto que os planos representam as superfícies dos objetos, quando de características opacas, ou uma superfície laminar, quando se tratar de materiais transparentes ou leitosos. Uma parede de vidro grosso deve ser representada como duas lâminas, cada uma com metade da atenuação do conjunto, segundo as características de cada material. Não é possível modelar a refração entre elementos de espessuras significativas (um efeito de lente ou de aquário, por exemplo). No entanto, são poucos os objetos arquitetônicos onde estes efeitos realmente se verificam.

A normal do plano aponta a direção da superfície que apresenta as características luminosas, quando material opaco, ou para as superfícies de referência (que chamaremos de face positiva), nos materiais leitosos e transparentes, já que estes serão considerados como superfícies que participam da análise com suas duas faces.

Os materiais, opacos ou transmissores, podem ser caracterizados desde difuso a especular, com características intermediárias de difusão direcional, conforme proposição de Baker *et al.* (1993), representada na Figura IV. 4.

Esta característica pode ser avaliada pelo ângulo **delta**, que caracteriza maior especularidade quanto mais se aproxima de zero. Os materiais leitosos foram aqui considerados como sendo um material opaco ao qual é somada a parcela de energia que incide no seu verso e é transmitida através do material. Para simplificar, no entanto, esta contribuição é transmitida de forma difusa. Os materiais transparentes têm uma parcela transmitida de acordo com sua transmitância e o ângulo de incidência, e outra parcela refletida, segundo os mesmos parâmetros, cuja reflexão e transmissão foram consideradas especulares.

IV.2.3 - A ABÓBADA CELESTE

A abóbada celeste consiste na representação da energia distribuída pelo céu. Segundo o globo astronômico, onde os valores unitários estão contidos em uma matriz cujo índice corresponde à sua posição no globo. A posição do Sol também é dada por um índice que o posiciona no globo.

O método utilizado para a definição dos valores da abóbada e posição do Sol é o descrito por Tregenza (1993).

Além da distribuição da energia luminosa e do posicionamento do Sol, o modelo contém também a descrição da trajetória do Sol acima do horizonte para o dia e local que definiram as condições da abóbada, descrito por um conjunto de intervalos de parcelas no globo, como será detalhado adiante. A trajetória do Sol contém informações sobre a hora de entrada e saída do Sol no domínio de cada parcela da trajetória. Na Figura IV.5 temos a representação de uma abóbada para céu limpo, representado em faixas de valores, para uma latitude de 40 graus, cerca de 11 horas. Na Figura IV.6 temos uma representação da trajetória do Sol sobre o globo.

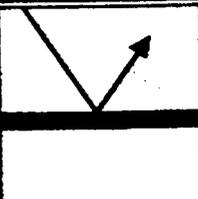
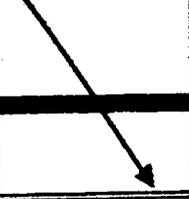
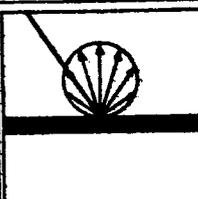
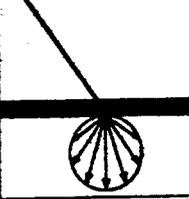
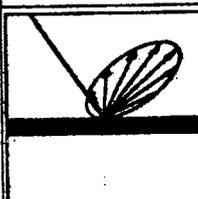
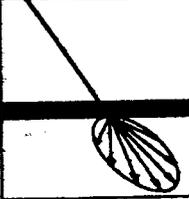
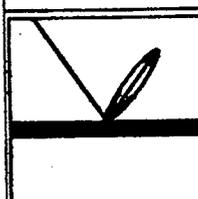
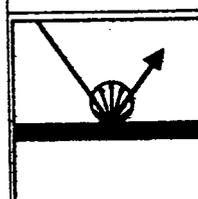
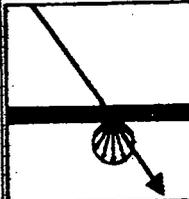
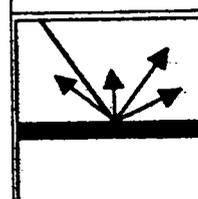
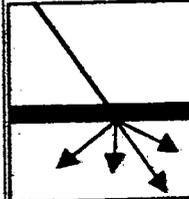
REFLEXÃO		TRANSMISSÃO
	<div data-bbox="526 510 994 614" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> ESPECULAR $\delta = 0^\circ$ </div>	
	<div data-bbox="526 721 994 825" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> DIFUSA $45^\circ < \delta < 60^\circ$ </div>	
	<div data-bbox="526 964 994 1068" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> DISPERSÃO AMPLA $15^\circ < \delta < 45^\circ$ </div>	
	<div data-bbox="526 1196 994 1300" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> DISPERSÃO ESTREITA $0^\circ < \delta < 15^\circ$ </div>	
	<div data-bbox="526 1440 994 1543" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> DIFUSO + ESPECULAR </div>	
	<div data-bbox="526 1661 994 1765" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> PRISMÁTICO COMPLEXO </div>	

Figura IV.4 - Classificação sugerida por Baker *et al.* (1993) para padrões tanto de reflexão quanto de transmissão, onde delta é o ângulo de dispersão para a metade da intensidade.

Sul (Y-)

Oeste (X-)

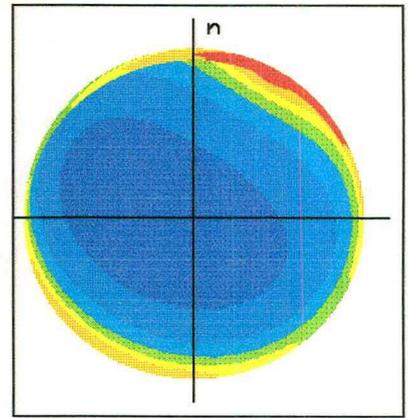
Leste (X+)

Norte (Y+)

Luminância da abóbada expressa em % da luminância máxima

 0 a 10	 40 a 50
 10 a 20	 50 a 60
 20 a 30	 60 a 80
 30 a 40	 80 a 100

Nadir (Z-)



vista plana

Figura IV.5: Luminosidade da abóbada representada em hemisfério do globo dividido em noventa faixas (vista em perspectiva e planta).

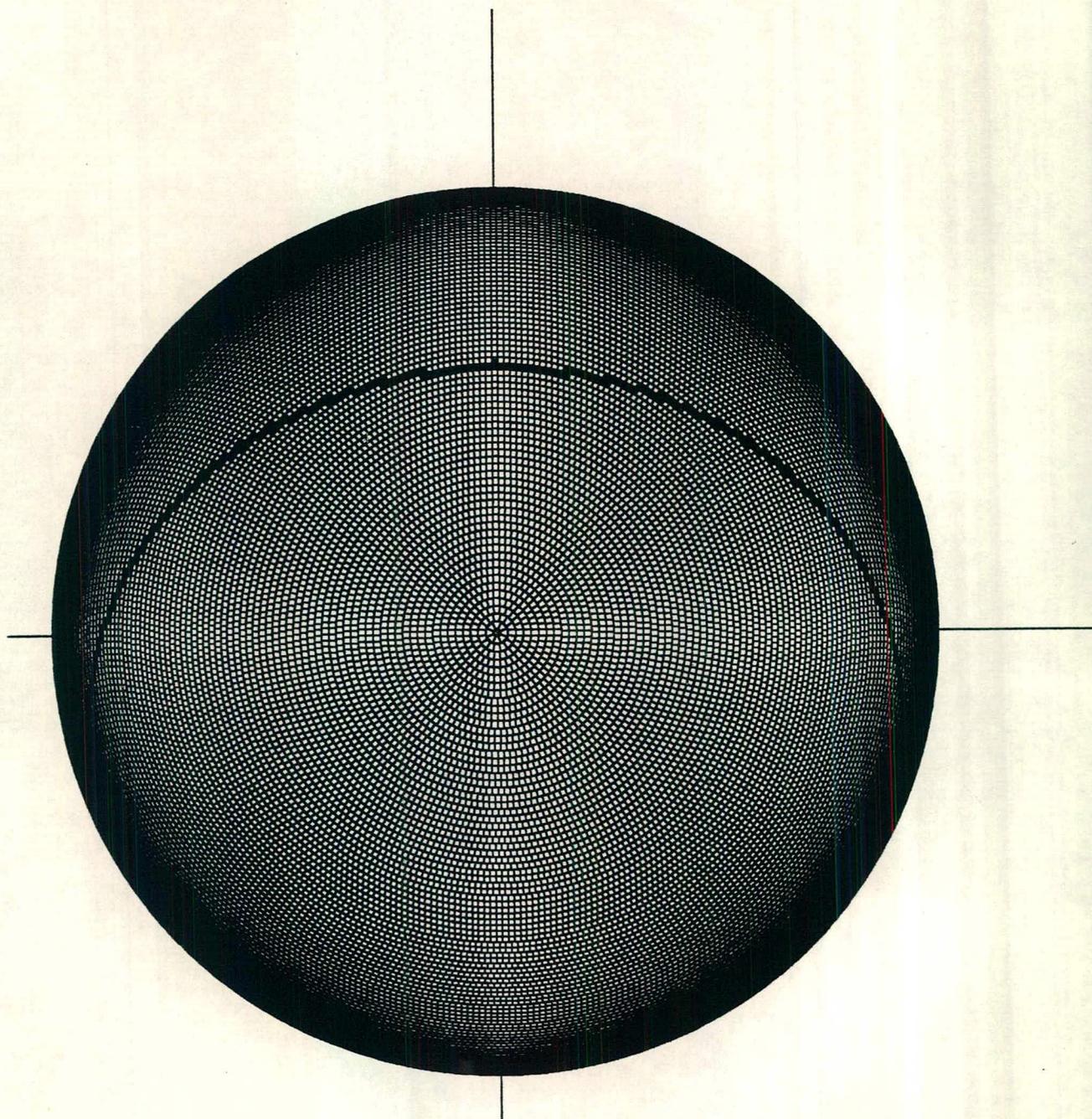


Figura IV.6: Projeção de uma trajetória para latitude de 40 Graus Sul, sobre um globo de 90 faixas (52.602 parcelas), vista do Zenit.

IV.3 - FUNCIONAMENTO DO MODELO

O modelo trabalha em um referencial esférico único no qual são projetados todos os elementos, de forma a ter-se uma descrição detalhada do que é visível em vários níveis e em várias direções. Podemos simplificar a representação em uma figura circular bi-dimensional, considerando elementos opacos (Figura IV.7) e não opacos (Figura IV.8). Observa-se que nos diferentes segmentos da abóbada (assinalados por letras de a até l), configuram-se várias situações:

A análise seguinte parte do pressuposto que as parcelas são consideradas discretas, ou seja, pequenas o suficiente para considerar-se um comportamento homogêneo da superfície quanto a reflexão, transmissão e difusão.

O hemisfério da parcela receptora (O_1) contém valores reais fracionários correspondentes às parcelas diferenciadas de radiação difusa transferidas da Abóbada e valores "zero" correspondentes às parcelas do hemisfério de O_1 que não recebem valores da abóbada. Considerando-se as parcelas opacas, descartadas as que não estão contidas no hemisfério de O_1 , teremos a seguinte situação:

A parcela emite ou não emite, ocupando uma posição no hemisfério de O_1 , com seu índice positivo para emissão e negativo para obstrução. A parcela é considerada como uma face com refletividade e outra não. Quando a face que emite volta-se contra O_1 , consideraremos que ela apenas obstrui o hemisfério, com contribuição nula na inter-reflexão para O_1 .

A parcela em análise é então confrontada com o hemisfério de O_1 para verificar se outra parcela já o ocupou. Se outra parcela já o ocupou, então é analisada, para a posição, a distância das parcelas, assinalando-se a posição com a que estiver mais próxima.

No final do processo é feito o balanço do hemisfério de O_1 , extraíndo-se:

- a) A contribuição de radiação difusa do Céu através da somatória das posições não obstruídas que contêm radiação assinalada.
- b) Os fatores de forma do triângulo O_1 para todas as outras parcelas emissoras.

Vidro como Parcela Emissora

Tomemos como exemplo a situação representada na Figura IV.7, formada pelas parcelas O_1 , V_1 e O_3 , que compreende o arco ef na abóbada da parcela receptora.

1º Caso - V_1 é material leitoso, difusor.

Numa dada interação i , O_1 vai receber a seguinte contribuição do segmento ef:

- a) A parcela refletida da energia incidente na face de V_1 que está voltada para O_1 .

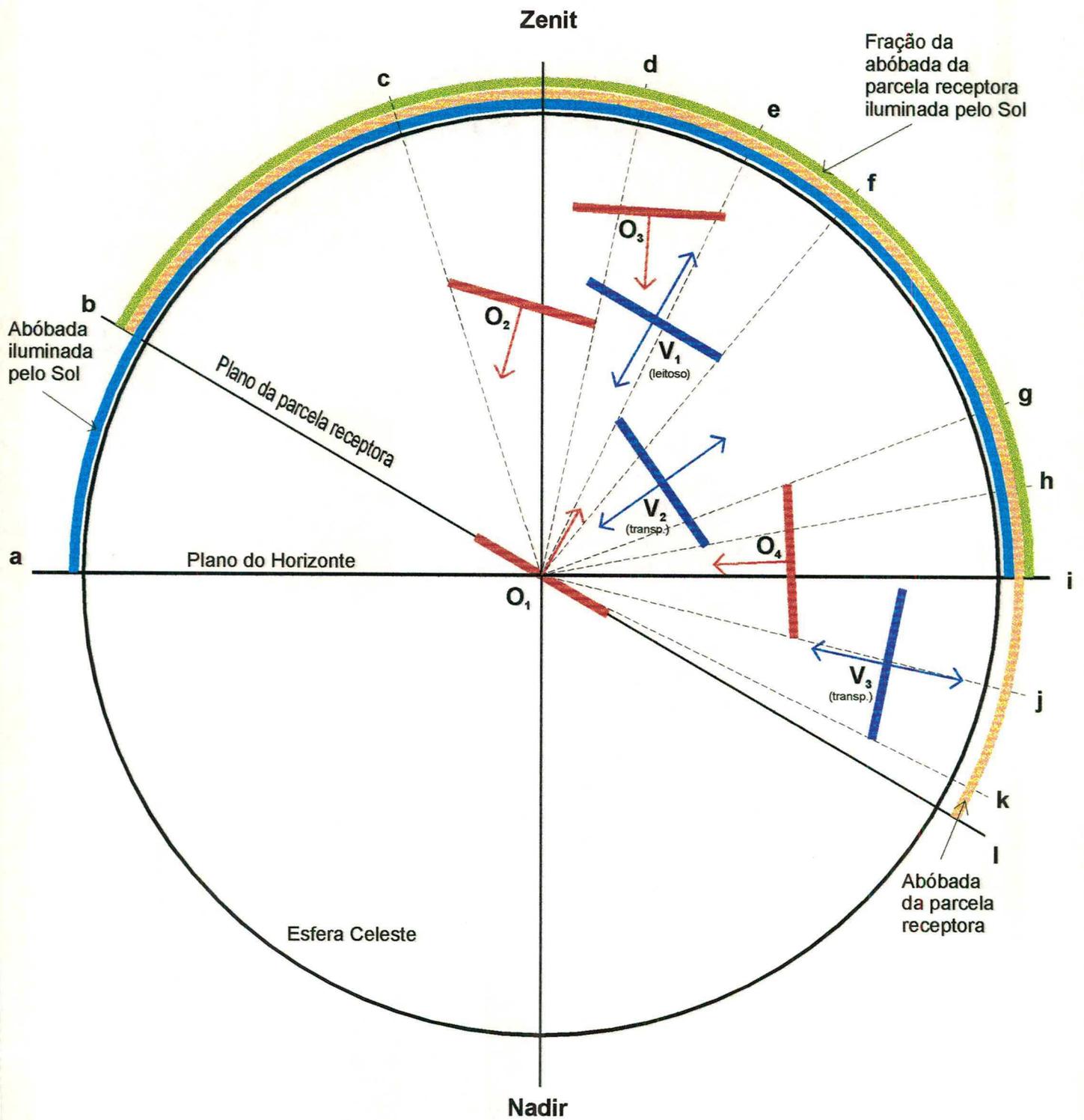


Figura IV.7 - Modelo para cálculo do fator de forma em parcelas opacas.

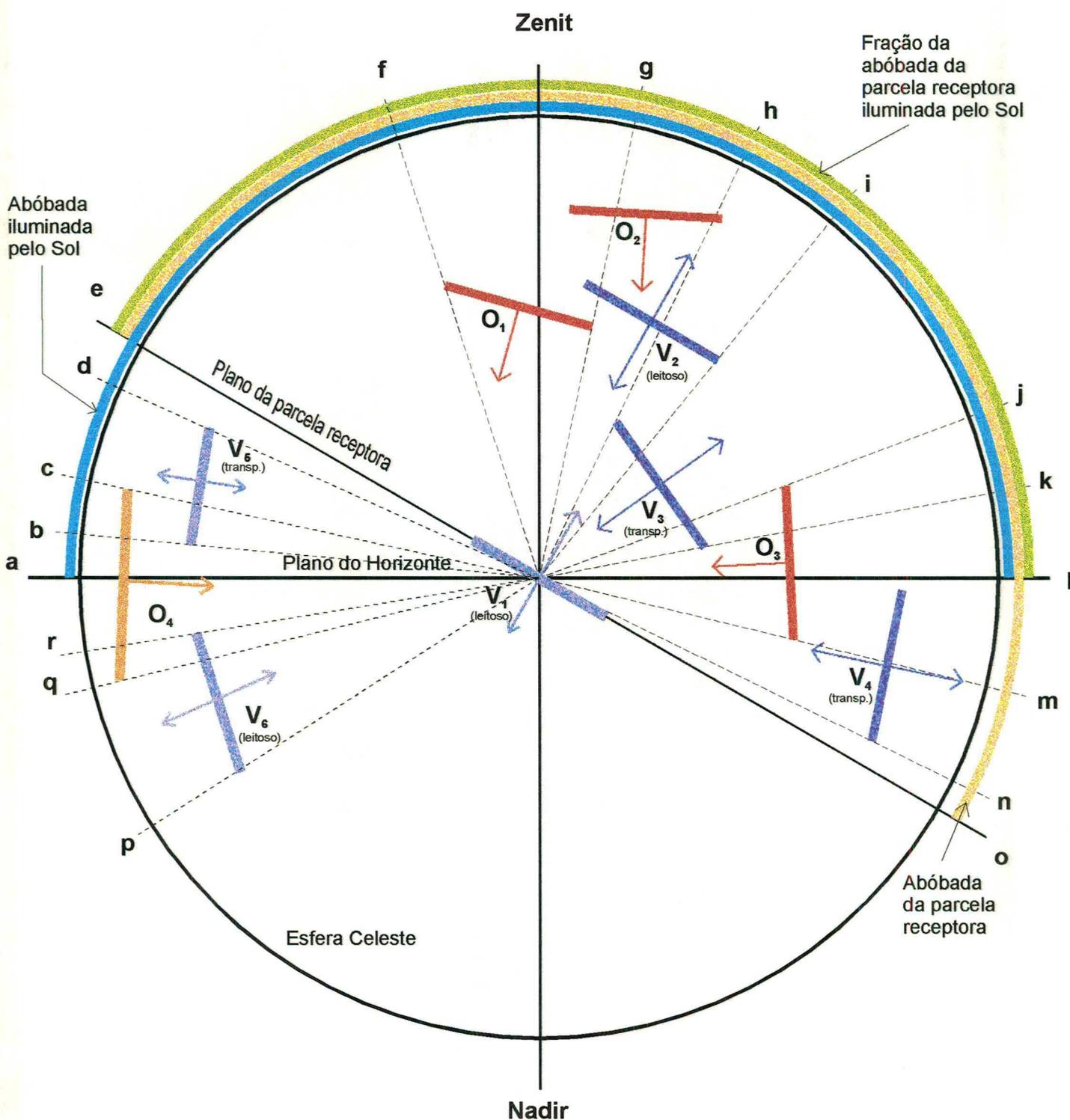


Figura IV.8 - Modelo para cálculo do fator de forma em parcelas de vidro.

b) A parcela da energia incidente na face em oposição a O_1 que é transmitida através de V_1 , de forma difusa.

Esta quantidade de energia, no caso de um vidro difusor, virá computada no tratamento específico do vidro como objeto, correspondente a uma parcela com duas faces opacas que emitem, cada uma, além da energia que refletem da que incide em sua face, a que recebem por transmissão da que incide na face oposta. Ou seja, o tratamento na projeção é o mesmo das parcelas opacas. O diferenciamento dá-se na qualificação da parcela enquanto objeto de programação.

2º Caso - A parcela V_1 é de vidro transparente.

Aqui a cada interação a parcela receptora O_1 recebe:

- a) A energia emitida pela face positiva de V_1 calculada na consideração de V_1 como parcela receptora.
- b) A energia emitida por O_3 atenuada pela transmitância de V_1 .

Neste caso, o pixel deve ser duplicado, com um ponteiro para a superposição de O_3 por V_1 .

3º Caso - Considerando-se O_1 , V_1 e V_2 :

Tomando-se os vidros como transparentes, haverá uma triplicação do pixel, com o último anotando a abóbada.

Com sucessivas superposições, pode-se considerar um efeito cumulativo de tal sorte que a última parcela possa ser descartada atingindo-se um limite determinado, que pode variar segundo a energia emitida pela parcela mais distanciada.

Considerando-se uma parcela opaca O_1 como parcela receptora, conforme mostrado na Figura IV.7, teremos a seguinte situação para o Fator de Forma:

O_1 , - parcela opaca receptora.

O_2 a O_4 - parcelas opacas emissoras.

V_1 e V_3 - vidros leitosos.

V_2 - vidro transparente.

1) arco **bl** - abóbada visível da parcela O_1 .

2) arco **ai** - abóbada iluminada pelo Sol (acima do horizonte).

3) arco **bi** - parcela da abóbada **ai** vista da parcela O_1 .

Considerando-se a abóbada **bl** visível de O_1 , teremos o seguinte conjunto de projeções:

4) **arco bc** - conjunto de pixels da abóbada iluminada pelo Sol, vistos diretamente de O_1 , computados na entrada inicial de energia e descartados na análise de interações para definição da radiosidade.

5) **arco cd** - conjunto de pixels projetados pela parcela O_2 . A contribuição de cada pixel é extraída da luminância de O_2 , corrigidos por fatores relativos à posição de cada pixel.

6) **arco de** - conjunto de pixels projetados pela parcela V_1 (vidro leitoso), obedecidos os mesmos critérios de O_2 em **cd**, considerada apenas a face voltada para O_1 .

7) **arco ef** - aqui há uma duplicação do segmento, provocada por V_2 , transparente. Assim, teremos:

7.1) O segmento é computado com a luminância refletida por V_2 , da energia que incide na face voltada para O_1 . Aqui é utilizado o procedimento padrão, como em **cd** e **de**.

7.2) É considerado o segmento projetado por V_1 em **ef**, com o procedimento padrão corrigido pela transmitância de V_2 .

8) **arco fg** - O segmento também é duplicado:

8.1) Luminância emitida pela face de V_2 voltada para O_1 , correspondente à energia refletida por esta face.

8.2) Iluminância da abóbada em **fg**, corrigida pela transmitância de V_2 .

9) **arco gh** - mesmo tratamento dado ao segmento **ef** (ver 7).

9.1) Luminância refletida de V_2 .

9.2) Luminância de O_4 , atenuada pela transmitância de V_2 .

10) **arco hj** - mesmo tratamento dado ao segmento **cd** (ver 5).

11) **arco jk** - Há uma duplicação:

11.1) Luminância refletida por V_3 da energia incidente na face voltada para O_1 .

11.2) Segmento projetado pela abóbada visível de O_1 em **jk**, que serão descartadas, pois não têm energia luminosa.

12) **arco kl** - segmento projetado pela abóbada visível de O_1 , que será descartado porque não tem energia luminosa.

O Vidro como Parcela Receptora

No caso de uma parcela receptora de vidro, como configurada na Figura IV.8, teremos computada, na face que convencionamos como positiva o mesmo tratamento

dado à parcela opaca receptora considerada na Figura IV.7. No entanto, adicionalmente é computada a incidência de energia na face convencionada negativa.

Aqui teremos dois tratamentos diferenciados:

1) Vidro Leitoso - A energia que incide em cada face é decomposta numa parcela refletida, outra absorvida e outra transmitida. Assim a energia transmitida pela face positiva é computada na luminância da face negativa e vice-versa. Esta hipótese considera que a energia que não foi absorvida pela parcela ou foi refletida de forma difusa, ou foi transmitida para a face oposta, sendo emitida também de forma difusa.

2) Vidro Transparente - Aqui, a hipótese é que a energia não absorvida é refletida parte difusa, e parte transmitida especularmente à outra face. Desta forma a energia incidente em cada face terá computada apenas a parte correspondente à reflexão difusa. A parte transmitida será calculada através da superposição das projeções na abóbada, como se verá adiante.

IV.3.1 - PROJEÇÃO DE UM POLÍGONO NO GLOBO

O modelo opera através da projeção dos elementos de análise no globo astronômico.

Para caracterizar uma projeção recorreremos à definição de um **intervalo de parcelas**: uma fração de uma faixa do globo, especificada pelos índices da parcela que inicia e da que termina o intervalo. Desta forma, a projeção de um polígono ou a descrição de uma região do globo pode ser feita por um conjunto de intervalos associados a diferentes faixas, que preenchem a região ou projeção descrita, como exemplificado na Figura IV.9.

Este procedimento seria bastante infrutífero se tivéssemos que recorrer aos métodos aleatórios ou de amplitude para definir cada parcela do intervalo. No entanto, a construção de um modelo esférico permite uma abordagem mais consistente e precisa.

Como o globo astronômico é uma representação de direções, podemos supor seu raio como sendo unitário. Supondo-se um ponto (o ponto médio de uma parcela, p. ex.) e um polígono (um triângulo, p.ex.) no espaço cartesiano, centrado-se o globo no ponto poderemos definir três circunferências nele projetadas, geradas pela interseção do globo com os planos que passam pela origem e cada uma das arestas do polígono. Cada uma das circunferências define no globo dois hemisférios, um que contém o polígono e outro que não. A interseção destes hemisférios gera a projeção. Tomemos como exemplo uma situação bidimensional formada por um ponto **I** e um polígono triangular **ABC**, conforme a Figura IV.10.

O ponto **I** pertencerá ao triângulo **ABC** se obedecer à condição de, tomada uma reta que passe por dois vértices, dividindo o plano em dois semi-planos, o ponto estiver no mesmo semi-plano que o vértice não contido na reta que passa pelos outros dois.

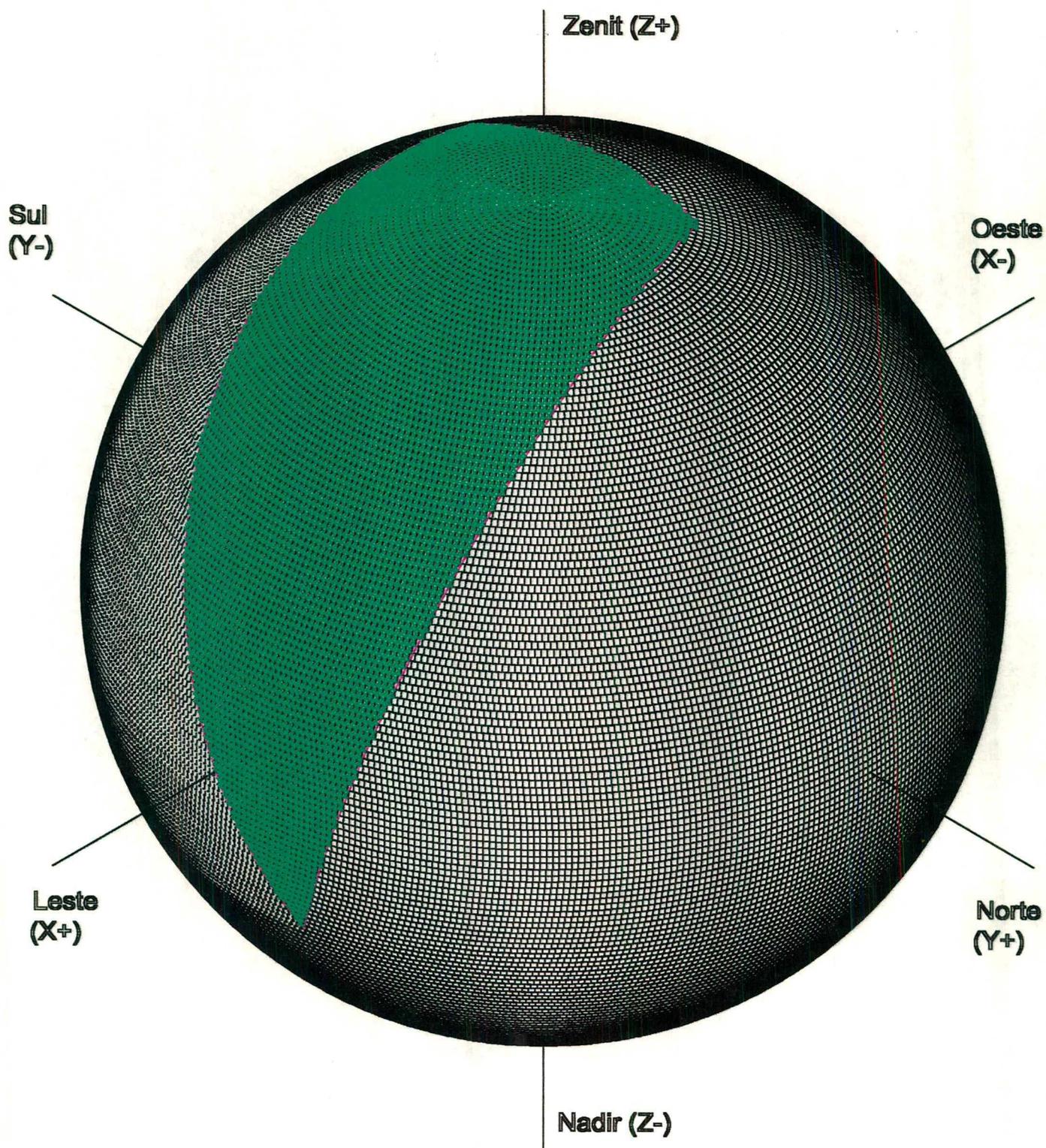
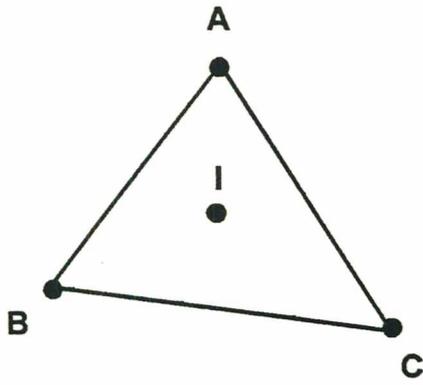
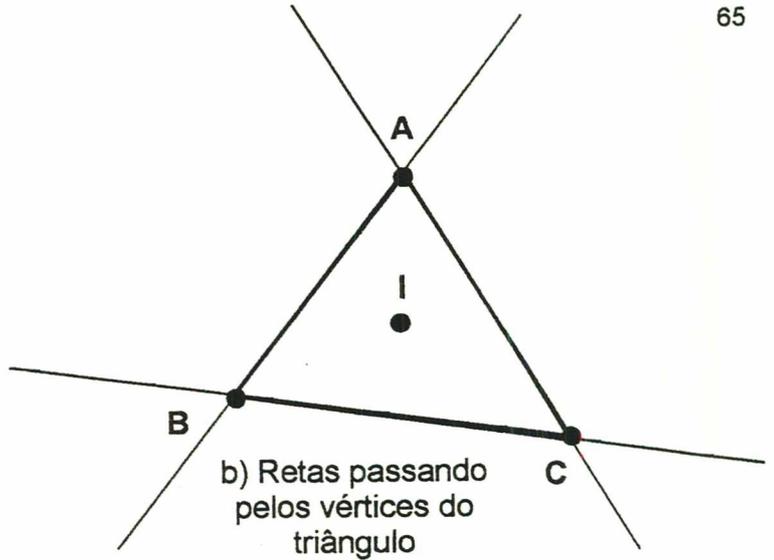


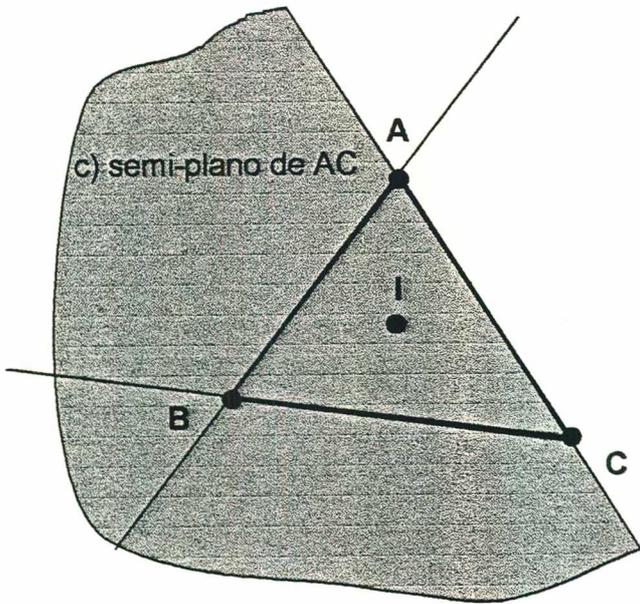
Figura IV.9: Exemplo de triângulo esférico assinalado sobre o globo, ressaltadas as parcelas nele contidas.



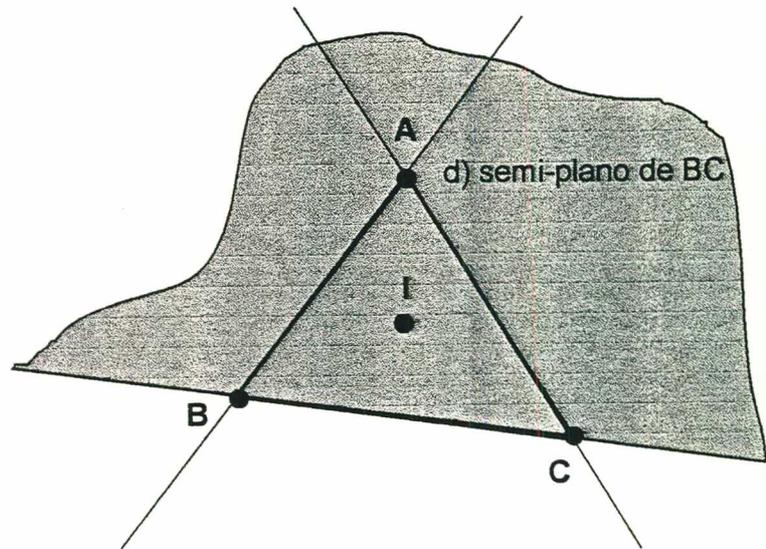
a) Triângulo ABC



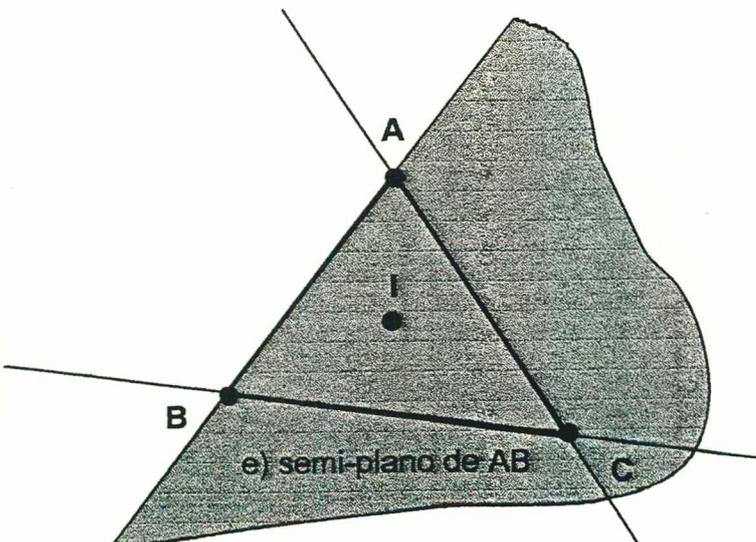
b) Retas passando pelos vértices do triângulo



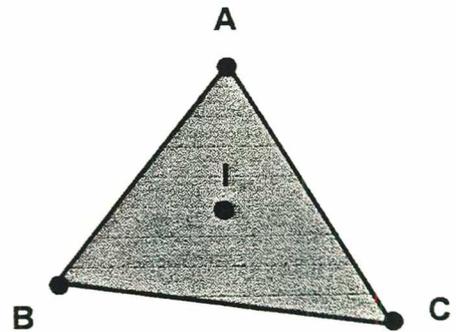
c) semi-plano de AC



d) semi-plano de BC



e) semi-plano de AB



f) Intersecção dos três semi-planos

Figura IV.10: Determinação da pertinência de um ponto a um triângulo através da análise da continência em semi - planos

Este raciocínio é válido para o globo astronômico, dado que a circunferência que é definida no globo pela interseção do plano que passa pela origem e uma das arestas (que chamaremos plano da aresta) pode ter sua interseção determinada a partir de uma equação de segundo grau, gerando no máximo dois pontos.

Na Figura IV.11 temos uma representação das 3 circunferências das arestas de um triângulo emissor, relativo a um receptor na origem do sistema. A projeção esférica do triângulo emissor é dada por ABC. Para uma definida faixa de parcelas temos uma circunferência paralela ao plano XY que contém o centro das faixas. Esta circunferência intercepta a que contém o arco AB nos pontos IAB1 e IAB2, e a que contém o arco AC em IAC1 e IAC2; não intercepta a que contém o arco AC. O segmento de arco IAB2 - IAC1 está contido na projeção. Na Figura IV.12, excluimos os triângulos. De acordo com os fundamentos de pertinência da figura IV.10, a projeção do triângulo está contida, para a circunferência que contém o arco AC, no hemisfério assinalado pelo arco da faixa n contida entre as interseções IAC1 e IAC2, percorrendo sentido NLSO (horário). Para o arco AB, o segmento da faixa n entre IAB1 e IAB2, percorrido no sentido NLSO (horário) está no hemisfério da projeção. O par de vetores unitários que aponta para as duas interseções de um plano de aresta é dado pelo algoritmo abaixo:

Inters(HWND hjan, int ff, Normal NL)

```
{
double h;
double c1, c1b, c2, c2b, c3;
double A, B, C, D;

if(ff <= glf)
{
h = pi/2 - (ff * glph);
}
else
{
h = pi/2 - (ff * glph);
}
c3 = sin(h);
if(fabs(NL.c1) > 0.0000001)
{
A = NL.c1 * NL.c1 + NL.c2 * NL.c2;
B = 2 * c3 * NL.c2 * NL.c3;
C = c3 * c3 * (NL.c3 * NL.c3 + NL.c1 * NL.c1) - NL.c1 * NL.c1;
double dt;
dt = B * B - 4 * A * C;
D = sqrt(dt);
c2 = (-B + D) / (2 * A);
c2b = (-B - D) / (2 * A);
c1 = (-c3 * NL.c3 - c2 * NL.c2) / NL.c1;
c1b = (-c3 * NL.c3 - c2b * NL.c2) / NL.c1;
}
else
{
A = NL.c1 * NL.c1 + NL.c2 * NL.c2;
```

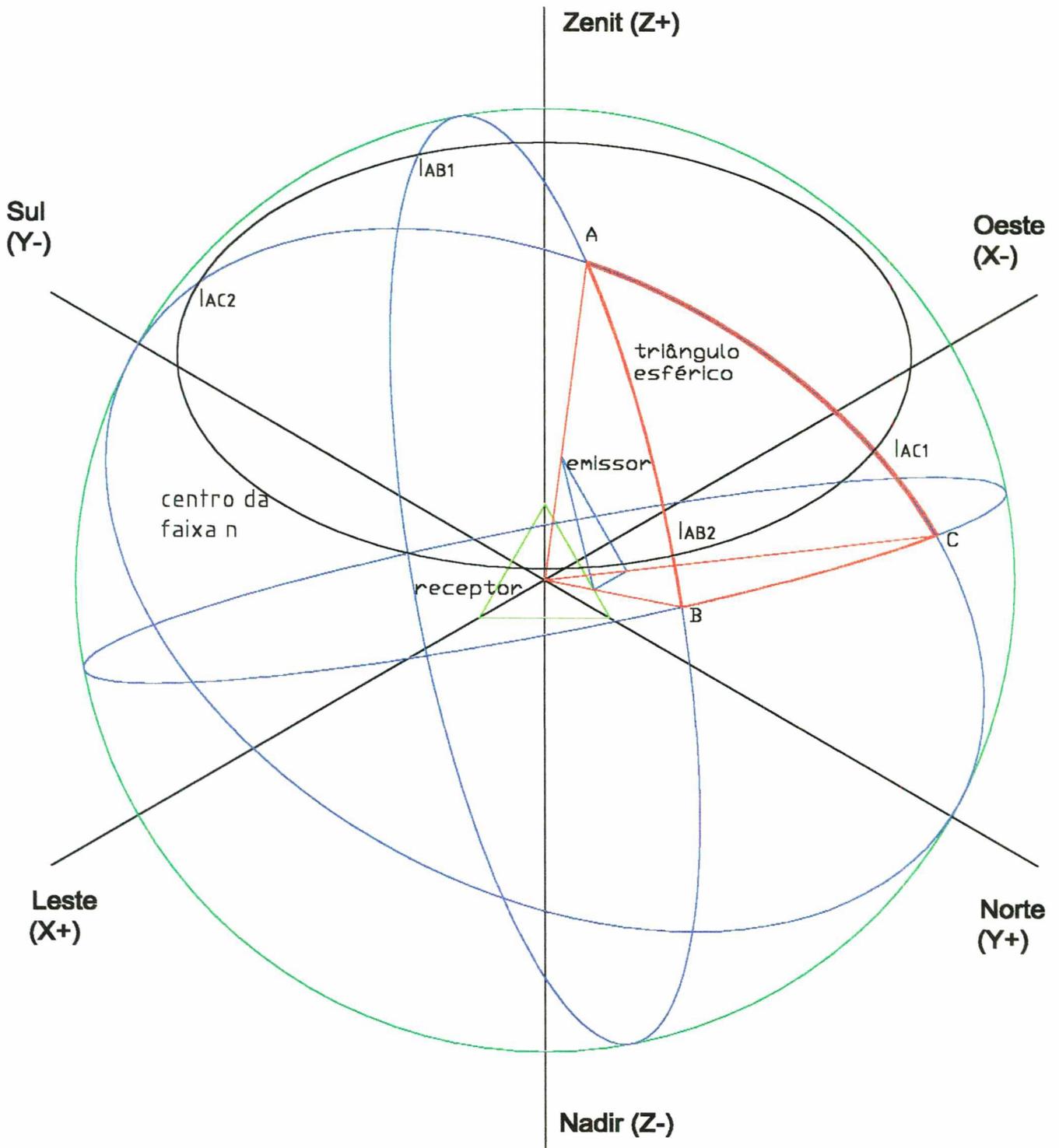


Figura IV.11: Triângulo esférico gerado pela intersecção das três circunferências que passam pelas arestas do polígono triangular emissor e com centro no ponto médio do receptor, colocado como centro do globo. Os pontos IAB1 e IAB2 definem o arco da circunferência da faixa n que estão, com relação à circunferência que passa pelo arco AB, no mesmo hemisfério que o triângulo esférico. Analogamente, IAC1 e IAC2 definem a mesma situação com relação à circunferência que passa por AC.

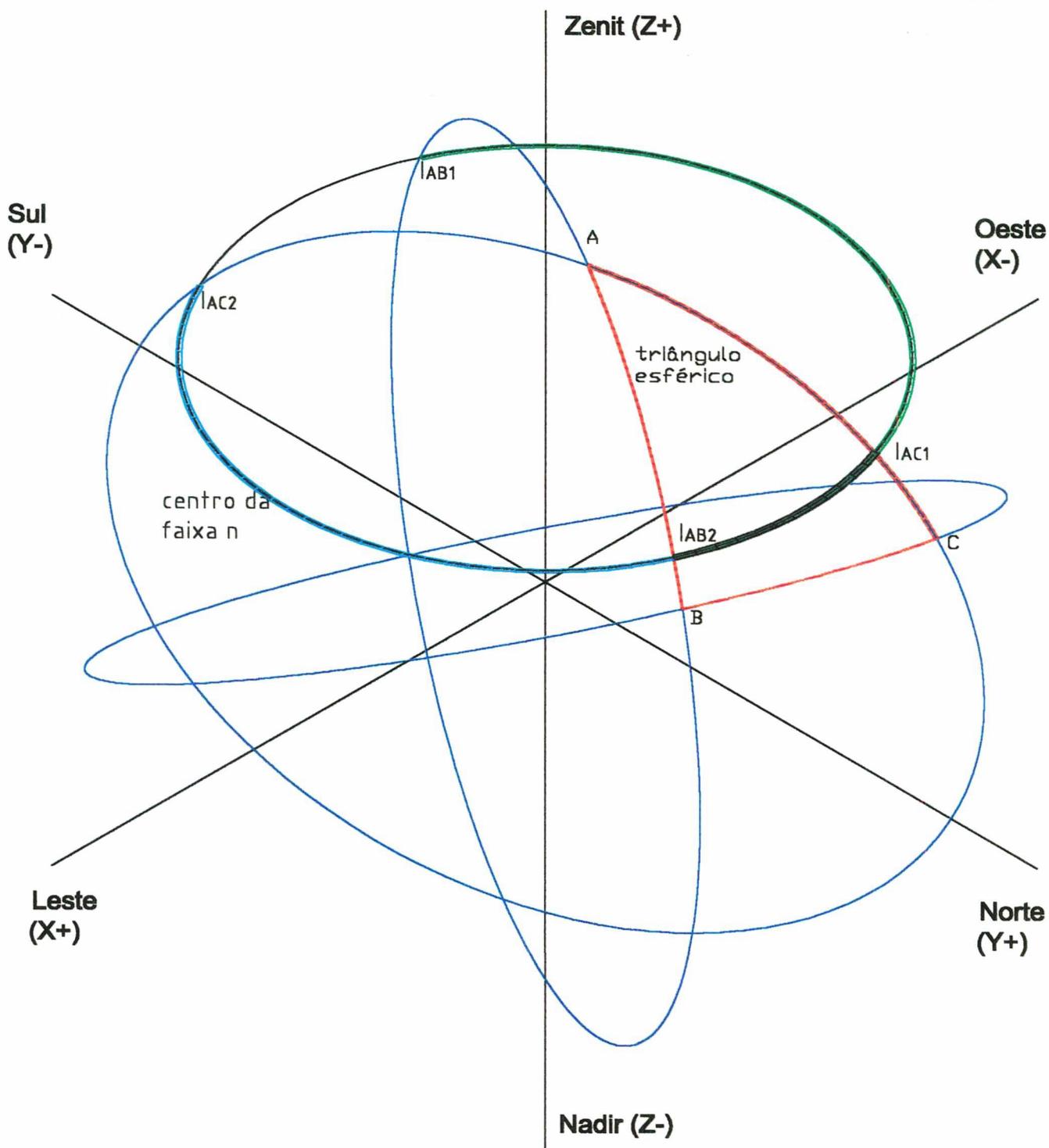


Figura IV.12: O segmento de arco $|AC1-|AB2|$ define, para a circunferência que contém o centro das parcelas da faixa n, o segmento que é comum aos arcos $|AB1-|AB2|$ e $|AC1-|AC2|$, e que define o arco desta circunferência contido no triângulo esférico ABC.

```

B = 2 * c3 * NL.c1 * NL.c3;
C = c3 * c3 * (NL.c3 * NL.c3 + NL.c2 * NL.c2) - NL.c2 * NL.c2;
double dt;
dt = B * B - 4 * A * C;
D = sqrt(dt);
c1 = (-B + D) / (2*A);
c1b = (-B - D) / (2*A);
c2 = (-c3 * NL.c3 - c1 * NL.c1) / NL.c2;
c2b = (-c3 * NL.c3 - c1b * NL.c1) / NL.c2;
}
I0.c1 = c1;
I0.c2 = c2;
I0.c3 = c3;
I1.c1 = c1b;
I1.c2 = c2b;
I1.c3 = c3;
return 0;
} // fim inters

```

onde:

glf = número de faixas em um hemisfério do globo;
glph = variação da altura angular de uma faixa no globo;
ff = índice da faixa do globo interceptada;
NL = Normal do plano de interseção, expressa em cossenos diretores c1, c2 e c3
I0 e I1 = Vetores unitários apontando a interseção, expressos em cossenos diretores c1, c2 e c3

Conhecidos os cossenos diretores das interseções entre a circunferência do plano da aresta e a circunferência que contém os centros das parcelas de uma dada faixa, os dois pontos obtidos são confrontados com um vetor denominado ângulo inicial. Atribui-se à interseção que com ele forma o menor ângulo a condição de interseção inicial.

Associado à definição de um sentido (horário / anti-horário) relativo ao conjunto de referência, pode-se determinar a parcela inicial e a final do intervalo de uma faixa contida no hemisfério onde está projetado o polígono, a partir dos cossenos diretores da interseção dividindo-se seus azimutes pelo passo angular de cada faixa, acrescentando-se o número de parcelas obtido ao índice da parcela inicial da faixa. É necessária uma análise, em função do sentido atribuído (horário / anti-horário), para saber se as parcelas fracionárias serão incluídas ou excluídas.

Desta forma, obtém-se um conjunto de intervalos para cada plano de aresta, definidos apenas, e isto é importante no método, pelos índices das parcelas iniciais e finais. Como o hemisfério válido pode conter a direção Norte, é necessário que em algumas faixas a projeção seja representada por dois intervalos numericamente descontínuos, mas espacialmente contínuos.

O sentido da análise, que se mostrou necessário para facilitar a uniformização de vários procedimentos, é obtido atribuindo-se a condição de vetor inicial ao vetor que parte da origem e está contido na interseção do plano da aresta com o plano horizontal e forma o menor ângulo com a direção Norte. O sentido é então atribuído verificando-se o

sentido do arco percorrido entre o vetor inicial e a projeção horizontal da normal que aponta o hemisfério válido da projeção.

O primeiro passo do algoritmo para definição dos intervalos que representam um hemisfério (Figura IV.13) consiste em definir os vetores (3 ou 4, em nosso modelo) formados pelo ponto central e cada vértice do polígono. São tomados então dois a dois, segundo as arestas do polígono, definindo-se um plano de aresta e calculando-se a normal. É necessário verificar se a normal calculada corresponde ao hemisfério correto, calculando-se o ângulo entre ela e um dos vetores do polígono não contidos no plano. Caso este ângulo seja menor que 90 graus, a normal está correta, caso contrário deverá ser invertida. Em seguida, calcula-se as interseções da circunferência do plano da aresta com o plano horizontal, atribuindo-se à de menor azimute a condição de ângulo inicial, que é comparado à projeção horizontal da normal do plano da aresta, atribuindo-se o sentido horário (NLSO) ou anti-horário (NOSL), conforme o menor ângulo percorrido entre o ângulo inicial e a normal. (Figura IV.14).

Dividindo-se a altura angular de um vetor perpendicular à normal contido num plano vertical passando por ela e apontando acima do horizonte, pelo passo de variação da altura angular do globo, teremos quantas faixas acima e abaixo do horizonte o plano da aresta interceptará no globo, dado que este vetor representa o ponto da circunferência da aresta de maior altura angular em relação ao plano do horizonte. No caso de um plano cuja normal tenha altura negativa, o hemisfério será representado por faixas que iniciam na interseção mais alta do plano e vão até o Nadir. Para normais com altura positiva, o hemisfério vai do Zenit até a máxima faixa inferior interceptada pela circunferência da aresta. No entanto, apenas as faixas interceptadas pela circunferência da aresta necessitam ter os intervalos definidos a partir do cálculo das interseções, dado que as demais são integralmente representadas pelas parcelas inicial e final de cada faixa no globo.

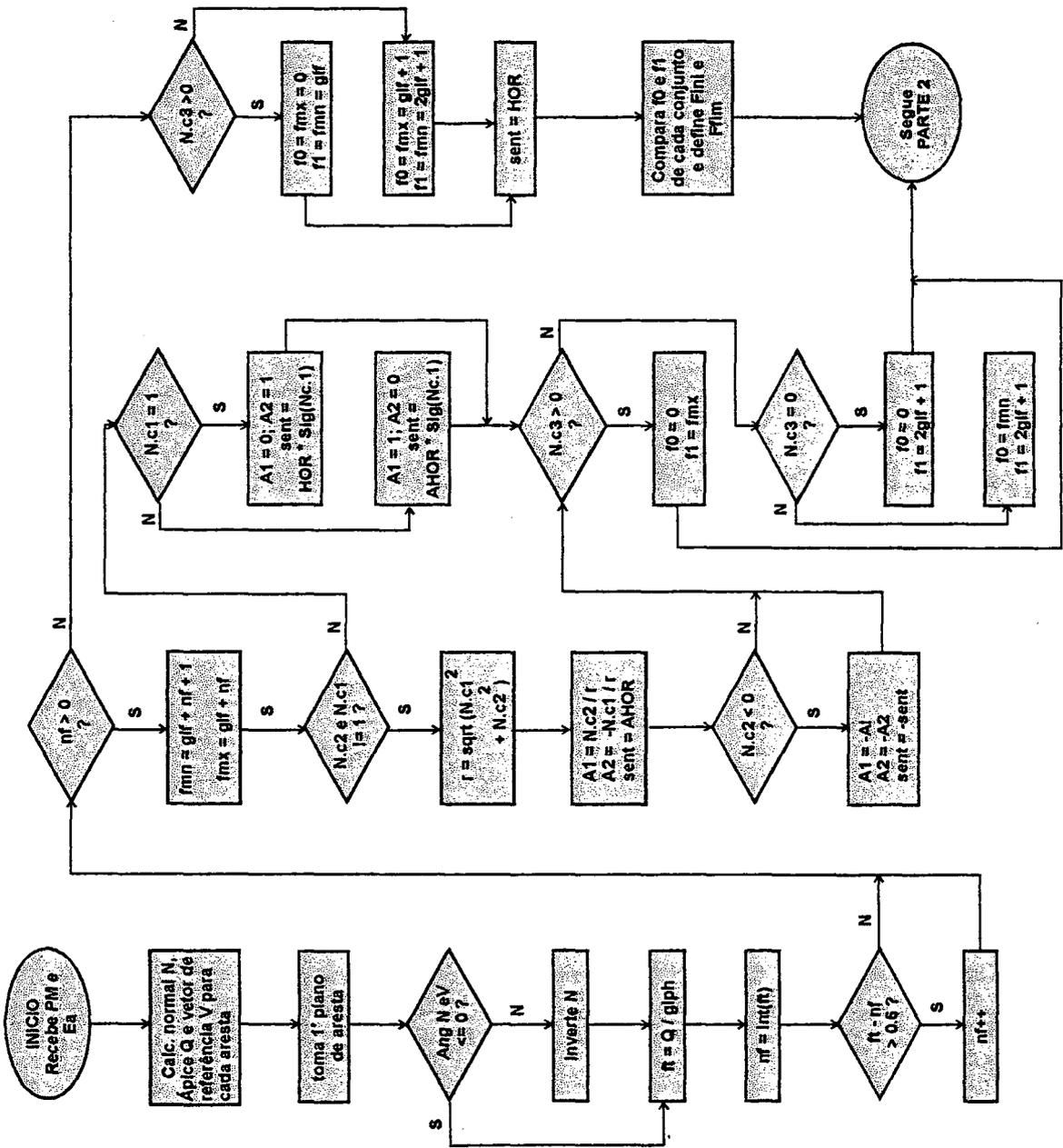
Considerando-se apenas a abóbada celeste, a representação corresponderia apenas à metade superior do globo.

Conhecidas as faixas iniciais e finais de cada hemisfério relativo às arestas do polígono é bastante simples definir o intervalo de faixas comum a todas as arestas, de sorte que, neste conjunto, apenas as faixas interceptadas são calculadas e transformadas em intervalos em cada hemisfério.

De cada plano de aresta resulta uma estrutura onde se associa ao globo um conjunto de intervalos que representam a projeção, localizados apenas nas faixas dos hemisférios de aresta comuns ao polígono. (Figura IV.15)

Estas estruturas (3 ou 4 para cada polígono, no nosso modelo) são comparadas através de um método bastante simples (Figura IV.16), que compara um intervalo de números inteiros positivos com outro intervalo similar, com igual ou menor número de elementos que o primeiro. O raciocínio básico é que se a parcela final do menor intervalo for menor que a parcela inicial do intervalo maior; ou se a parcela inicial do menor intervalo for maior que a parcela final do maior intervalo, não há interseção entre os dois intervalos. Caso contrário, a interseção pode ser obtida comparando as parcelas iniciais e finais de cada intervalo, tomando-se o par inicial / final formado pela maior parcela inicial e pela menor parcela final, entre os dois intervalos.

Figura IV.13a: Algoritmo para definição dos conjuntos de intervalos de parcelas relativos a um plano de aresta - Parte 1



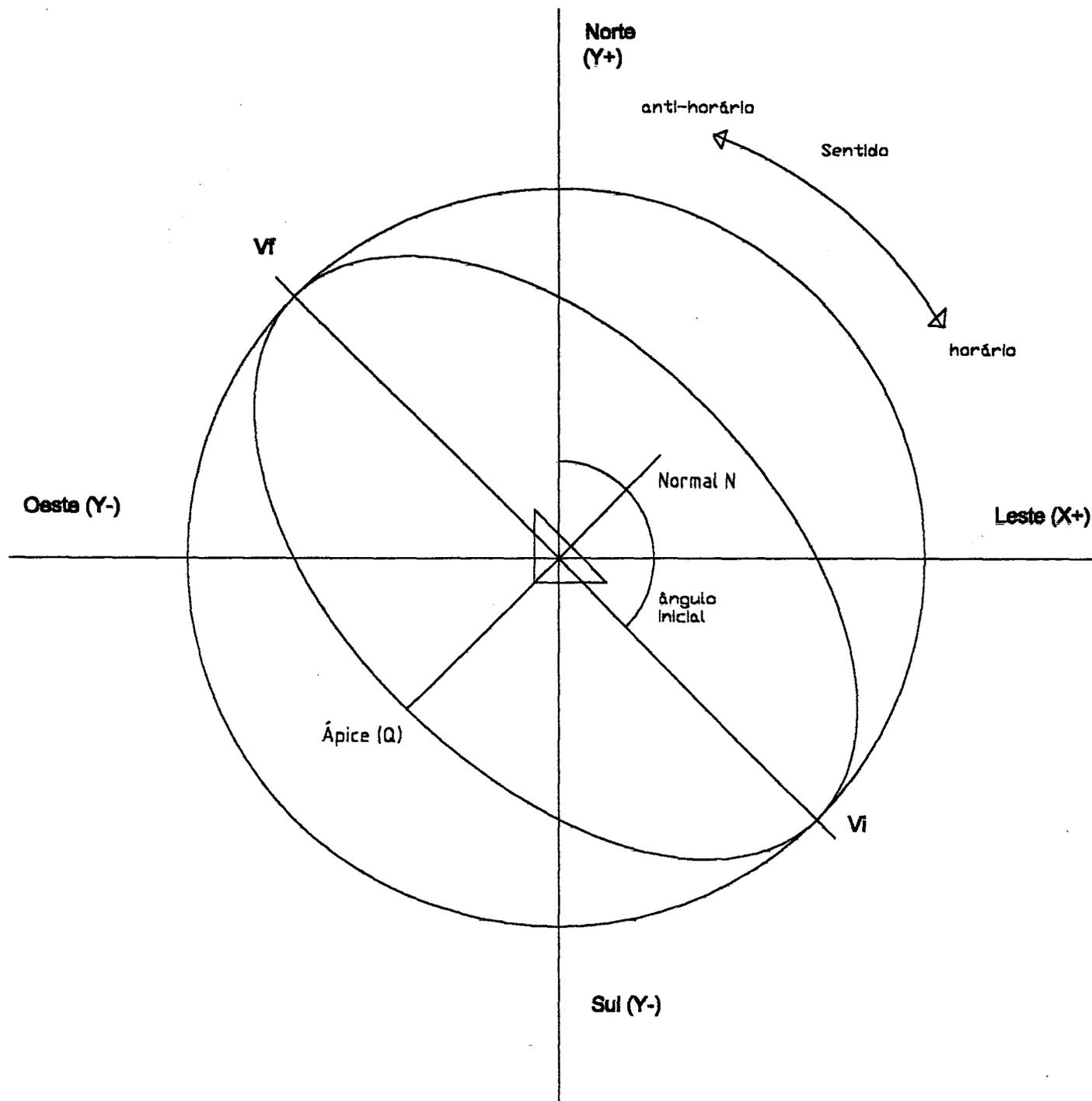


Figura IV.14: Projeção horizontal dos vetores Normal e Ápice, para comparação com os vetores Vi e Vf e definição de sentido de leitura das faixas para definição do buffer de parcelas. No caso, o sentido é anti-horário.

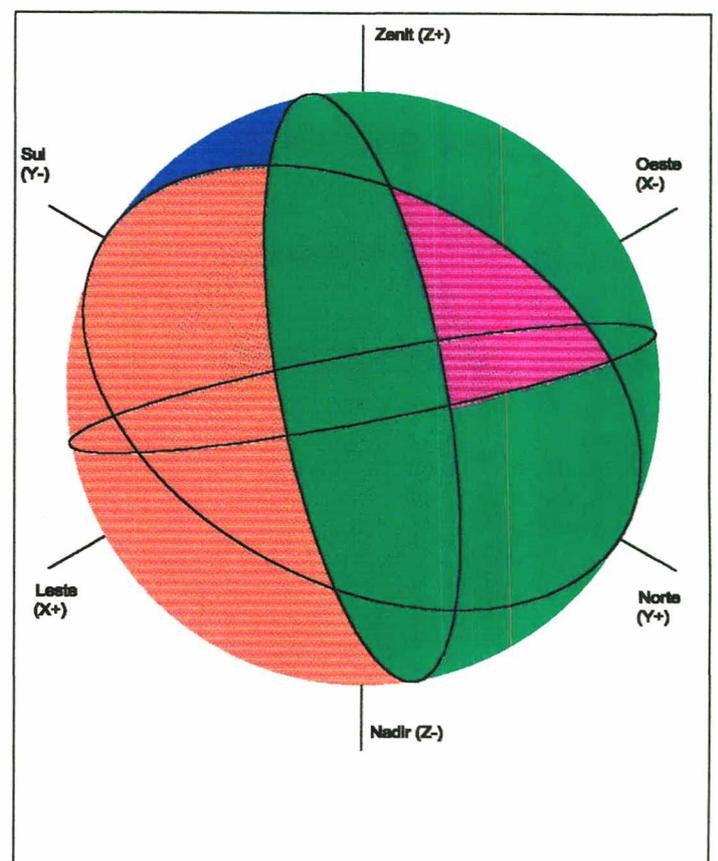
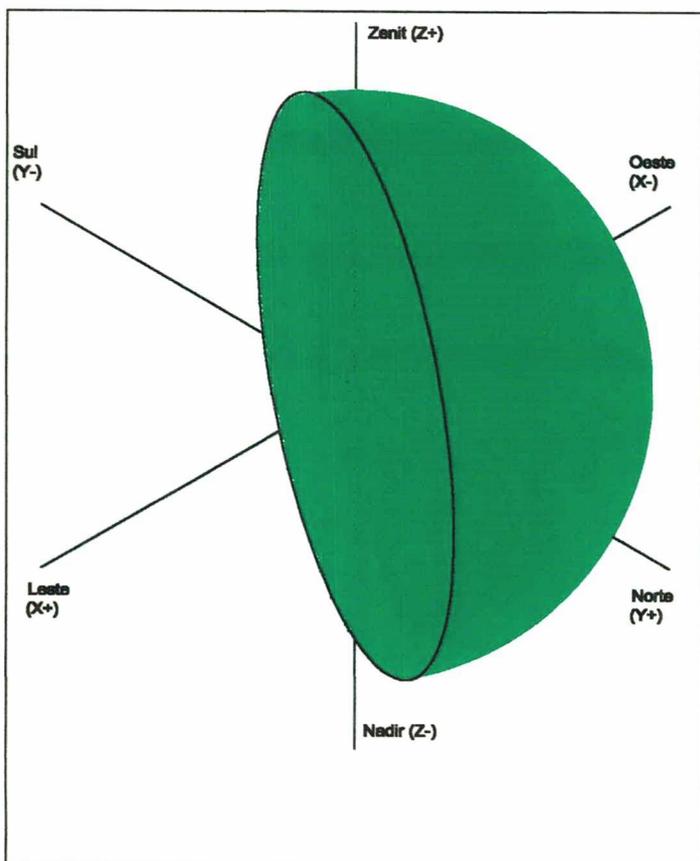
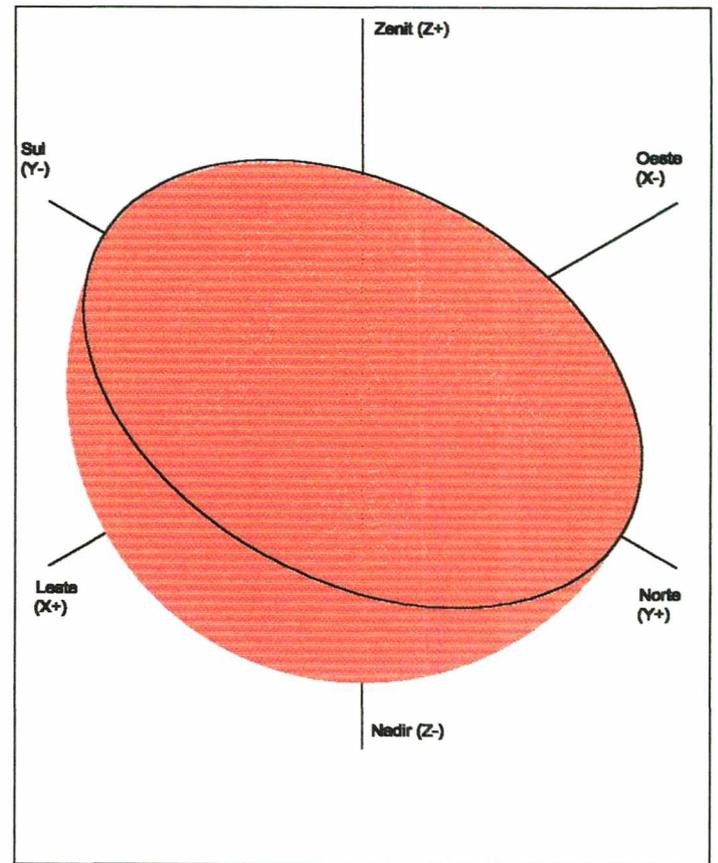
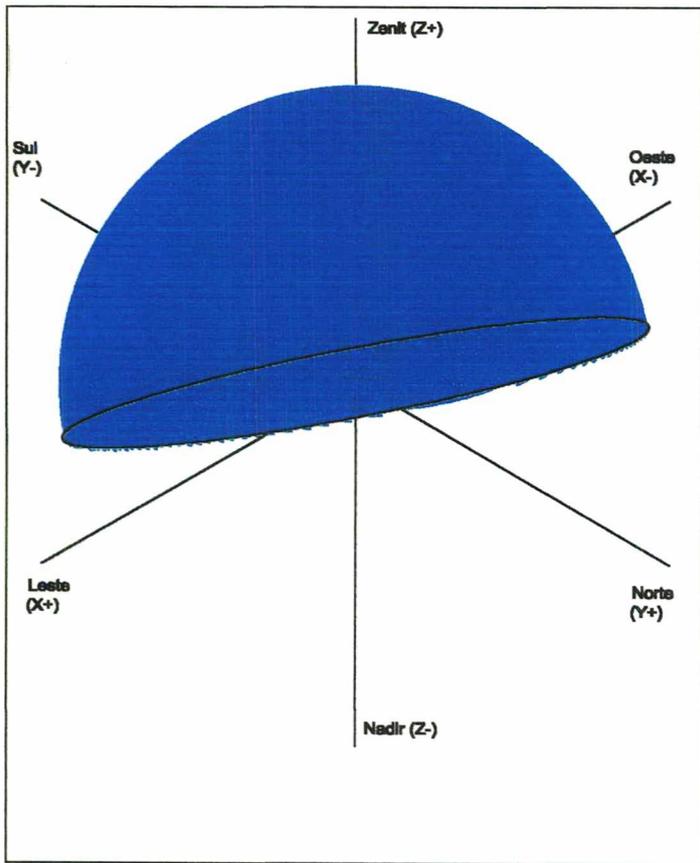


Figura IV.15: Hemisférios correspondentes aos três lados de um triângulo esférico, superpostos para assinalar o triângulo esférico.

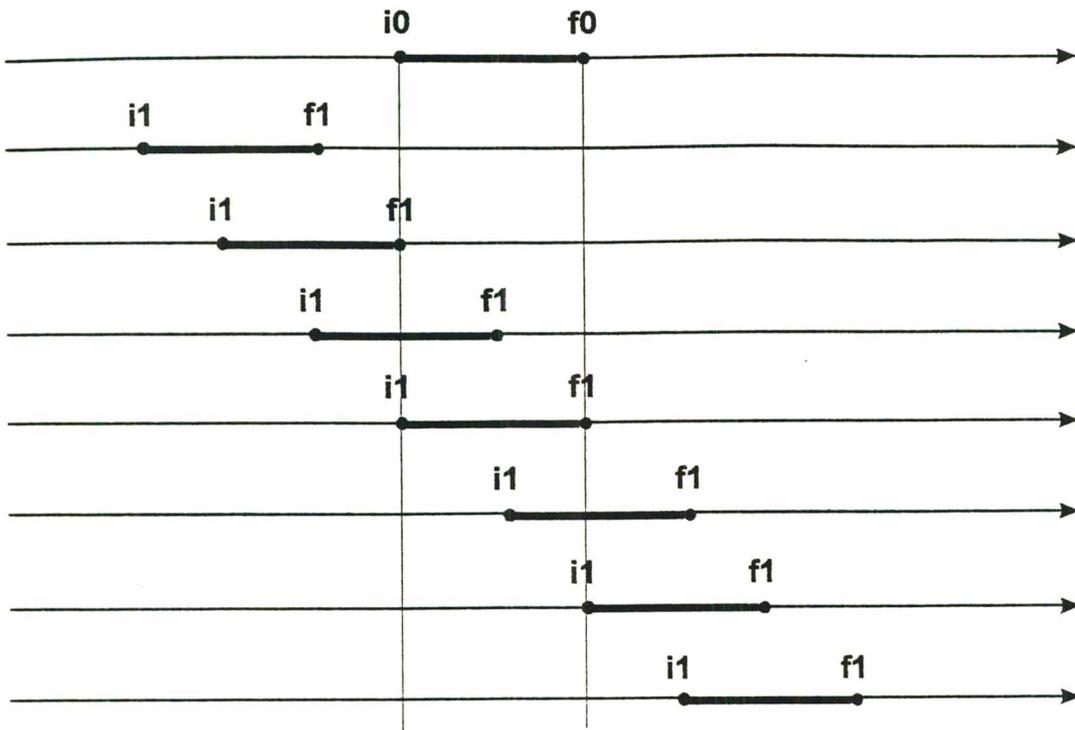


Figura IV.16a: Método de comparação para dois intervalos iguais de números inteiros crescentes.

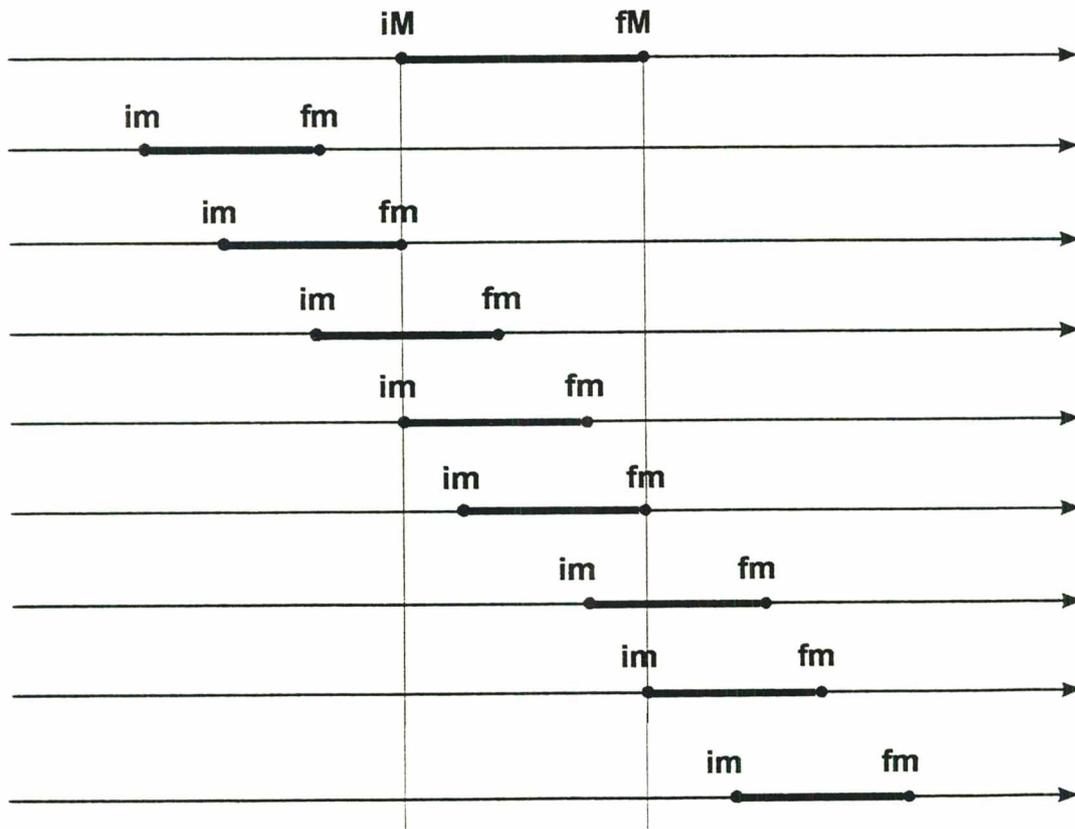


Figura IV.16b: Método de comparação para dois intervalos diferentes de números inteiros crescentes.

O procedimento de comparação, expresso no algoritmo da Figura IV.17, confronta as estruturas de intervalos dos hemisférios de um polígono em combinação de pares, para cada faixa da projeção, armazenando-se os intervalos de interseção em uma estrutura semelhante. Esta estrutura é cumulativamente atualizada, dado que, da comparação inicial entre duas faixas, que podem ter até 2 intervalos, resulta uma estrutura de até quatro intervalos, que serão posteriormente confrontados com até mais dois intervalos. No caso de um polígono de 4 arestas, podemos ter hipoteticamente até 16 intervalos para representar a porção de uma faixa contida na projeção do polígono. No entanto, muitos destes intervalos representam intervalos contínuos maiores. Neste momento do trabalho, este fato não é relevante, mas poderá ser útil para otimizar desenvolvimentos posteriores. A comparação de intervalos, da mesma forma que suas definições, é realizada apenas para as faixas que contém a projeção do polígono. (Figura IV.18)

IV.3.2 - DEFINIÇÃO DOS VETORES DE PARCELAS

O **vetor de parcelas** descreve, para cada direção de um hemisfério do globo, as parcelas que são visíveis de um dado ponto em um plano que define o hemisfério. O vetor de parcelas permite a construção de listas de visibilidade do céu e das superfícies, levando em consideração a superposição de elementos transparentes.

Consiste de uma matriz de elementos associados a cada posição do globo, que contém um vetor assinalando o número de parcelas consideradas em cada direção, e a indicação de cada triângulo (ou plano, conforme veremos adiante) interceptado e a distância de interseção, ordenados da menor à maior distância. O vetor assinala para uma dada direção, uma parcela opaca ou leitosa, ou então uma sucessão de parcelas transparentes, terminada ou não por uma parcela não transparente.

Se o elemento central do globo de vetores é opaco, somente serão assinaladas direções em um hemisfério do globo. Se o elemento central não for opaco, serão associadas parcelas nos dois hemisférios definidos pelo plano do elementos central. Uma representação esquemática pode ser vista na Figura IV.19.

As parcelas são acumuladas no vetor até um número máximo de parcelas transparentes, ou até a interceptação de uma parcela não transparente. Nesta circunstância, quando o número de parcelas acumuladas é maior que o previamente definido, a transparente mais distante é descartada. Isto é apenas uma simplificação para limitar o uso de memória no protótipo de testes. Pode-se construir hipóteses com profundidade variável no vetor, o que não nos interessa agora.

A **lista de configuração** de uma determinada parcela de um plano em análise é constituída por vetores associados a um índice de parcelas, de forma que, na leitura do globo de vetores, somente as direções assinaladas por alguma parcela sejam guardadas para futuro cálculo.

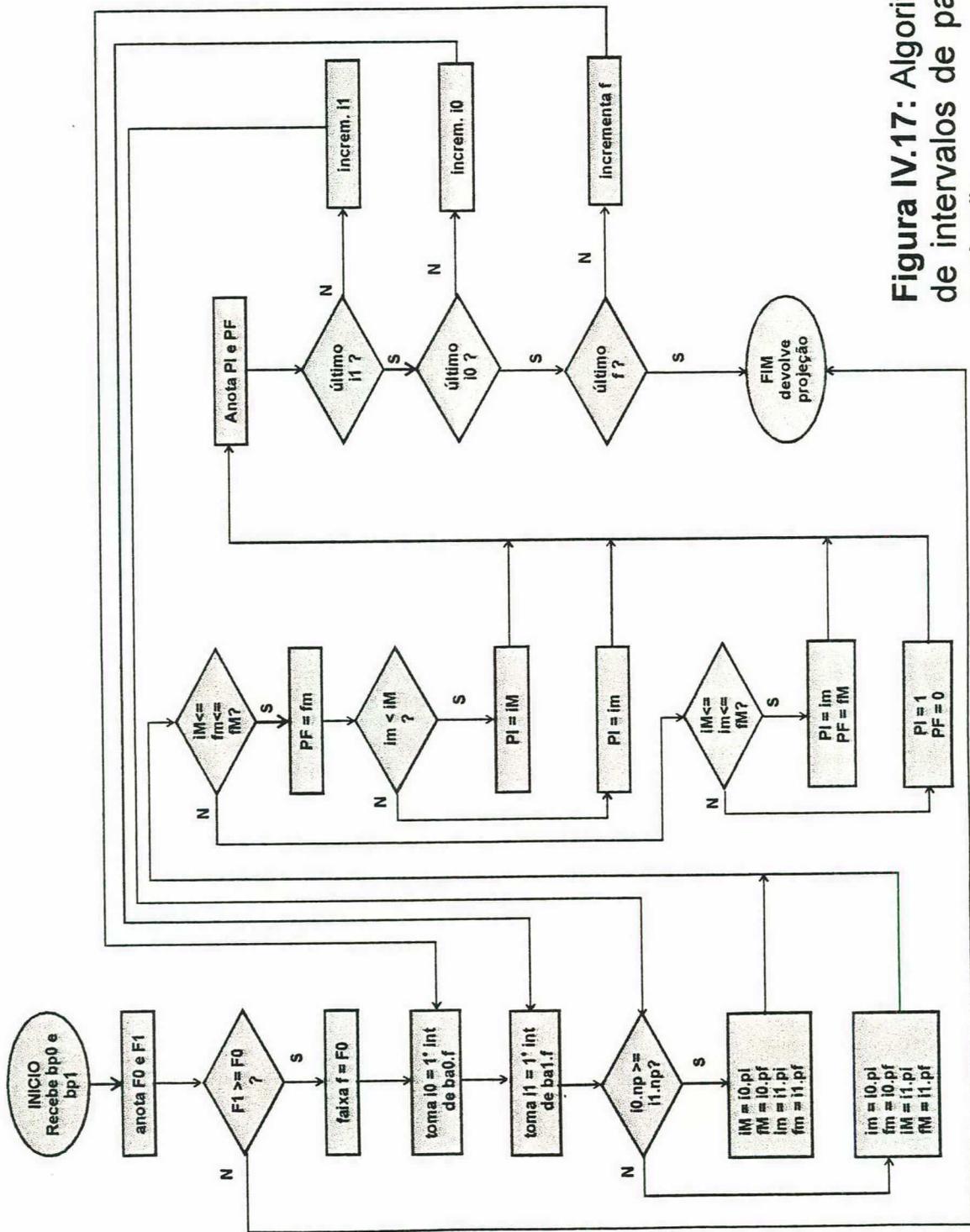


Figura IV.17: Algoritmo para comparação de intervalos de parcelas, fornecendo a projeção

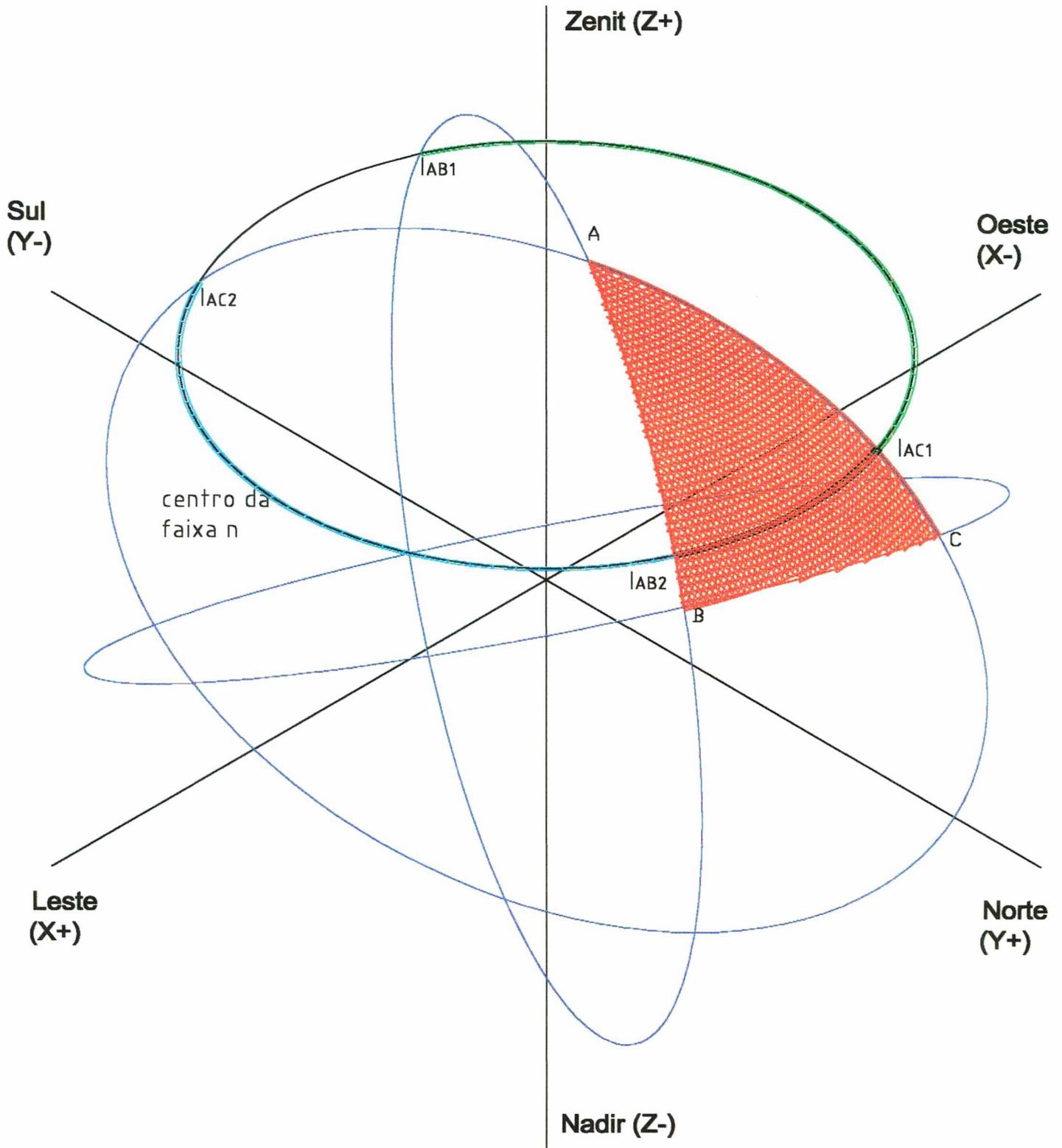


Figura IV.18: Representação do conjunto de segmentos de faixas, formado por intervalos de parcelas do globo contidas no triângulo esférico ABC, obtidos pelo processamento dos triângulos descritos na figura 12. O arquivo gráfico gerado

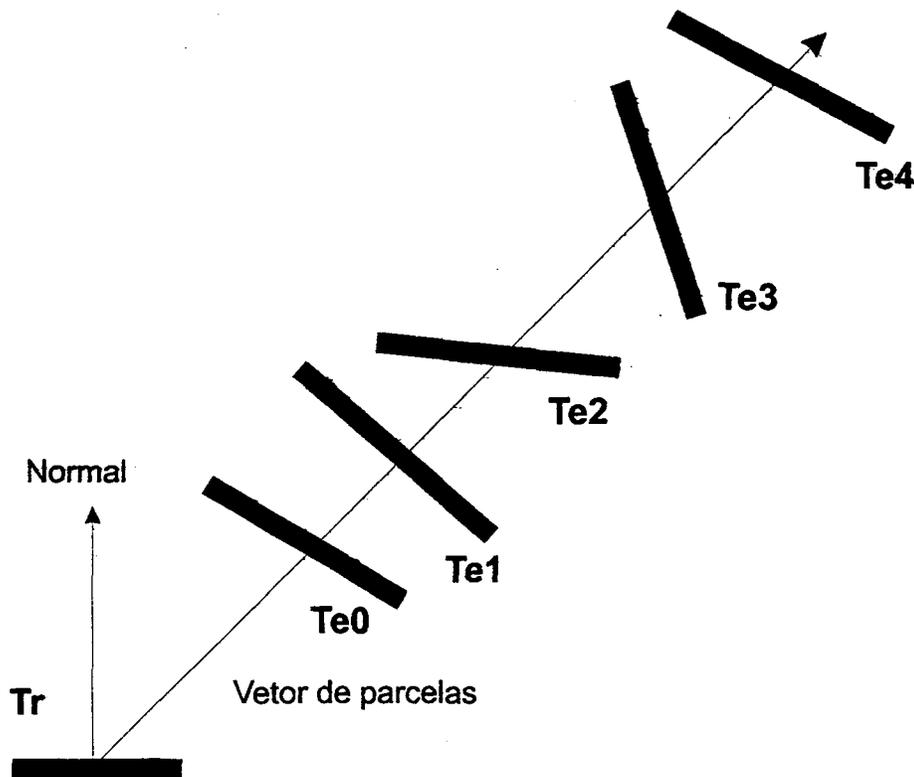


Figura IV.19: Representação bidimensional de um vetor tridimensional de parcelas de um triângulo receptor Tr , contendo os triângulos emissores Te assinalados pelo vetor

Definidas as parcelas que representam uma projeção, sua inserção no globo de vetores é feita segundo o algoritmo da Figura IV.20. O algoritmo, similar para os vetores de cada um dos hemisférios definidos pelo plano objeto de análise (que chamaremos de positivo quando corresponder ao hemisfério apontado pela normal do plano, e negativo o oposto) é aplicado em três circunstâncias: a projeção está totalmente contida no hemisfério positivo, totalmente no negativo, ou parcialmente em cada um. Quando o plano central é opaco, na primeira circunstância todas as parcelas são submetidas ao algoritmo; na segunda, apenas as parcelas cuja direção formam com a normal um ângulo menor que 90 graus, descartando-se as demais; na terceira, a projeção é descartada. Quando o plano central não é opaco, na segunda circunstância as parcelas com ângulo maior que noventa graus são analisadas no hemisfério negativo; e na terceira circunstância toda a projeção é analisada no hemisfério negativo. Desta forma, o teste que verifica o ângulo entre a direção da parcela e a normal do plano central é aplicado somente às projeções onde houver essa dúvida relativa a cada uma de suas parcelas.

O globo de vetores é a estrutura que auxilia na determinação da **lista de configuração dos planos**, da **lista de exposição ao céu** e da **lista de visibilidade dos planos** que serão atribuídas a cada elemento de subdivisão das superfícies dos objetos.

A lista de configuração dos planos contém, para cada direção onde há interseção com planos, o vetor de posições daquela direção com as parcelas interceptadas e a distância de interseção; a lista de exposição ao céu contém os índices das direções visíveis do céu pela parcela, associados à transmitância naquela direção; a lista de visibilidade contém os planos que têm alguma parte de sua superfície visível de uma determinada parcela.

IV.3.3 - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO, PASSO A PASSO

A importância foi definida por Auperle (1993) como importância para o olho do observador. Para nosso modelo a importância configura-se relativa a um contexto espacial de análise, do ambiente de estudo. Para tanto, definimos um foco de importância, um ponto de referência que situa o centro de nosso interesse no projeto analisado. Isto se faz necessário devido à possibilidade de modelagem de múltiplos ambientes, sem caracterização de interior, exterior ou intermediário. O foco permitirá selecionar o contexto de início da distribuição da energia refletida após a incidência inicial da luz natural no projeto. Este enfoque teórico permite a definição de um plano de importância, com vários pontos de interesse. No entanto, em nosso protótipo testamos o conceito apenas com a definição de um foco.

O primeiro passo do algoritmo geral de cálculo (Figura IV.21) consiste no estabelecimento dos níveis de importância de cada parcela em que foram subdivididos os planos do projeto. A definição de um foco de análise permite, no fracionamento do projeto, o estabelecimento de uma primeira relação de importância, a partir da distância, considerando-se os elementos próximos, a meia distância e distantes do foco de análise, segundo a definição de dois raios de distância que definem as categorias de proximidade. Em seguida, através do procedimento de definição da projeção de todas as parcelas em relação ao foco, é construído um globo de vetores que indicará quais as parcelas visíveis do foco. A primeira definição de importância, segundo a distância, é então complementada pela visibilidade do foco, resultando assim em seis categorias de importância: parcelas próximas e visíveis (importância 0); próximas e não visíveis (1); meio-próximas e visíveis (2); meio-próximas e não visíveis (3); distantes e visíveis (4) e distantes e não visíveis (5).

Estes critérios de importância (que podem eventualmente ser complementados por outros) permitirão, uma vez definida a energia luminosa inicial de cada parcela, selecionar aquelas de maior interesse para o início do procedimento de solução da radiosidade através do método do refinamento progressivo, dado que muitas parcelas terão energia luminosa inicial devido ao céu ou ao Sol.

Definida a importância, o passo seguinte consiste em determinar a visibilidade do céu para cada uma das parcelas do projeto. O pressuposto da radiosidade é que as parcelas analisadas são suficientemente pequenas para terem seu comportamento considerado homogêneo, disto decorrendo a fragmentação das superfícies de área e dimensões significativas no projeto. No entanto, para determinar a visibilidade do céu, não é a característica de homogeneidade da superfície que interessa, mas o fato de ela obstruir ou não o céu. Como o globo é o infinito, qualquer superfície que se encontra no hemisfério de visibilidade de uma parcela e está acima do horizonte (pelo menos em parte), provoca obstrução no céu.

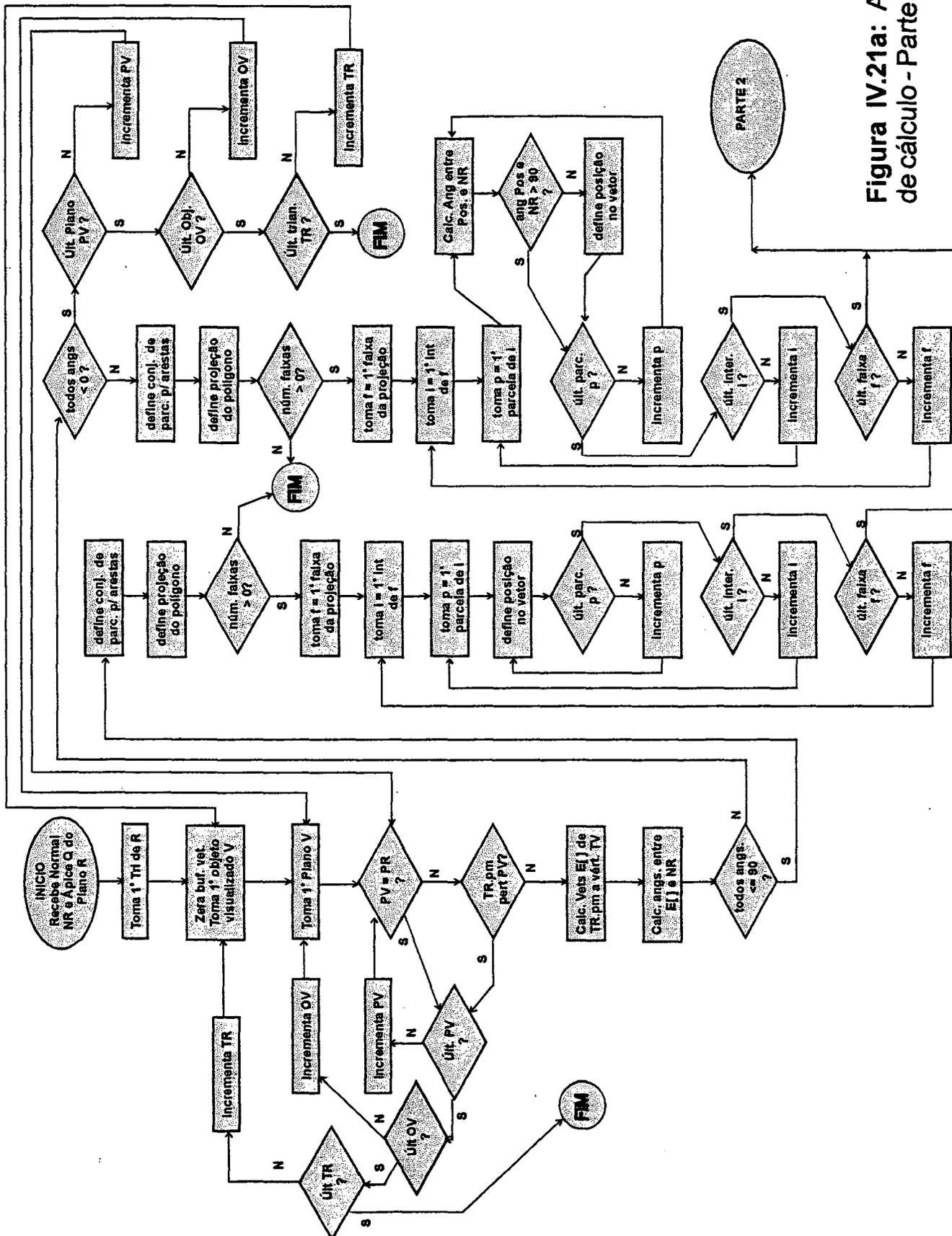


Figura IV.21a: Algoritmo geral de cálculo - Parte 1

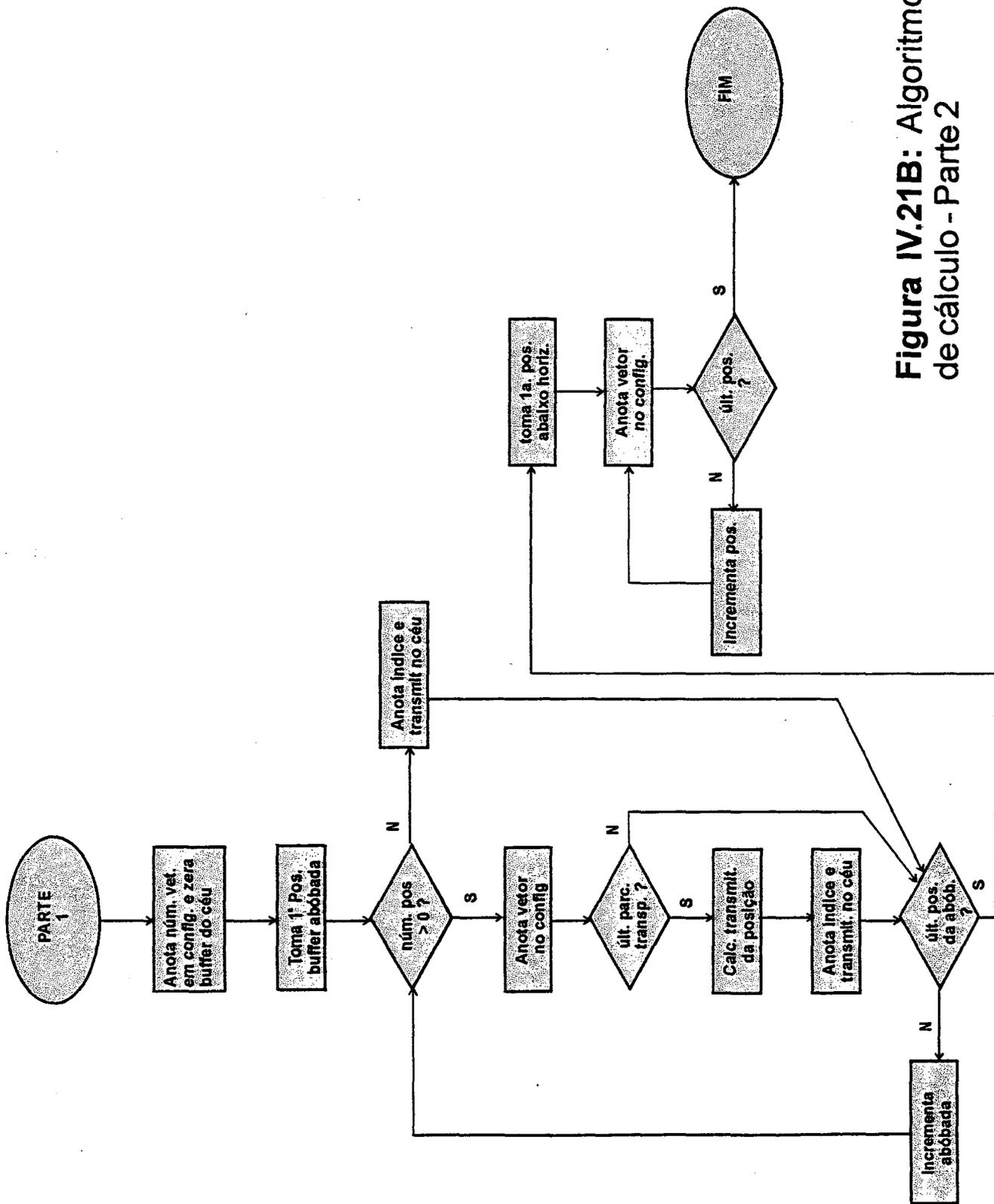


Figura IV.21B: Algoritmo geral de cálculo - Parte 2

Desta forma, se para o centro da análise de visibilidade é necessário uma parcela diminuta (que receberá a luz), para a obstrução pode-se lidar com os planos em suas dimensões originais. Podemos então, ao invés de confrontar $N \times N$ interações (N sendo o número de parcelas), confrontar apenas $N \times M$ interações (sendo M o número de planos geradores das parcelas), o que reduz significativamente o tempo do procedimento, dado que geralmente M é bastante menor que N . Esta abordagem é bastante eficiente quando estes planos podem ser caracterizados pelas parcelas que constituem seus limites, ignorando seu interior em boa parte da análise, através da manipulação dos intervalos de parcelas conforme definidos.

Cada plano é tomado como centro da análise e para ele é definido um conjunto de direções da abóbada correspondente à porção do hemisfério de visibilidade do plano que se encontra acima do horizonte (metade superior do globo astronômico), que será confrontada com a distribuição das luminâncias da abóbada em uma dada circunstância. (Figura IV.22). No caso de planos não opacos são definidos dois conjuntos de direções da abóbada, um para cada face do plano.

Cada parcela do plano de análise é então tomada como centro de referência; cada plano é tomado como projetor (exceto os que contêm a parcela), definindo um conjunto de intervalos para caracterizar o hemisfério de cada aresta do plano em relação à parcela de análise, obtendo-se, em seguida, através da comparação dos intervalos de cada faixa, o conjunto de intervalos que representam a projeção do plano em relação ao centro da parcela de análise.

Cada parcela da projeção é então posicionada segundo o critério de posicionamento total ou parcial, no hemisfério de interesse no globo de vetores da parcela central. Na inserção das parcelas no globo de vetores é construída uma lista auxiliar que anota, cada vez que uma nova direção é assinalada no globo de vetores e constitui uma direção abaixo do horizonte, o índice dessa direção. Esta lista indicará todas as posições da projeção que estão abaixo do horizonte.

Após todos os planos serem projetados para a parcela central e inseridos no globo de vetores da parcela, são determinadas as listas de análise. A primeira delas é a lista de configuração dos planos, contendo estruturas que indicam o índice e o plano ou planos visíveis na direção do índice, extraídos das posições assinaladas no globo de vetores da parcela central. A construção desta lista é feita em dois passos: para a metade superior do globo de vetores, correspondente à abóbada visível acima do horizonte, a extração dos vetores assinalados no globo é feita a partir da matriz de intervalos da abóbada visível do plano central (o procedimento para parcelas não opacas é reflexo, abrangendo as duas faces). Conhecidas as direções da abóbada contidas no hemisfério visível do plano, as direções que não forem assinaladas na lista de configuração dos planos ou que, sendo assinaladas, tiverem o vetor terminado por parcela transparente, são assinaladas na lista de exposição ao céu, computando-se a transmitância da direção que contiver obstrução de superfícies transparentes. Com este procedimento, apenas as parcelas de interesse da abóbada são anotadas. Para a metade inferior do globo de vetores, a extração é feita a partir da lista auxiliar construída na confecção do globo de vetores da parcela, como foi citado. Como esta lista contém apenas as direções inferiores que tiveram alguma inscrição no globo, não são verificadas direções não assinaladas.

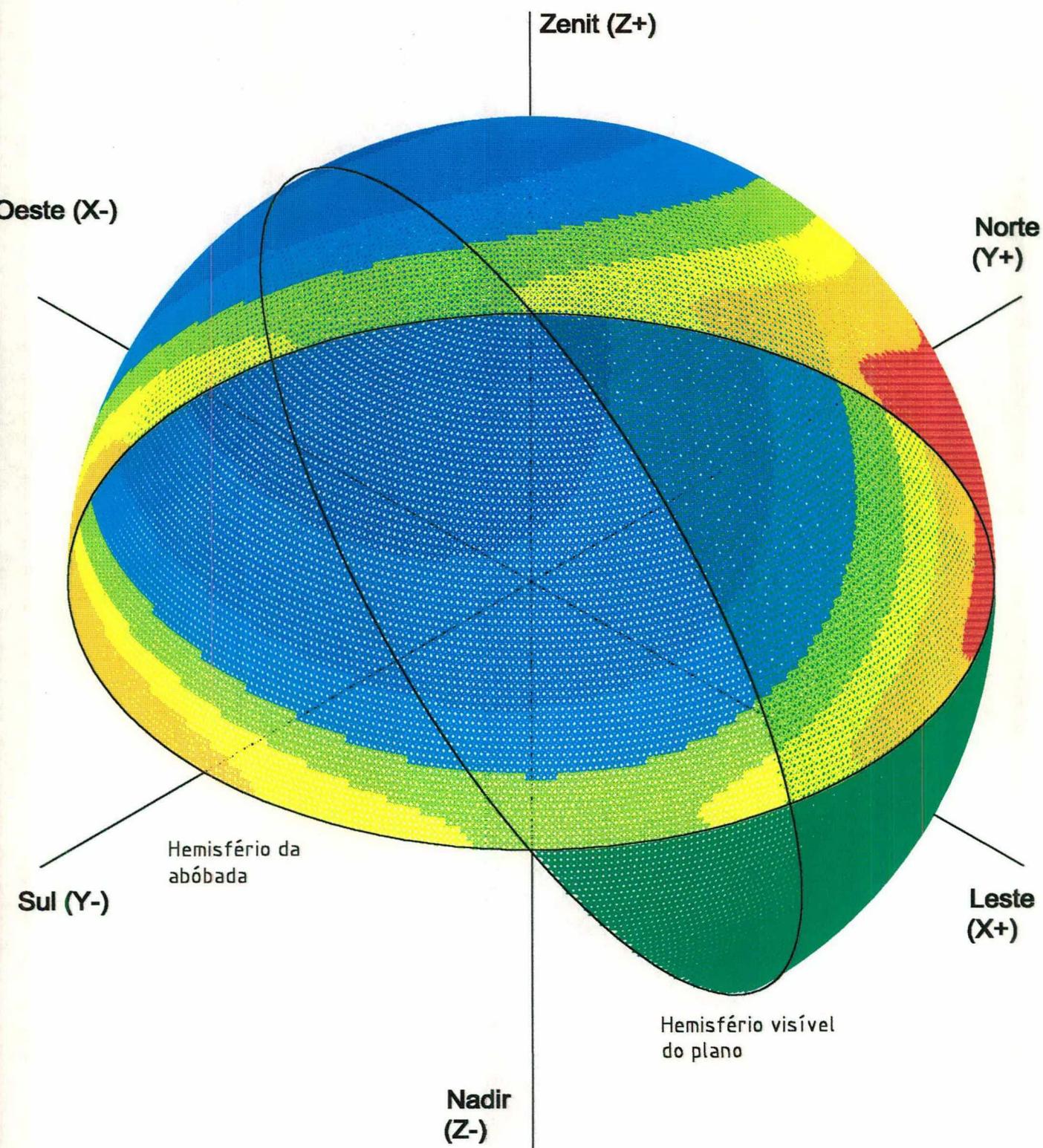


Figura IV.22: Superposição do hemisfério de parcelas do plano receptor com iluminância de uma abóbada, cuja intersecção define os valores da abóbada válidos para o plano receptor.

Intermediado com o procedimento de construção da lista de configuração dos planos é definida a lista de visibilidade dos planos para a parcela central. Cada vez que um índice de plano assinalado no globo de vetores é diferente de um índice de plano de referência (que inicialmente é o índice do primeiro plano anotado no globo), o diferente assume a condição de referência e seu índice é verificado na lista de visibilidade, sendo acrescido a ela se dela já não constar. Esta terceira lista será de fundamental importância na determinação dos fatores de forma entre cada parcela e todas as demais, na solução da radiosidade progressiva, dado que o cálculo será feita apenas a cada interação (*"on the fly"*, como é referida na literatura) e esta lista permitirá projetar apenas as parcelas contidas nos planos que efetivamente têm porções visíveis da parcela central da análise.

Após o preenchimento destas três listas é possível já determinar a quantidade inicial de luz natural incidente em cada parcela de cada plano do projeto.

Calculada uma determinada condição da abóbada, a luz incidente de forma difusa em uma determinada superfície é dada pela somatória da contribuição de cada parcela do globo exposta ao céu. A contribuição de uma parcela é dada pela fórmula IV.1:

$$E_i = sp * l_{mi} * t_i * (N_{p.c1} * l.c1 + N_{p.c2} * l.c2 + N_{p.c3} * l.c3)$$

(fórmula IV.1)

Onde:

- E_i** = Energia recebida da direção *i*
- sp** = ângulo esférico na direção *i*
- l_{mi}** = luminância da abóbada na direção *i*
- t_i** = transmitância na direção *i*
- N_p** = Normal do plano receptor, expresso em cossenos diretores *c1*, *c2* e *c3*
- l** = Vetor unitário da direção *i*, em cossenos diretores *c1*, *c2* e *c3*.

No processo de leitura da lista de exposição ao céu é verificada se a posição do Sol (assinalada por um índice que indica sua posição no globo) está visível da parcela central, sendo então computada a contribuição direta da luz do Sol através da fórmula IV.2:

$$E_s = E_{vsn} * (N_{p.c1} * S.c1 + N_{p.c2} * S.c2 + N_{p.c3} * S.c3)$$

(fórmula IV.2)

Onde:

- E_s** = Energia recebida diretamente do Sol
- E_{vsn}** = Iluminância do Sol em um plano perpendicular à direção solar
- N_p** = Normal do Plano receptor, em cossenos diretores
- S** = Vetor unitário da direção solar, em cossenos diretores.

Na verificação das condições de iluminação de cada parcela, estas são distribuídas em três matrizes principais (através de índices): lista de parcelas expostas ao Sol, lista de parcelas expostas apenas ao céu e lista de parcelas não expostas ao céu.

Cada uma destas listas contém 6 sub-listas, correspondentes aos seis níveis de importância possíveis estabelecidos neste protótipo. As parcelas são ordenadas em cada uma das listas principais, na sub-lista correspondente à sua importância, ocupando nesta lista uma posição segundo a quantidade de luz que recebe, ou que emite, conforme o momento de análise.

A confecção destas listas permite selecionar, dentre 18 possibilidades de cálculo da radiosidade, as parcelas de maior impacto inicial provável, correspondente à lista de parcelas expostas ao Sol, próximas ao foco e visíveis deste. Mas permitirá também, mudar a etapa de cálculo para uma parcela de outra lista, caso não se esteja obtendo resultados satisfatórios com as interações a partir das parcelas principais. Há que se considerar que uma parcela mais distante, de menor importância relativa, pode ter maior contribuição luminosa que as mais importantes. A seleção pode-se dar tanto entre os diferentes níveis de importância de uma lista como também entre as diferentes listas, retornando-se a listas e sub-listas anteriores se necessário. Este procedimento é bastante útil, dado que para projetos com alto grau de fracionamento, a contribuição luminosa de cada parcela, mesmo com alto grau de insolação, será provavelmente pequena, e a exploração exaustiva de uma lista poderá não ser o melhor caminho.

As listas são muito úteis também na construção da hierarquia do céu, podendo-se optar por construir a hierarquia apenas para parcelas de maior relevância no contexto da análise, seja por sua importância, seja por sua exposição.

A construção da hierarquia na lista de visibilidade de cada parcela, tanto da abóbada quanto das sub-parcelas fracionadas dos demais planos, é feita a partir de um processo de agrupamento ascendente. No procedimento clássico de *quadthree* o processo é de sub-divisão descendente, toda vez que uma singularidade é detectada, ou contrastes de energia significativos são encontrados. A sub-divisão segue um teste que verifica a normalidade da situação (visibilidade, contraste, mudanças de planos, etc), estabelecendo a sub-divisão e novo ciclo de testes. Aqui, ao contrário, temos todos os componentes da visibilidade (de uma perspectiva de elementos finitos, evidentemente) já definidas, bastando agrupá-las segundo os níveis ascendentes da hierarquia.

A cada globo correspondem níveis hierárquicos superiores, de menor resolução, reunindo 4 parcelas contíguas indicadas numa tabela de índices. Na Figura IV.23 temos um exemplo esquemático da construção de uma hierarquia com três graus de refinamento: o nível mais refinado é constituído por 52 direções; no entanto, 32 delas podem ser agrupadas dois níveis acima da hierarquia em duas parcelas, enquanto outras 8 podem ser agrupadas um nível acima em 2 parcelas; as demais continuam no nível mais refinado. Desta forma, a representação hierarquizada contém apenas 16 parcelas.

Estabelecida a hierarquia da abóbada para as parcelas, os cálculos seguintes que envolvam apenas as mudanças de condição da abóbada ou rotações do projeto são feitas de forma muito mais eficiente. Há que se considerar que, embora dificulte do ponto de vista da eficiência da abordagem do refinamento progressivo, o fato de a luz inicial incidente no projeto estar distribuída por grande quantidade de parcelas, permite já uma visualização inicial com toda a distribuição dessa energia.

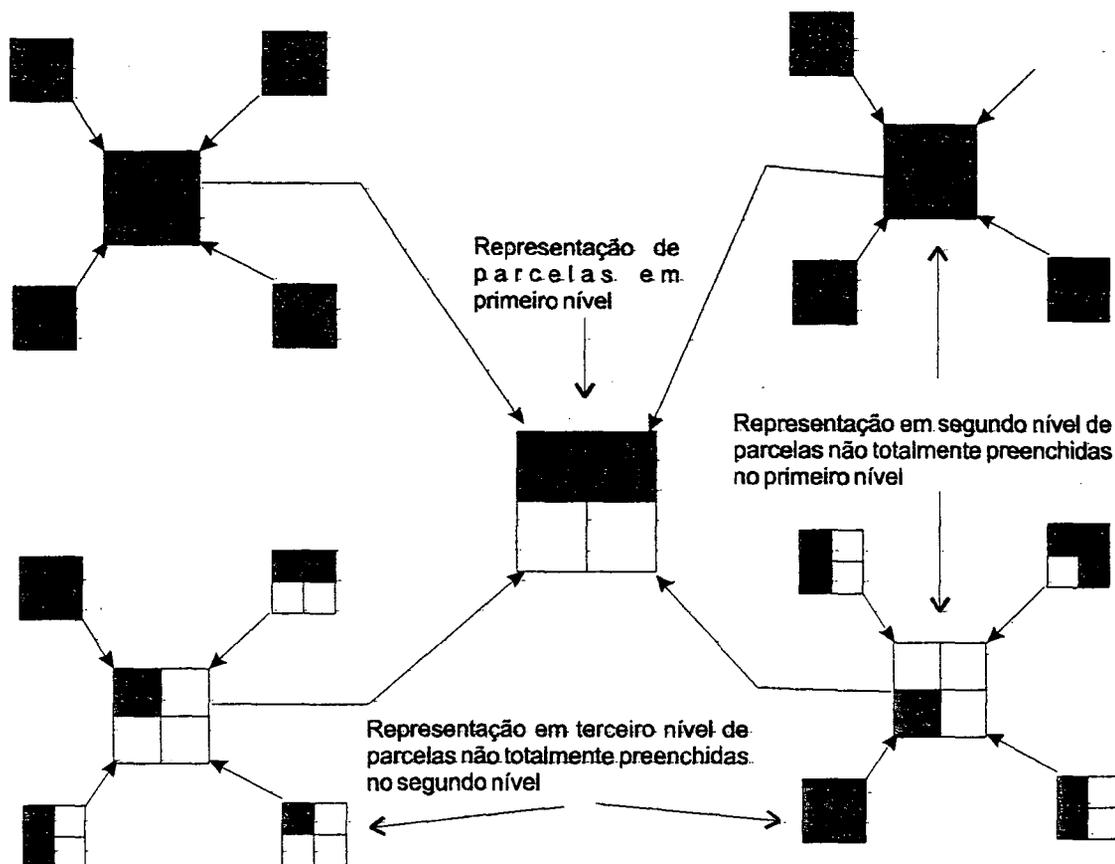


Figura IV.23: Exemplo de hierarquia em três níveis que pode ser construída tanto de modo ascendente, onde as parcelas vão sendo agrupadas do nível de maior resolução para o de menor, como no exemplo, quanto de modo descendente, do nível de menor ao de maior resolução.

Um procedimento *a priori* de hierarquia poderia ser feito antes mesmo da adoção de uma dada condição da abóbada, apenas considerando a exposição da parcela ao céu, o que permitiria a definição da hierarquia apenas uma vez no projeto. Por outro lado, a verificação de novas posições do Sol teriam que ser pesquisadas na árvore de hierarquia pelo índice a ele atribuído. Se a sua posição em um nível da hierarquia não está plenamente assinalada, verifica-se a sub-divisão da direção para este nível, até o maior grau de refinamento, se necessário.

Até este passo da análise, só foi verificada a visibilidade **parcela x plano**. Não foi verificada a visibilidade, nem considerado o fator de forma **parcela x parcela**.

Consideradas as listas de prioridades, pode-se iniciar a distribuição de energia de cada parcela. Tomada uma parcela como emissora, é então aplicado o procedimento de determinação da visibilidade em relação às demais parcelas para a definição de um globo de vetores detalhado, num procedimento igual ao aplicado para a determinação do globo de vetores de visualização dos planos. No entanto, aqui, o procedimento é mais simplificado, dado que apenas serão projetados e inseridos no globo de vetores as parcelas contidas nos planos especificados na lista de planos visíveis que foi construída para a parcela na primeira etapa.

Este globo de vetores conterá, no lugar da indicação do plano, a parcela dele que é visível no vetor, além do índice da direção e da distância de interseção. É

construída então uma hierarquia de cada parcela visualizada no globo de vetores, relativa à parcela emissora, distribuindo-se então a energia às parcelas visualizadas segundo a hierarquia. Pode-se também distribuir a energia num grau maior de refinamento, optando-se por construir a hierarquia caso a contribuição da parcela seja significativa, ou abandonando-a, inclusive, caso não demonstre grande variabilidade no contexto da análise.

A luz recebida em uma dada parcela k da luz emitida por uma parcela e é dada pela fórmula IV.3:

$$E_{ki} = L_e * s_{pi} / (2 * \pi) * (\cos(\theta) / r^2) \quad (\text{fórmula IV.3})$$

Onde:

E_{ki}	= Energia recebida por k de e na direção i
L_e	= Luminância de e
s_{pi}	= ângulo esférico da direção i
π	= constante 3.1415.....
θ	= ângulo entre a normal de k e a direção i
r	= distância entre os centros de k e e .

A distribuição da luz, a cada interação, é feita apenas pela quantidade de variação em relação à situação anterior. Quando a variação atinge uma taxa antecipadamente estabelecida, a parcela é abandonada.

IV.3.4 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

Nesta proposição inicial os materiais foram divididos em três categorias: opacos, transparentes e translúcidos difusos (leitosos).

Inicialmente estamos considerando o material opaco como perfeito difusor (superfície Lambertiana) ou como especular. As superfícies leitosas são consideradas como duplamente difusas: da luz que incide em uma das faces, parte é refletida de forma difusa, e parte é transmitida e distribuída pela outra face também de forma difusa. As superfícies transparentes são consideradas como transmissoras / refletoras especulares em grau variado, segundo o ângulo de incidência da luz.

Quando uma parcela tomada como centro da análise é opaca difusa, a luz que ela obteve no último ciclo de interação é distribuída com igual fluxo segundo os ângulos sólidos de cada direção do hemisfério visível da parcela, apenas para as direções onde estejam assinaladas outras parcelas.

Quando a parcela que receber é opaca difusa ou então leitosa, a energia recebida da emissora é computada (devidamente atenuada pela refletividade) para posterior distribuição, quando a receptora tornar-se emissora. No entanto, quando esta energia atinge uma parcela transparente ou opaca especular, o comportamento é diversificado, pois o modelo permite o tratamento desta circunstância no ato de sua concretização, durante o refinamento, e não num segundo passo posterior. Consideraremos alguns casos, supondo que a luz emitida em uma direção do maior grau de refinamento do globo pode ser considerada aproximadamente uma raio.

1º. Caso: o raio intercepta uma parcela opaca difusa. A energia recebida é computada devidamente atenuada para distribuição posterior, quando for emissora.

2º. Caso: o raio intercepta uma parcela leitosa. A energia recebida é computada parte refletida na face incidente e parte transmitida na face contrária. O tratamento deste caso é o mesmo dado ao opaco difuso, somente considerando-se duas faces ao invés de uma. Não estão considerados aqui os aspectos da difusão direcional, dependente do ângulo de incidência, como também não o foram no caso opaco.

3º. Caso: o raio intercepta uma parcela opaca especular. O raio incidente é refletido e verifica-se, a partir da superfície refletora a superfície que o raio atingirá segundo a nova direção, em qual destes casos se enquadrará.

4º. Caso: o raio intercepta um vetor com uma ou mais parcelas transparentes superpostas (Figura IV.24). Como o referencial é unificado e vetorial, o modelo permite investigar a reflexão / transmissão do raio rapidamente, pois o cálculo do raio refletido segundo a direção incidente fornecerá os cossenos diretores da direção do globo que seguirá após a reflexão. Determinando-se o índice desta direção, é possível determinar então qual a parcela visualizada daquela direção a partir da parcela refletora. Numa sucessão de parcelas transparentes em um vetor, calcula-se a parte transmitida atenuada segundo o ângulo de incidência da direção no plano receptor, até a última posição do vetor. No caso de a última parcela ser transparente, o raio transmitido após ela é perdido; no caso de ser opaca difusa, leitosa ou opaca especular, o procedimento com o raio atenuado que a atinge é feito como descrito nos casos anteriores.

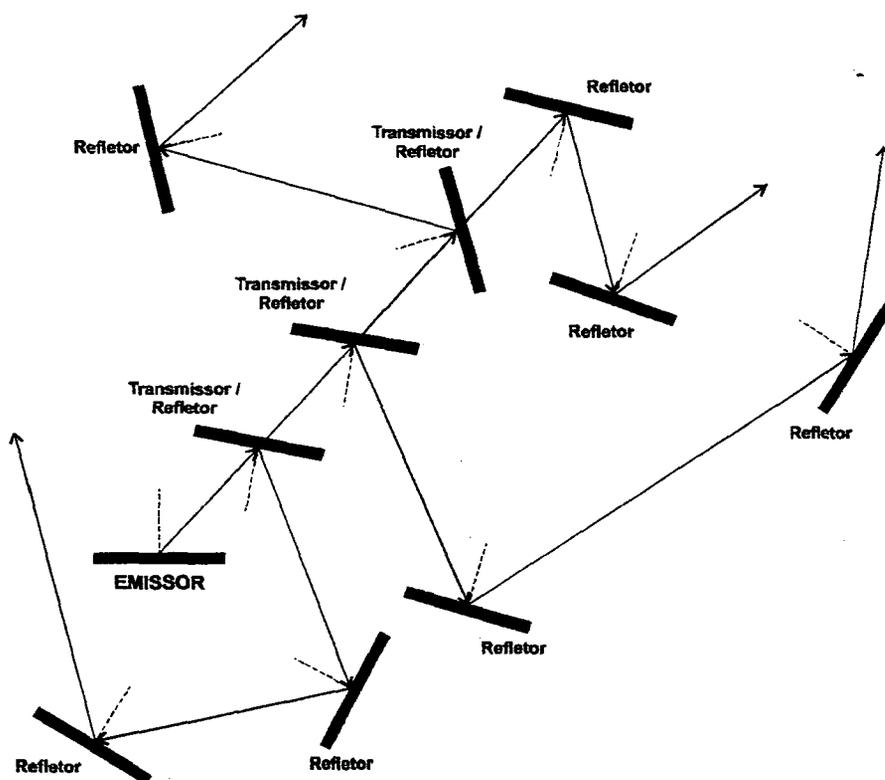


Figura IV.24: Representação bidimensional da multi-reflexão / transmissão através das superfícies interceptadas em um vetor de parcelas, atingindo outras parcelas apontadas pelas interceptadas no vetor.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E VERIFICAÇÕES

O protótipo do programa desenvolvido para verificação do modelo teórico foi elaborado de forma a permitir uma série de verificações numéricas e gráficas, tanto do ponto de vista da construção dos dados de análise (globo, abóbada, projeto) quanto de seu processamento no procedimento de análise. Utilizamos a linguagem C++ com funções da biblioteca básica do Windows95 para controle de entrada e saída de dados, operando em plataforma de 32 bits. Num primeiro momento foram verificados os procedimentos básicos do modelo, atuando em elementos de superfície capazes de representar as principais situações encontráveis nos projetos complexos. Num segundo momento, foram testados projetos mais complexos no contexto de procedimento geral do sistema para determinação da incidência de luz natural nos elementos destes projetos.

Para a primeira etapa de testes foram construídos 14 projetos simples descrevendo situações **plano X plano** (Figuras V.1 a V.10), que foram processados utilizando-se quatro globos, divididos em 90 faixas num hemisfério; em 130 faixas; em 200 faixas; em 300 faixas. Foram testados os fundamentos de cálculo (valores absolutos) e os fundamentos geométricos (projeções).

Oito dos projetos correspondem a diferentes situações de orientação e confrontação entre dois planos constituídos por dois triângulos cada, destinados a verificar a adequação espacial dos conjuntos de parcelas relativos a cada triângulo, obtidos no processamento: são os projetos descritos como **Conf0a** até **Conf0d** e **Conf3** até **Conf6**. A nomenclatura em si não é relevante e resultou do processo de seleção entre um conjunto maior de projetos. Seis dos projetos correspondem a exemplos que, além de permitir uma verificação espacial, permitem uma verificação numérica através da comparação com outros métodos de cálculo: são os projetos nomeados como **ff1** até **ff6**.

V.1 - VERIFICAÇÃO NUMÉRICA

Para verificação dos resultados numéricos foram adotados dois procedimentos:

O primeiro procedimento consiste na confrontação com o método de triângulos de Tregenza (1993), aplicados a situações de resultados conhecidos: foram escolhidas duas situações condizentes com as propostas por Siegel e Howell (1978)(apud Tregenza (1993)), cuja fórmula foi utilizada como parâmetro de comparação. A primeira situação é representada pelos projetos **ff1** a **ff3**, a segunda pelos projetos **ff4** a **ff6**. Representam o modelo de comparação para distâncias próximas, médias e distantes. Equivalem a proporções de 2:1, 1:5 e 1:10 entre o maior lado do retângulo e a distância deste com o ponto de análise.

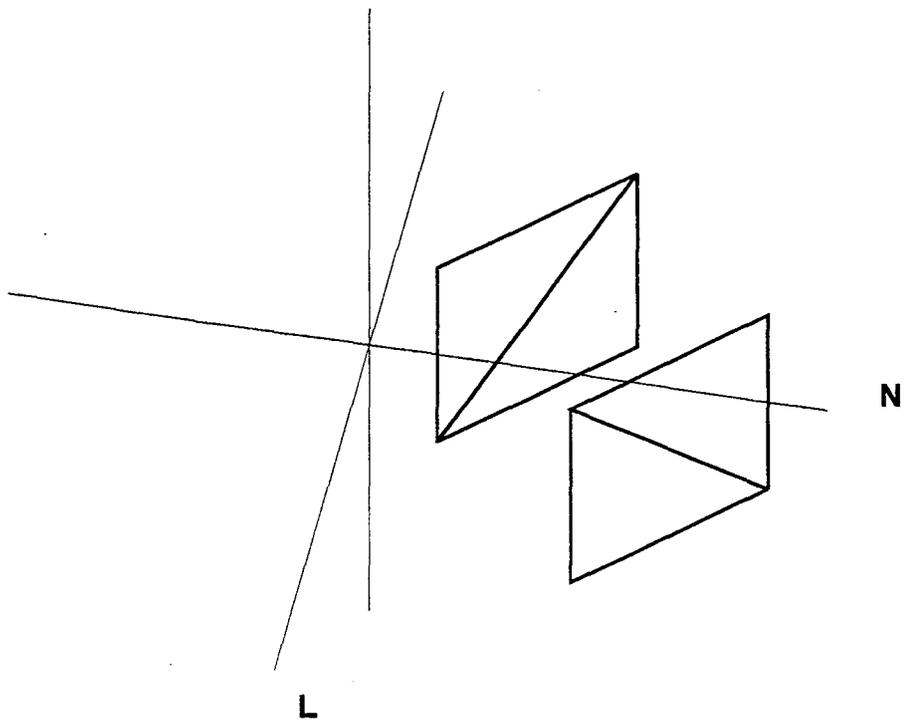


Figura V.1: Projeto para Verificação Gráfica Conf0a.

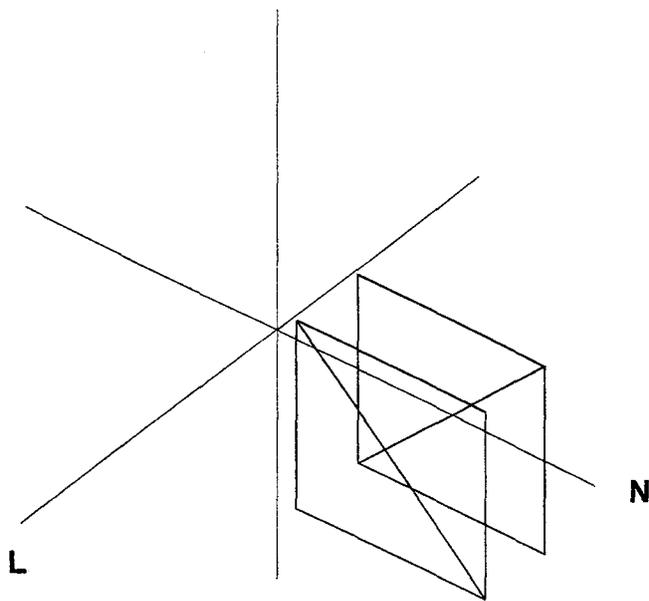


Figura V.2: Projeto para Verificação Gráfica Conf0b.

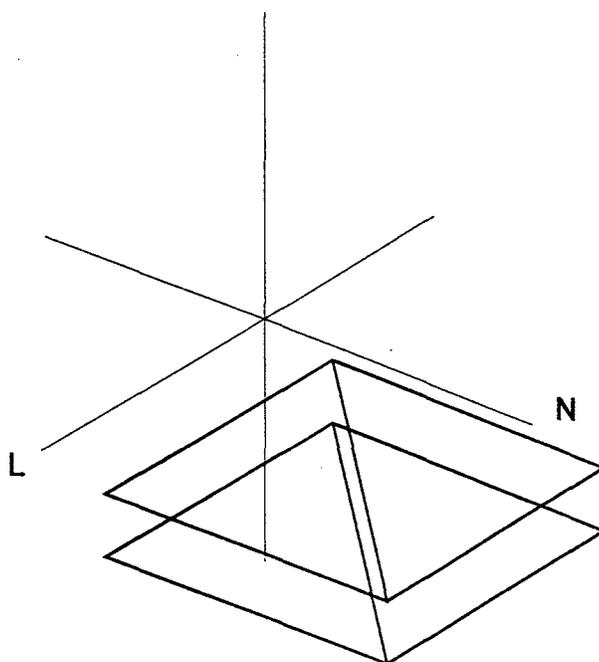


Figura V.3: Projeto para Verificação Gráfica Conf0c.

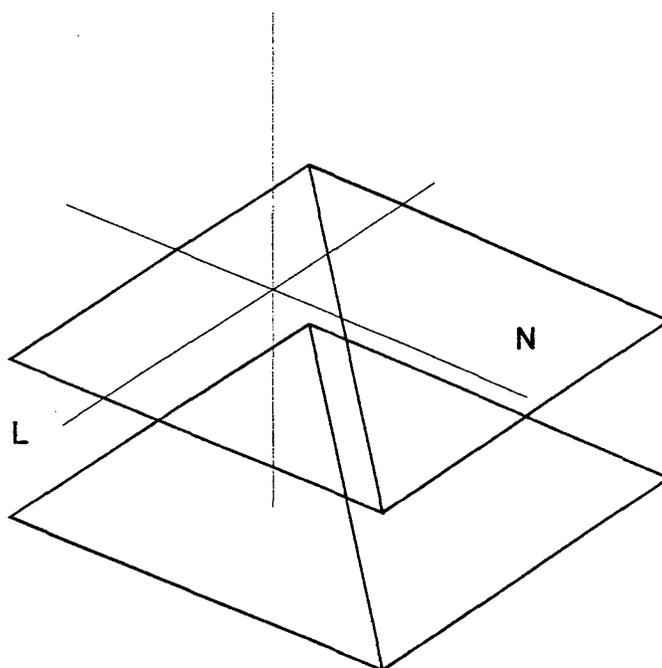


Figura V.4: Projeto para Verificação Gráfica Conf0d.

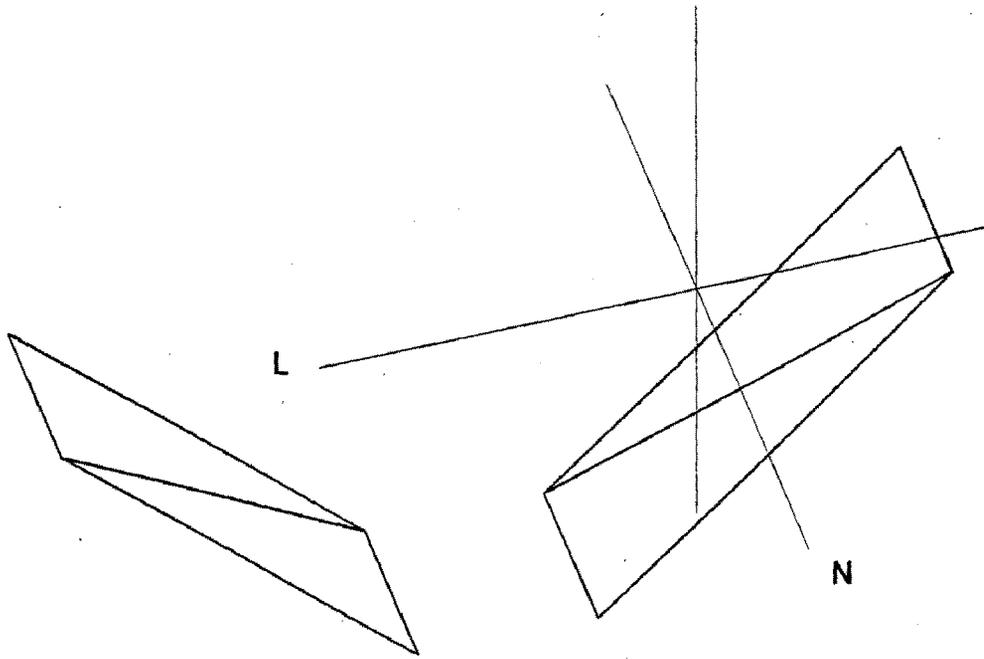


Figura V.5: Projeto para Verificação Gráfica Conf3.

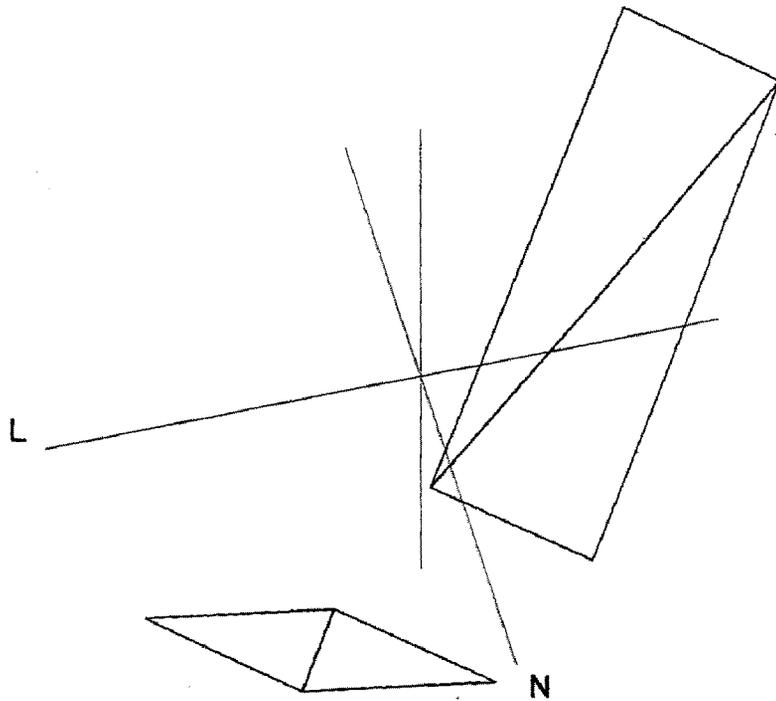


Figura V.6: Projeto para Verificação Gráfica Conf4.

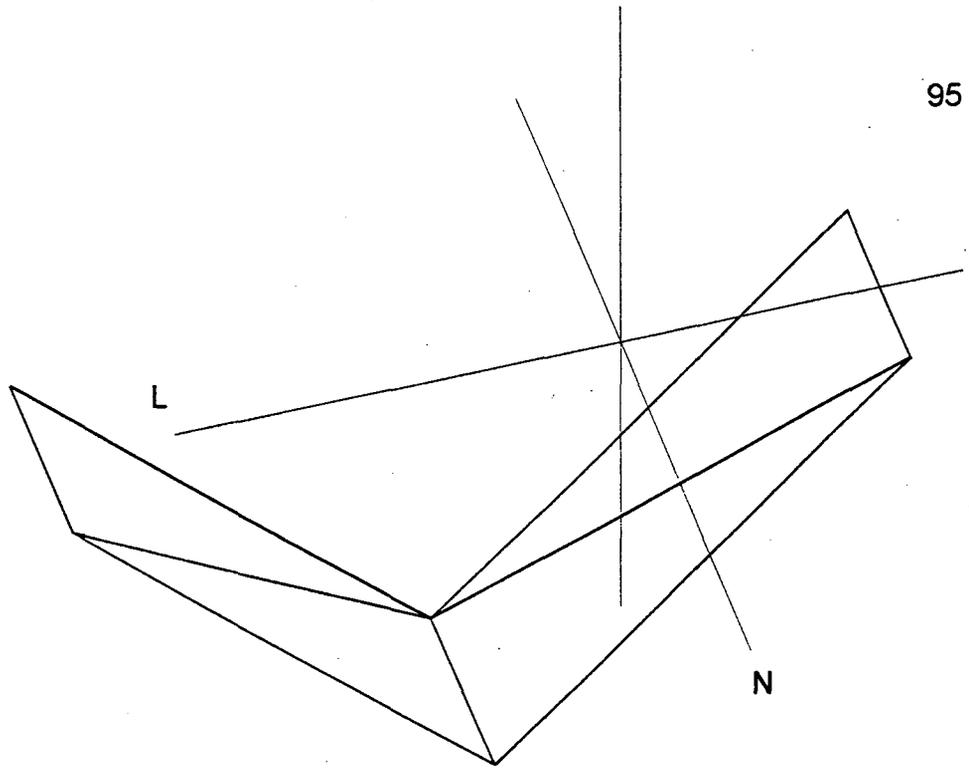


Figura V.7: Projeto para Verificação Gráfica Conf5.

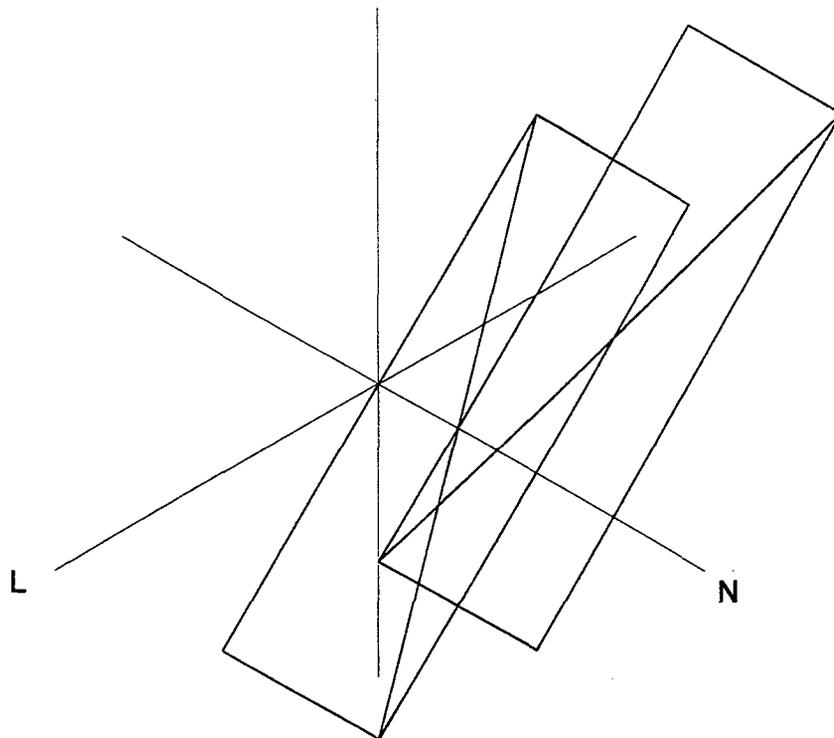


Figura V.8: Projeto para Verificação Gráfica Conf6.

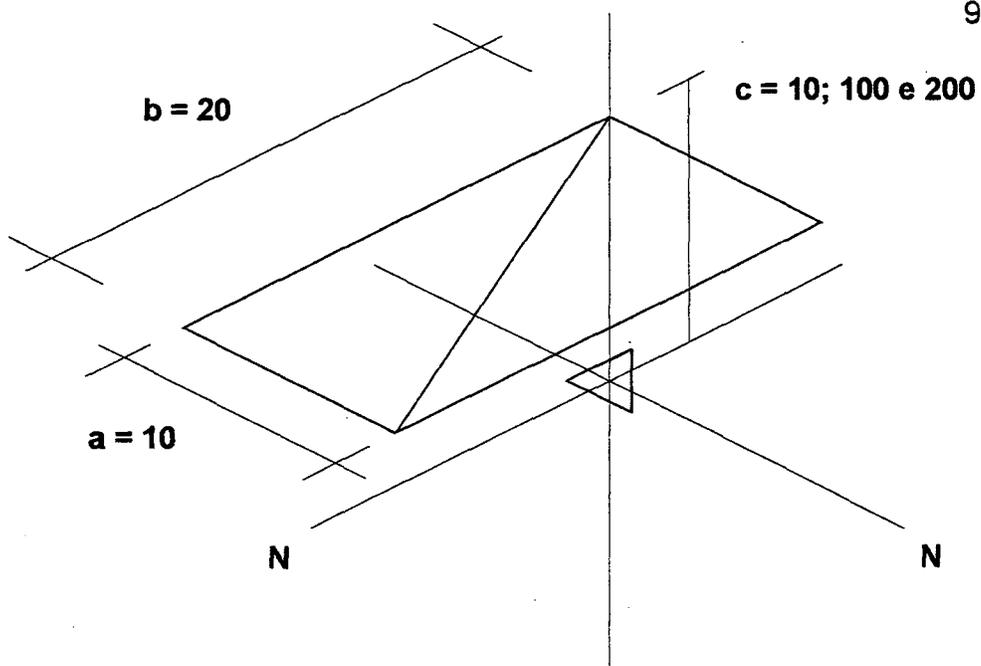


Figura V.9: Projetos para verificação gráfica e numérica ff1 ($c = 10$), ff2 ($c = 100$) e ff3 ($c = 200$).

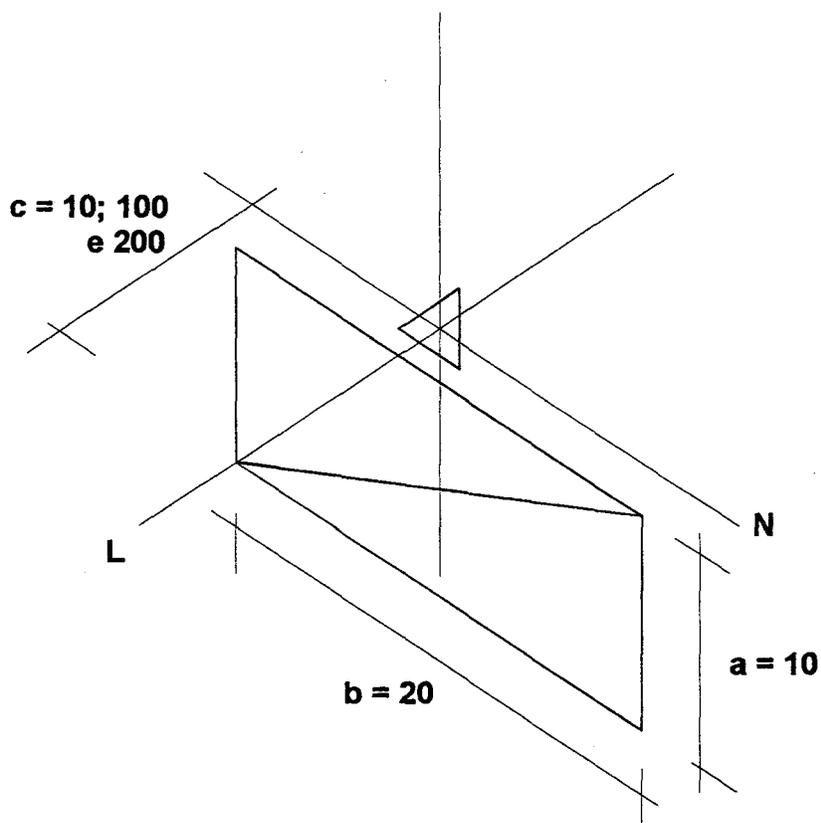


Figura V.10: Projetos para verificação gráfica e numérica ff4 ($c = 10$), ff5 ($c = 100$) e ff6 ($c = 200$).

Tregenza (1993) considera que seu método é aplicável a partir da proporção de 1:5. Obtivemos, para cada um dos seis projetos, processados segundo os quatro globos (90, 135, 200 e 300 faixas), três resultados para cada confrontação do triângulo receptor com cada um dos emissores: o resultado da somatória do fator de forma de todas as parcelas assinaladas pelo programa; o resultado do método de triângulos de Tregenza, e o resultado da fórmula de Siegel (1978). Os resultados estão resumidos no Quadro V.1.

Quadro V.1 - Resultado das comparações entre os três métodos (valores absolutos (fc), percentuais (%) e número de parcelas da projeção (np)):

Proj.		Siegel	Tregen.	Glb90	Glb135	Glb200	Glb300
ff1 2 : 1	fc	.167375	.145912999	.169538165	.168934756	.168328560	.1679731174
	%	100	87.17729	101,2924	100,9319	100,58106	100,357
	np	—	—	2.900	6.032	14.219	31.918
ff2 1 : 5	fc	.006161858	.006132432	.0065124549	.0064736469	.0063660562	.0062903075
	%	100	99.522449	105,689	105,0599	103,3139	102,0856
	np	—	—	87	180	418	928
ff3 1 : 10	fc	.001572528	.001576472	.0017297951	.001807145	.0017143889	.0016828569
	%	100	100.2508	110,0009	114,9197	108,9894	107,01602
	np	—	—	23	50	112	247
ff4 2 : 1	fc	.068697299	.063048478	.068848797	.068753601	.068746625	.0687337064
	%	100	91.77	100,2205	100,08195	100,0718	100,0529
	np	—	—	2.871	5.982	14.155	31.827
ff5 1 : 5	fc	.0003070844	.000306129	.0003384725	.0002888820	.0003247398	.000308173
	%	100	99.689	110,2213	94,0725	105,7493	100,354
	np	—	—	87	165	415	909
ff6 1 : 10	fc	.0000394279	.000039394	.0000475233	.0000370938	.0000368828	.0000436132
	%	100	99.9163	120,532	94,0800	93,5449	110,615
	np	—	—	24	43	101	242

Verifica-se que o sistema perde em precisão quando aumenta-se o distanciamento das parcelas emissoras, enquanto que o método de Tregenza ganha em precisão. O erro, no entanto, é bastante atenuado quando tomamos maiores resoluções para o globo.

Este erro de falseamento (*"aliasing"*) já era esperado como inerente ao método, em circunstâncias similares ao hemi-cubo, uma vez que optamos por incluir ou excluir por inteiro as parcelas na análise de continência, como será descrita na verificação gráfica. A questão é em que medida este erro é aceitável e em que circunstâncias ocorrerá.

Neste protótipo não foi utilizada nenhuma hierarquia, ascendente ou descendente, o que incorreu no falseamento. Neste aspecto é importante salientar o efeito da posição da superfície, além do seu tamanho relativo: superfícies da mesma projeção podem incluir ou excluir conjuntos de parcelas conforme sua localização no globo. Observa-se, por exemplo, no quadro V.1, que o erro obtido nos projetos **ff5** e **ff6**, quando processados no globo135 são praticamente iguais, apesar do tamanho diferente das projeções. Por outro lado, os mesmos projetos processados no globo200, de maior

resolução, apresentam variação de erro de cerca de 10% de **ff5** para **ff6**; no entanto o erro absoluto é aproximadamente igual nos dois casos. Quando observamos o projeto **ff6**, vemos que o erro obtido com o globo300 (583.902 parcelas) é quase o dobro do verificado no globo135 (118.296 parcelas).

Observa-se também que, no computo do fator de forma, interessa não só a quantidade de parcelas que compõem a projeção, mas também sua posição relativa ao ponto do observador. Devido a isto, a projeção dos projetos **ff1** a **ff3**, que estão localizados na região zenital, coincidentemente têm o erro de falseamento colocado nas faixas de parcelas de menor altura angular; por outro lado, os projetos **ff4** a **ff6** são projetados a partir do horizonte, ficando o falseamento nas parcelas de maior altura angular. Desta forma o efeito cosseno interfere e vemos que, apesar de representados aproximadamente pela mesma quantidade de parcelas, há diferença quanto ao peso das parcelas incluídas ou excluídas na projeção. Os projetos **ff3** e **ff6**, representados no globo90 por 23 e 24 parcelas, respectivamente, têm erros de 10% e 20,5 %, devido a esse peso diferenciado. Outros aspectos interferem nas inclusões / exclusões, como por exemplo o comprimento dos arcos que projetam arestas. Arestas de mesmo tamanho têm projeções de arcos diferenciadas, podendo incluir / excluir mais ou menos parcelas, conforme o caso.

Estes erros estão suficientemente descritos na literatura, como vimos, e são solúveis por métodos numéricos ou mesmo geométricos, mas sobrecarregam a análise. O programa LightScape (LightScape Tec. (1998)), por exemplo, oferece uma opção com ou sem "*antialiasing*", que possibilita redução do falseamento, mas a custa de tempo de processamento.

Neste protótipo não aplicamos nenhuma correção. No entanto, o fato de, ao definir uma projeção qualquer, o modelo lidar justamente com as parcelas que se encontram sobre os limites da projeção facilita bastante a aplicação das técnicas de correção. O procedimento de definição destas parcelas já fornece elementos para saber **quanto** a parcela limítrofe está dentro da projeção, inclusive admitindo uma subdivisão em *quadthree*.

Para uma análise mais contextual da ocorrência do falseamento, foi realizado um outro tipo de verificação numérica.

O segundo procedimento utilizou os mesmo projetos, somente com uma divisão triangular bastante acentuada.

Considerando que um triângulo isolado visto de perspectiva que reduza bastante o triângulo esférico, ou será ocorrência rara nas proximidades do ponto de análise ou representará um elemento grande bastante distante, na maioria dos casos, a maior probabilidade de ocorrência será de conjuntos de pequenos triângulos contíguos representando elementos de maior dimensão real. Nesta hipótese, os erros devem atenuar-se de forma a permitir, na somatória final, maior precisão.

Para verificar esta hipótese, tomamos os projetos **ff1** e **ff4**, fracionando **ff1** em 17 triângulos num caso e 26 no segundo; o projeto **ff4** foi fracionado em 13 e 19 triângulos. Cada um deles foi processado com os globos de 90, 130, 200 e 300 faixas. Os resultados da somatória de cada fração do elemento gerador foram confrontados com os parâmetros de verificação e estão resumidos no Quadro V.2.

Quadro V.2 - Comparação de resultados no teste de fracionamento

Proj.		Siegel	Σ Tregen.	Σ Glb90	Σ Glb135	Σ Glb200	Σ Glb300
ff1 17 tri 2 : 1	fc	.167375	.1630172	.169583165	.168934756	.16832856	.167973117
	%	100	97.3964	101.31929	100.93189	100.5697	100.3574
	np	—	—	2.900	6.032	14.219	31.918
ff1 26 tri 2 : 1	fc	.167375	.164026127	.167725074	.167957402	.16782428	.167798814
	%	100	97.99628	100.20915	100.34796	100.26842	100.2532
	np	—	—	2.870	5.994	14.171	31.865
ff4 13 tri 2 : 1	fc	.068697299	.069472621	.068874952	.06878496	.0687573145	.0687436426
	%	100	101.1286	100.2586	100.1276	100.0873	100.0674
	np	—	—	2.871	5.982	14.155	31.827
ff4 19 tri 2 : 1	fc	.068697299	.068008772	.069387197	.069230504	.069222381	.069256805
	%	100	98.9977	101.00425	100.7762	100.7643	100.81445
	np	—	—	2.882	6.006	14.206	31.968

Como verificação final, este método foi adotado com duas superfícies significativas próximas, representadas no projeto Conf0a, que foi dividido em 162 triângulos. Para cada triângulo receptor de um plano foi calculado o fator de configuração pelos dois métodos, o do sistema e o de Tregenza, sendo comparados os resultados ao final. A tabela seria extensiva para aqui anexar. Os resultados mostraram, no entanto, que a variação não chegou a 1% em praticamente todos os casos, aproximando-se na média em torno de 0.5 %.

V.2 - VERIFICAÇÃO GEOMÉTRICA

A verificação geométrica foi desenvolvida de maneira gráfica, com o objetivo de analisar três tipos de resultados: a **continência**, o **vazamento** e a **visibilidade**.

Continência: O método deve ser capaz de localizar no espaço de referência absoluto (globo fracionado) as parcelas que representam o elemento triangular projetado esfericamente, que deve ter a mesma localização e configuração espacial que os triângulos esféricos gerados graficamente a partir do projeto em análise. O conceito de pertinência adotado é a pertinência do ponto assinalado pelo vetor normal (centro) da parcela do globo à projeção esférica do triângulo.

Além dos seis projetos utilizados na verificação numérica, utilizou-se também os demais oito projetos (Figuras V.1 e V.8), confrontando duas superfícies em situações variadas. Para cada projeto foram construídos, a partir do centro de cada triângulo tomado como receptor, os triângulos esféricos de raio unitário relativos a cada triângulo emissor válido. Estes projetos, em formato DXF, foram então convertidos, fracionados e projetados segundo as parcelas do Globo90 e do Globo300, gerando-se arquivos gráficos com as parcelas identificadas. Estas projeções foram superpostas aos desenhos dos triângulos esféricos de cada projeto, para observar-se a continência das parcelas aos triângulos. Os resultados mostraram-se bastante precisos, como pode ser verificado nas Figuras V.11 a V.24.

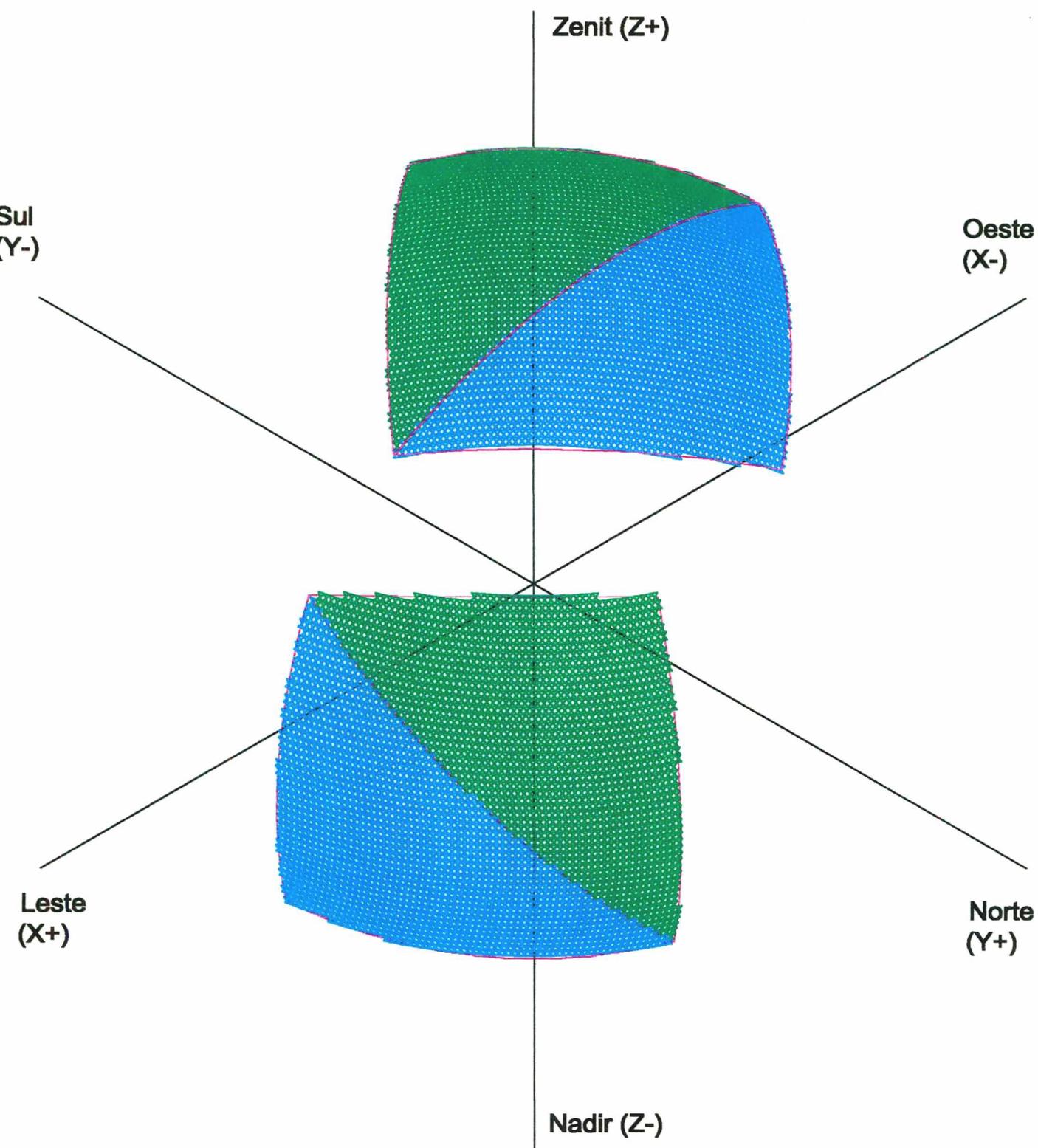


Figura V.11: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf0a. A figura representa a junção de duas projeções: cada plano composto de dois triângulos foi projetado uma vez com o foco no ponto médio de um dos triângulos do outro plano. Não é uma projeção obtida de um ponto entre os dois planos. O mesmo procedimento foi usado nas projeções apresentadas até a figura V.18.

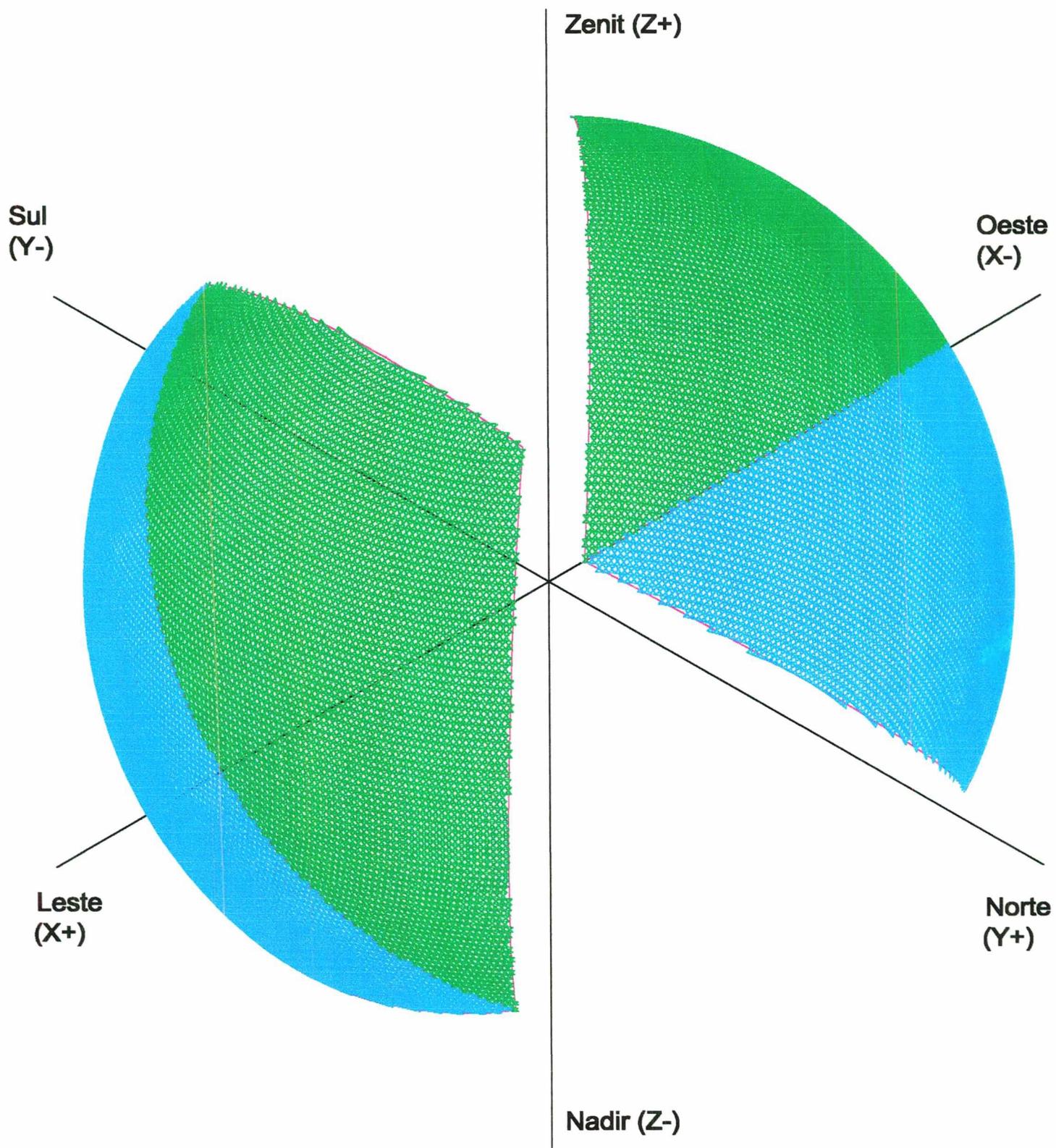


Figura V.12: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf0b.

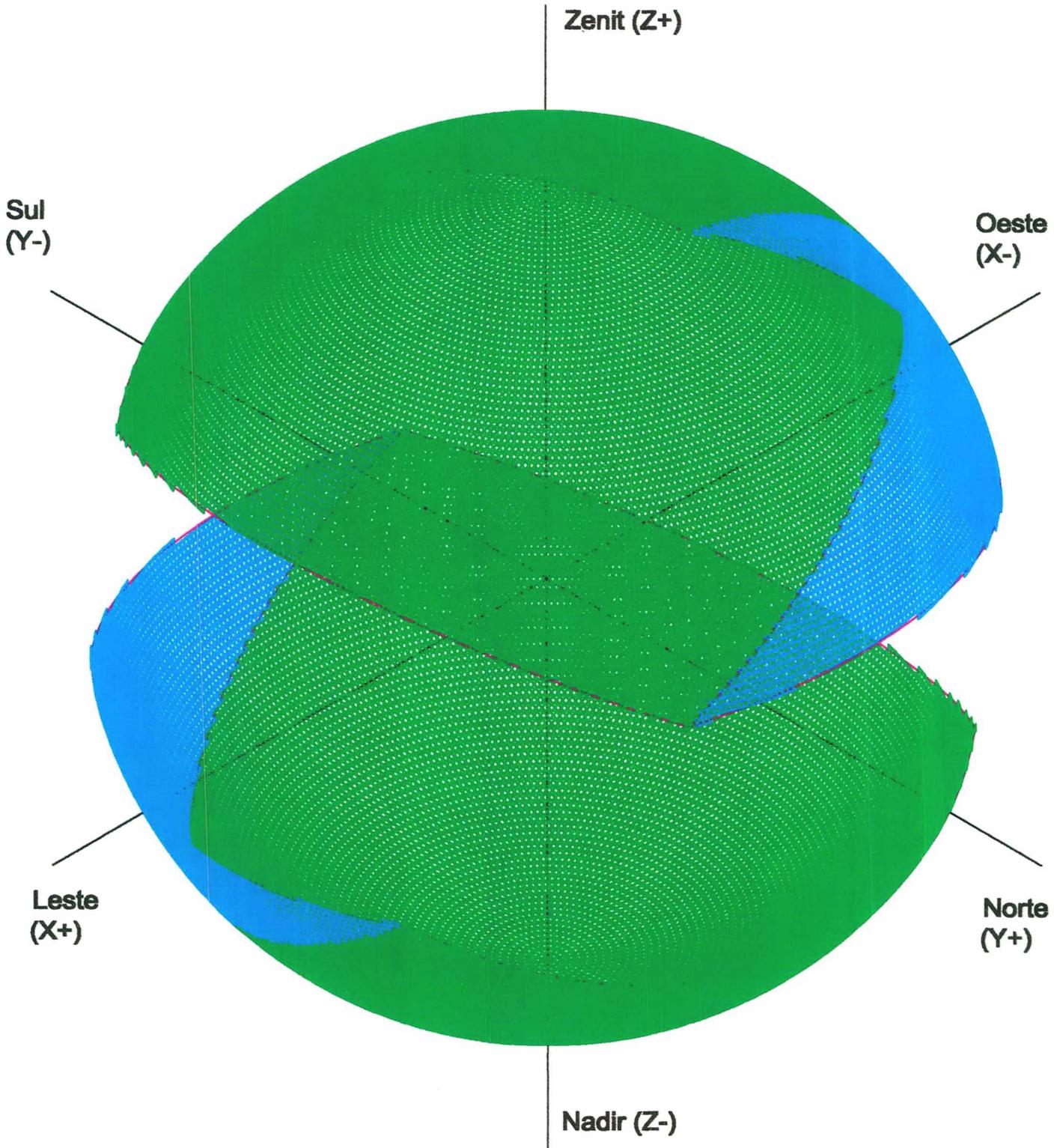


Figura V.13: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf0c.

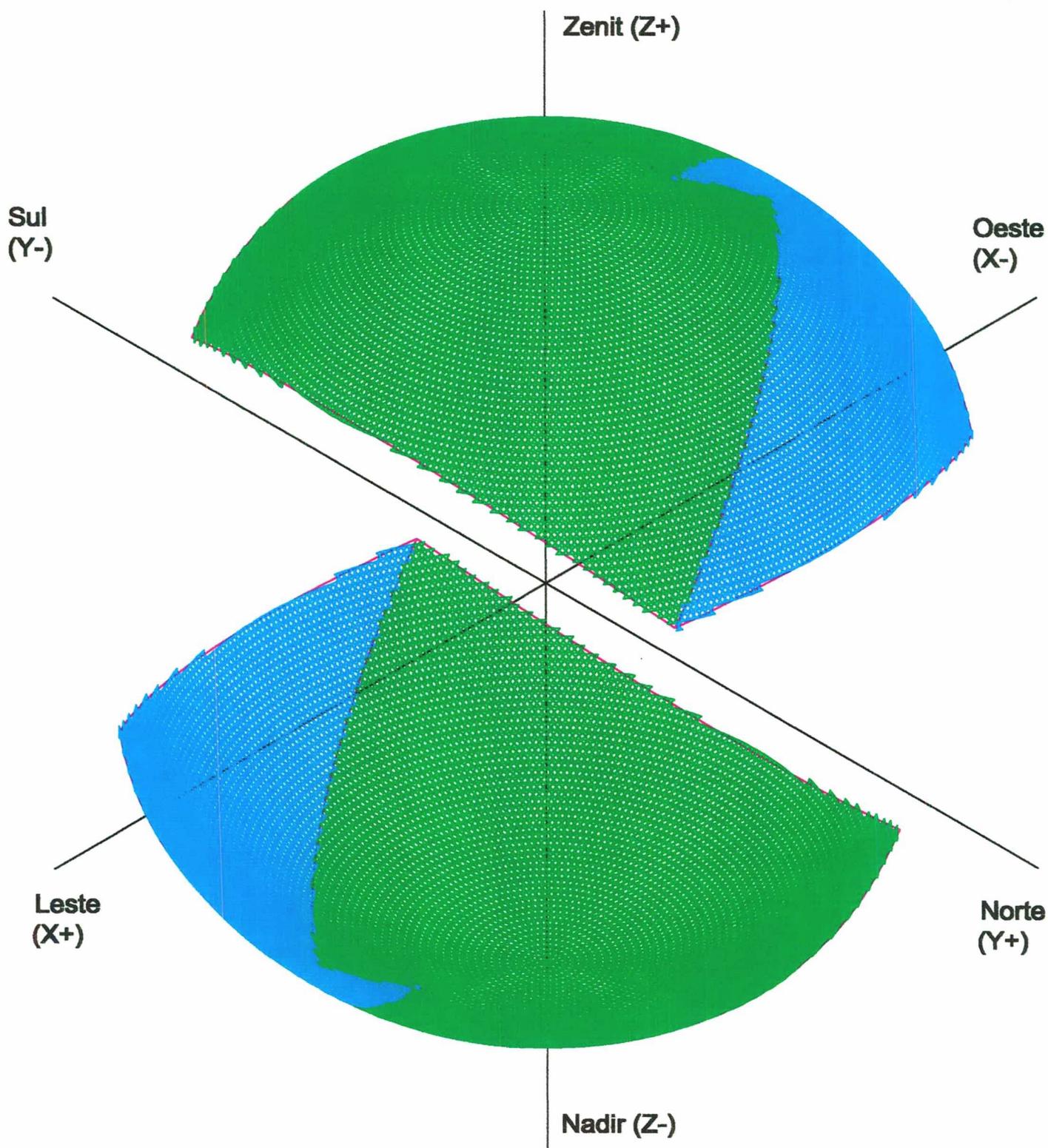


Figura V.14: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf0d.

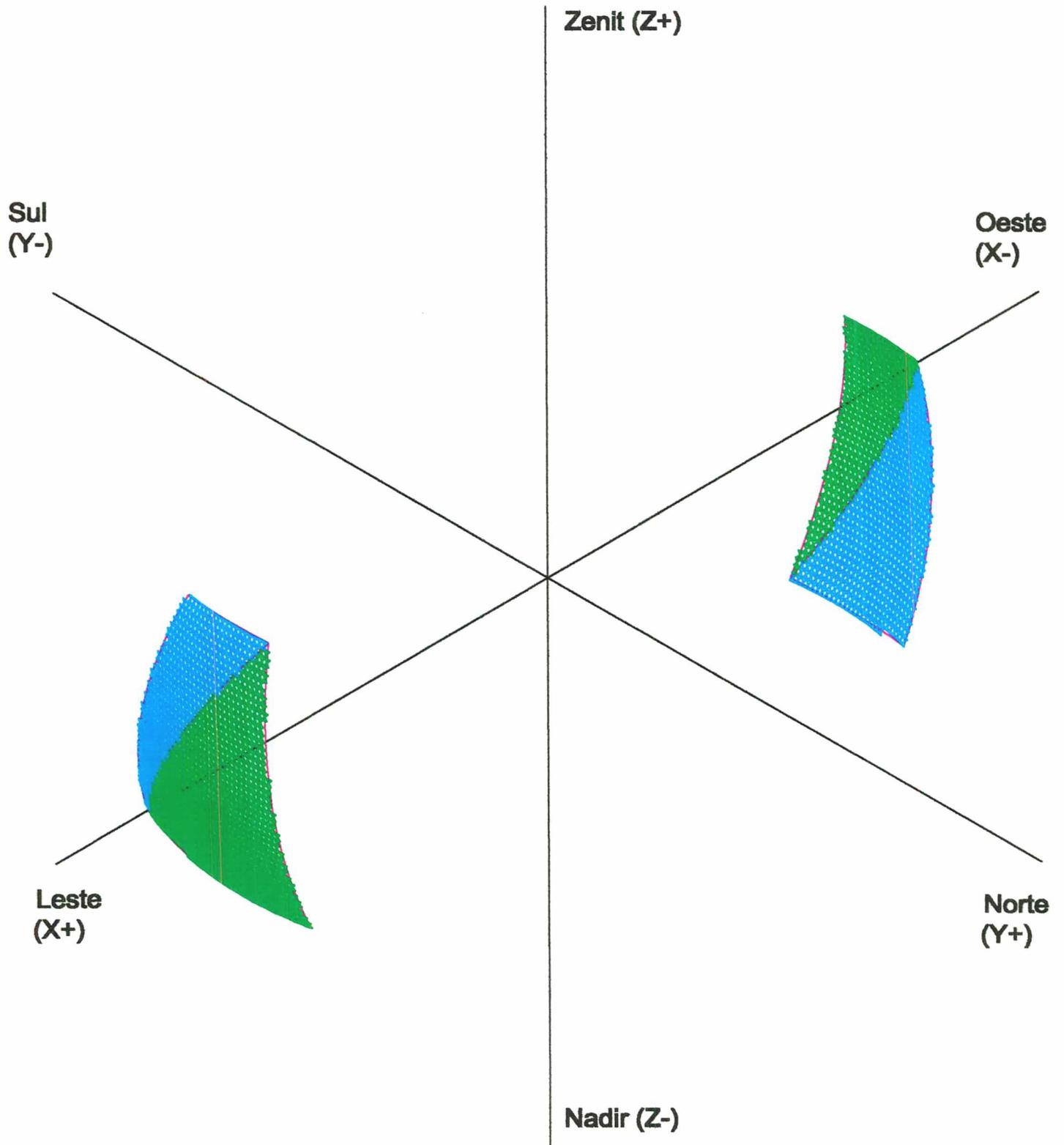


Figura V.15: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf3.

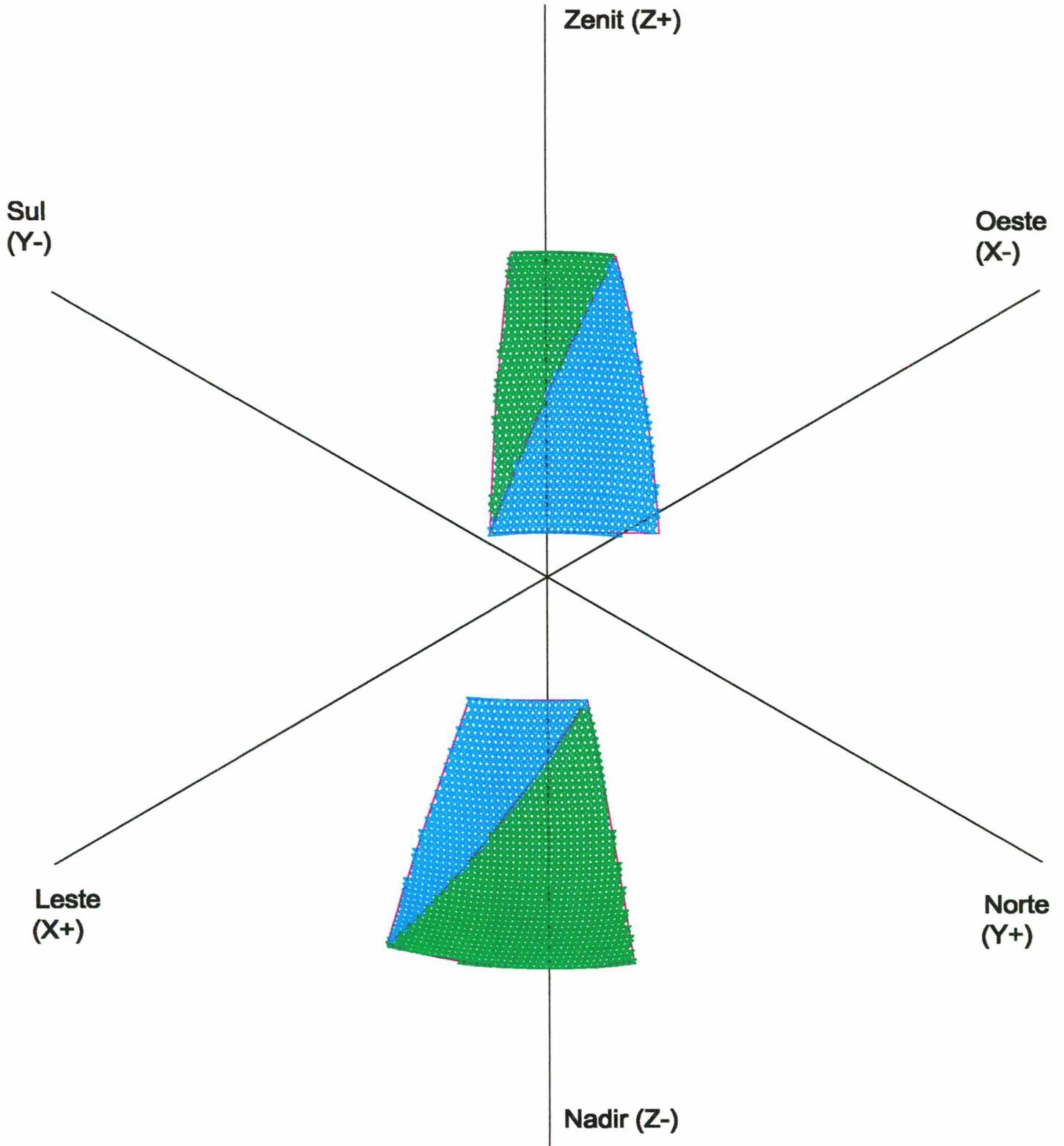


Figura V.16: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf4.

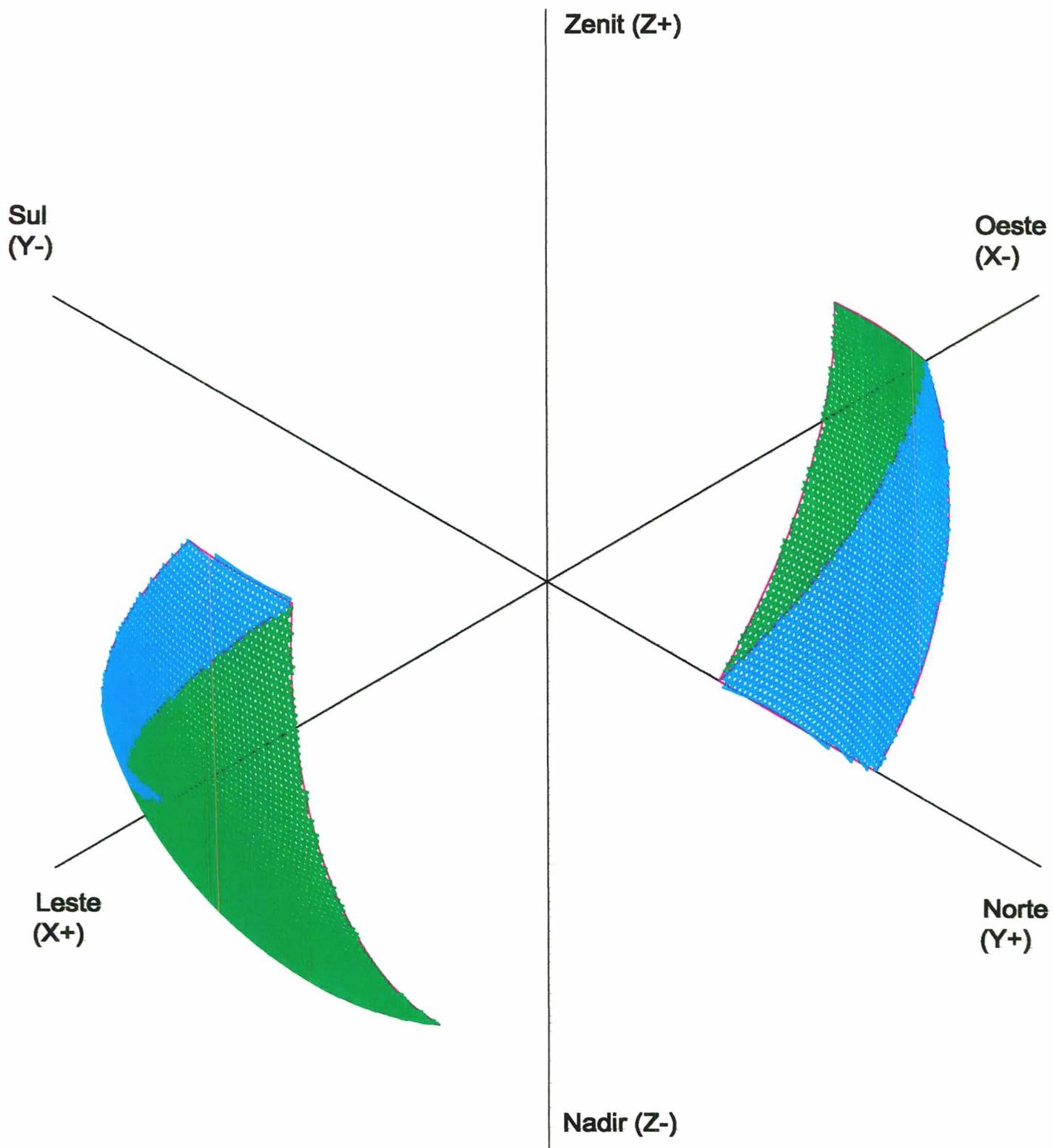


Figura V.17: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf5.

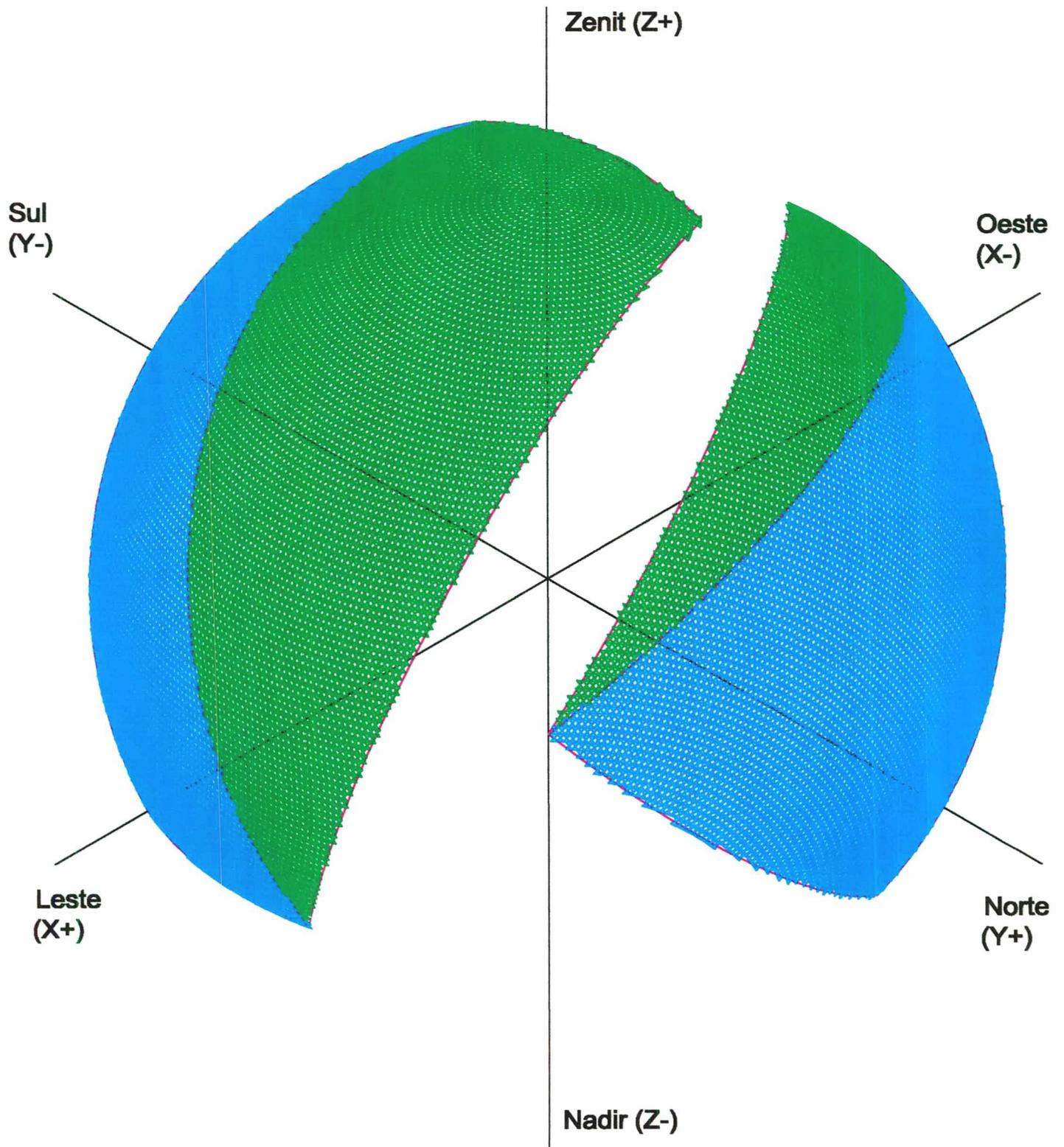


Figura V.18: Triângulos esféricos de parcelas do projeto Conf6.

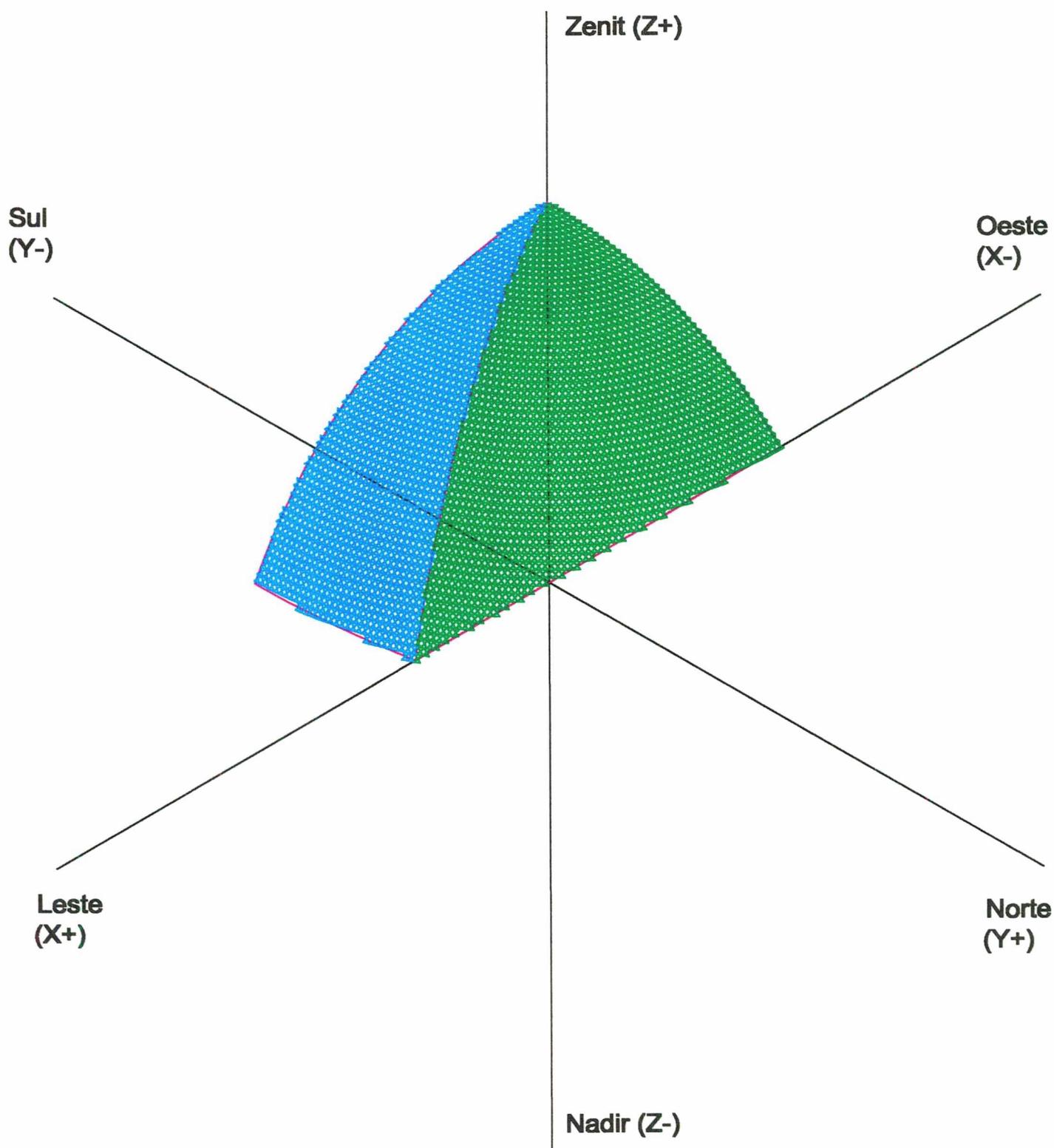


Figura V.19: Triângulos esféricos de parcelas do projeto ff1. Para os projetos de ff1 a ff6, nas figuras V.19 a V.24, o procedimento de projeção foi aplicado apenas com o centro na parcela triangular situada na origem, projetando-se os dois triângulos do plano visualizado.

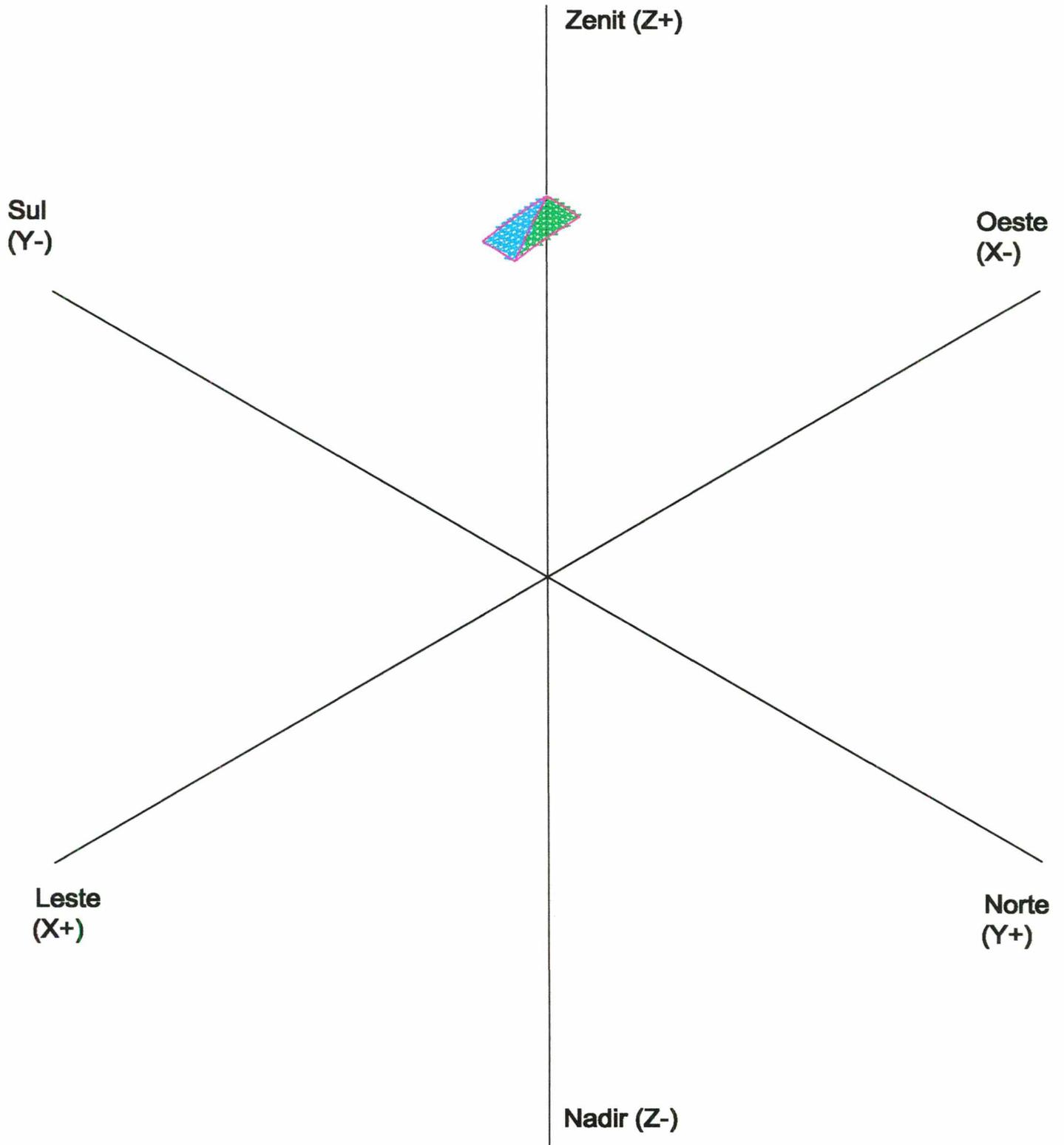


Figura V.20: Triângulos esféricos de parcelas do projeto ff2.

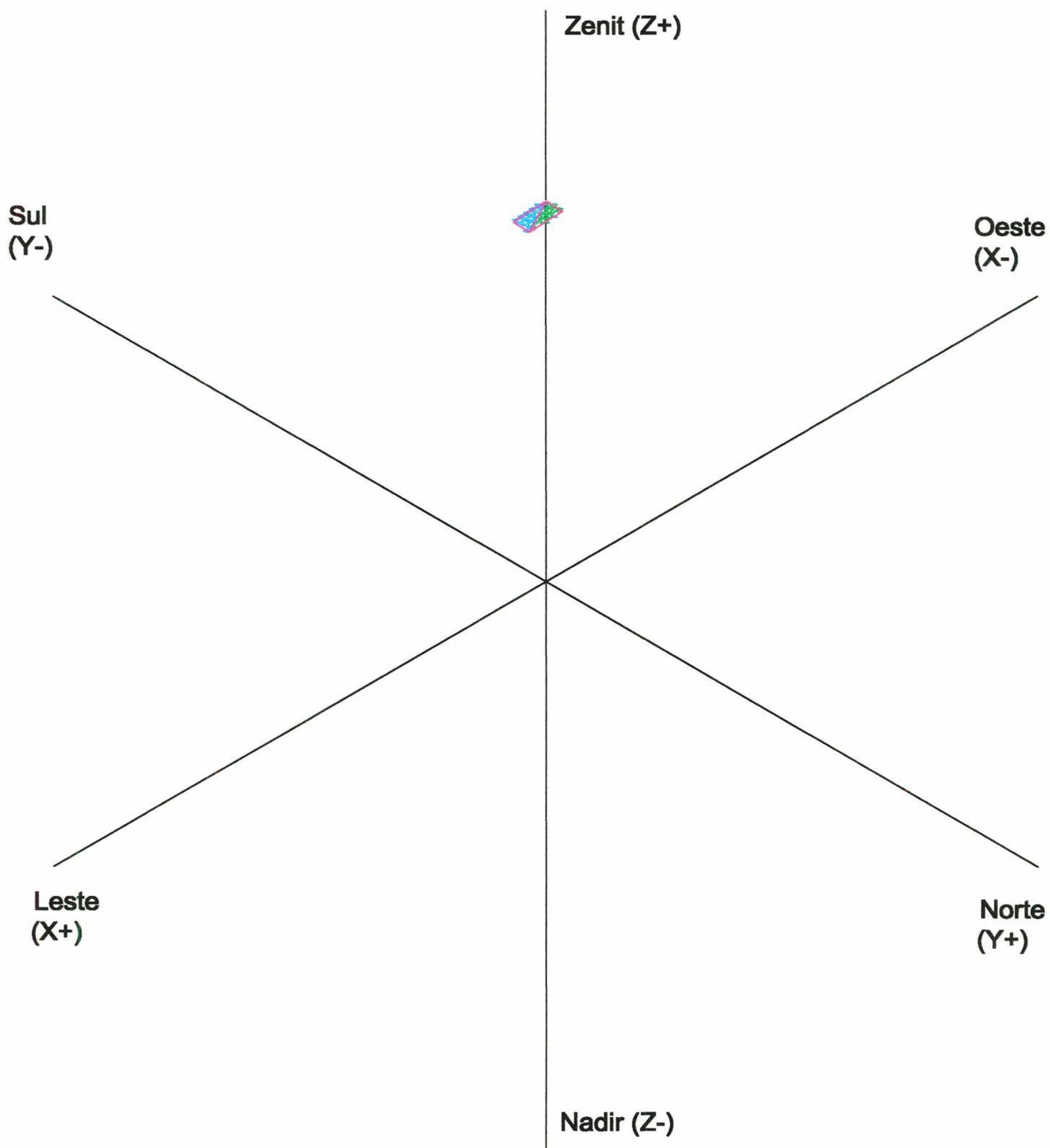


Figura V.21: Triângulos esféricos de parcelas do projeto ff3.

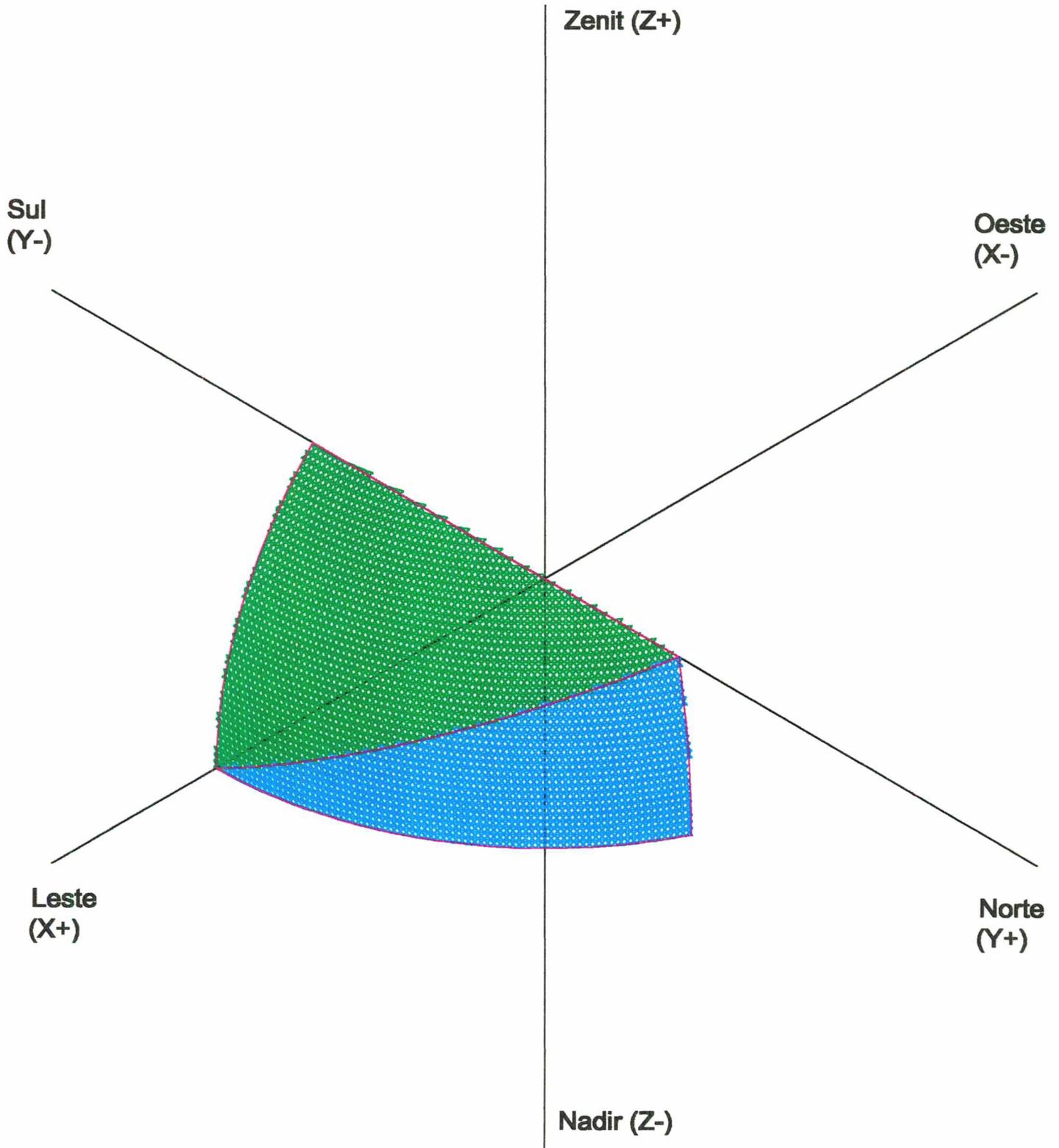


Figura V.22: Triângulos esféricos de parcelas do projeto ff4.

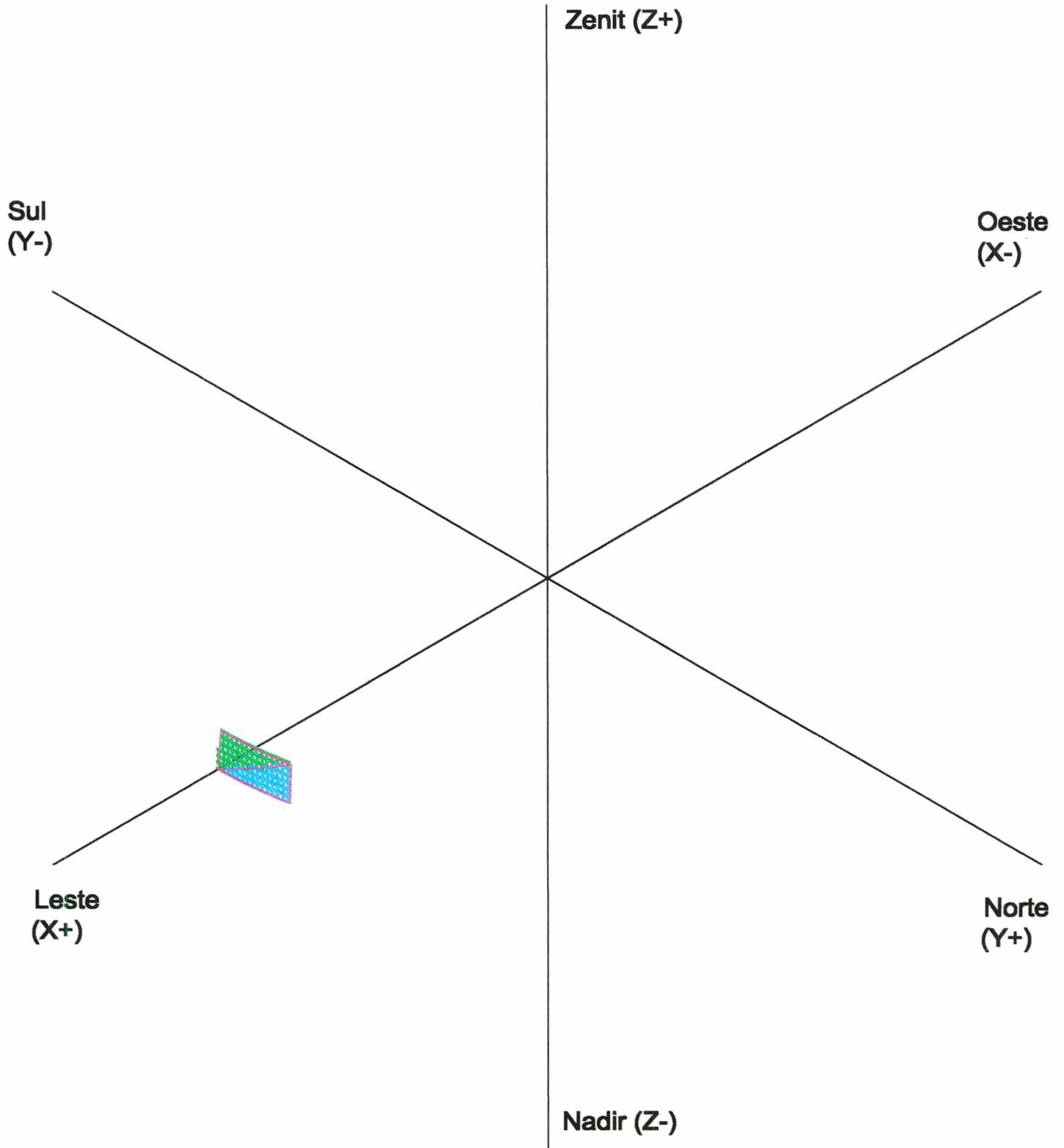


Figura V.23: Triângulos esféricos de parcelas do projeto ff5.

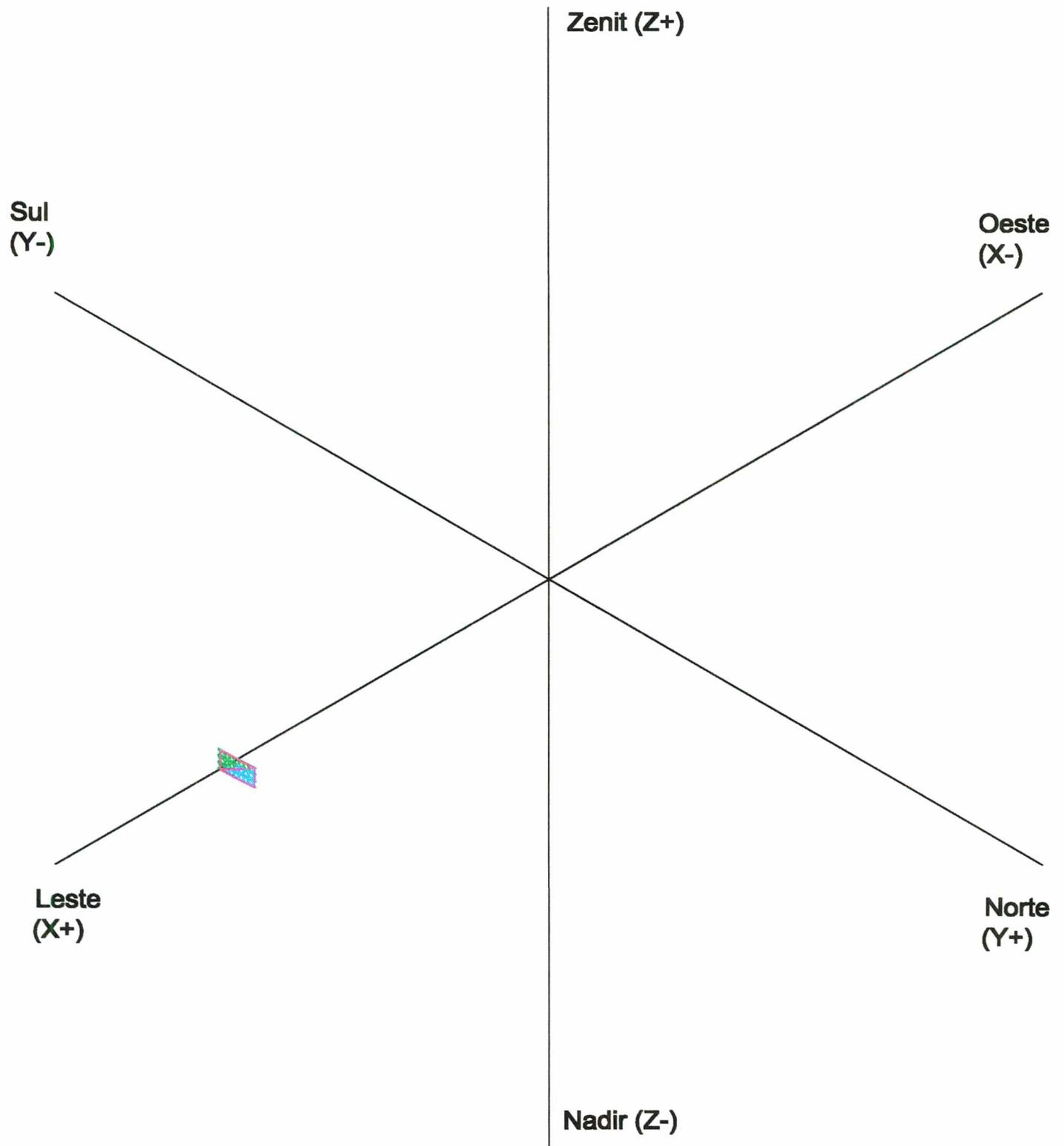


Figura V.24: Triângulos esféricos de parcelas do projeto ff6.

Vazamento: O vazamento consiste na ocorrência de parcelas não assinaladas no interior de um triângulo ou no limite entre dois triângulos limítrofes que representem um mesmo plano. É uma possibilidade teórica, dado que é possível ocorrer uma variação muito pequena de cálculo, de forma que um vetor situado exatamente sobre um limite, não seja incluído em nenhum dos triângulos adjacentes a esses limites. Para diminuir a possibilidade desses erros, o programa foi desenvolvido utilizando-se variáveis de 8 bytes, com dupla precisão.

Para verificação gráfica desse erro foram utilizados alguns dos modelos anteriores fracionados em maior quantidade, sendo remontados a partir dos elementos projetados e observada a ocorrência de parcelas não assinaladas no resultado final. Também foi feita a observação na fronteira entre elementos adjacentes nos modelos da verificação da continência.

Como pode ser observado nas Figuras V.25 a V.28, não houve nenhum elemento que deixou de ser assinalado no interior dos modelos estudados, nem houve derramamento das parcelas para fora dos limites dos triângulos esféricos (observando-se que é considerado o centro da parcela, e não ela como um todo). Mesmo no caso do encontro de vários triângulos em um vértice, ampliado na Figura V.29, não se verificou vazamento.

Visibilidade: O método permite definir com precisão a circunstância de superposição de superfícies, ou de grau de ocultamento, pois analisa a situação de cada fração de superfície. Para verificar a superposição, processamos o modelo da Figura V.30, que consiste de duas superfícies opacas nas extremidades e três transparentes entre elas. O processamento foi centrado na superfície transparente do meio, verificando-se a superposição em relação à visibilidade nas duas direções em que se encontram as outras superfícies, extraíndo-se os elementos da abóbada. Para visualização, a superposição foi representada com raios diferentes para cada nível do vetor de posições, o último correspondendo à abóbada. Os resultados podem ser vistos na Figura V.31. Na figura V.32 temos um outro modelo onde a análise foi centrada em um triângulo da superfície lateral, verificando-se a visibilidade parcial dos demais planos e a definição da abóbada, conforme resultado na Figura V.33

V.3 - VERIFICAÇÃO GLOBAL DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Para a verificação global do procedimento foram utilizados dois projetos de características mais complexas que os anteriores, de configuração mais arquitetônica (Figuras V.34 e V.35). O primeiro modelo, que chamaremos de **Complex2**, contém dois ambientes ligados entre si por uma área exterior (como se fosse uma rua) sendo que cada ambiente possui uma porta e uma janela (sem acessórios) e um cubo com a face superior inclinada, colocado no meio do piso de cada ambiente. Cada módulo mede 3x3x3, separados por uma distância 2,5. Os ambientes estão voltados na direção Leste e Oeste, sendo que o foco de análise foi centrado logo acima do cubo no ambiente com aberturas voltadas para Leste. No segundo modelo, que chamaremos **Complex3**, foi retirado o ambiente com aberturas voltadas para a direção Oeste. Foram utilizados na verificação dos aspectos físicos da iluminação: valores de energia luminosa e distribuição da energia sobre os elementos do projeto conforme as condições da abóbada, bem como na avaliação do tempo de processamento.

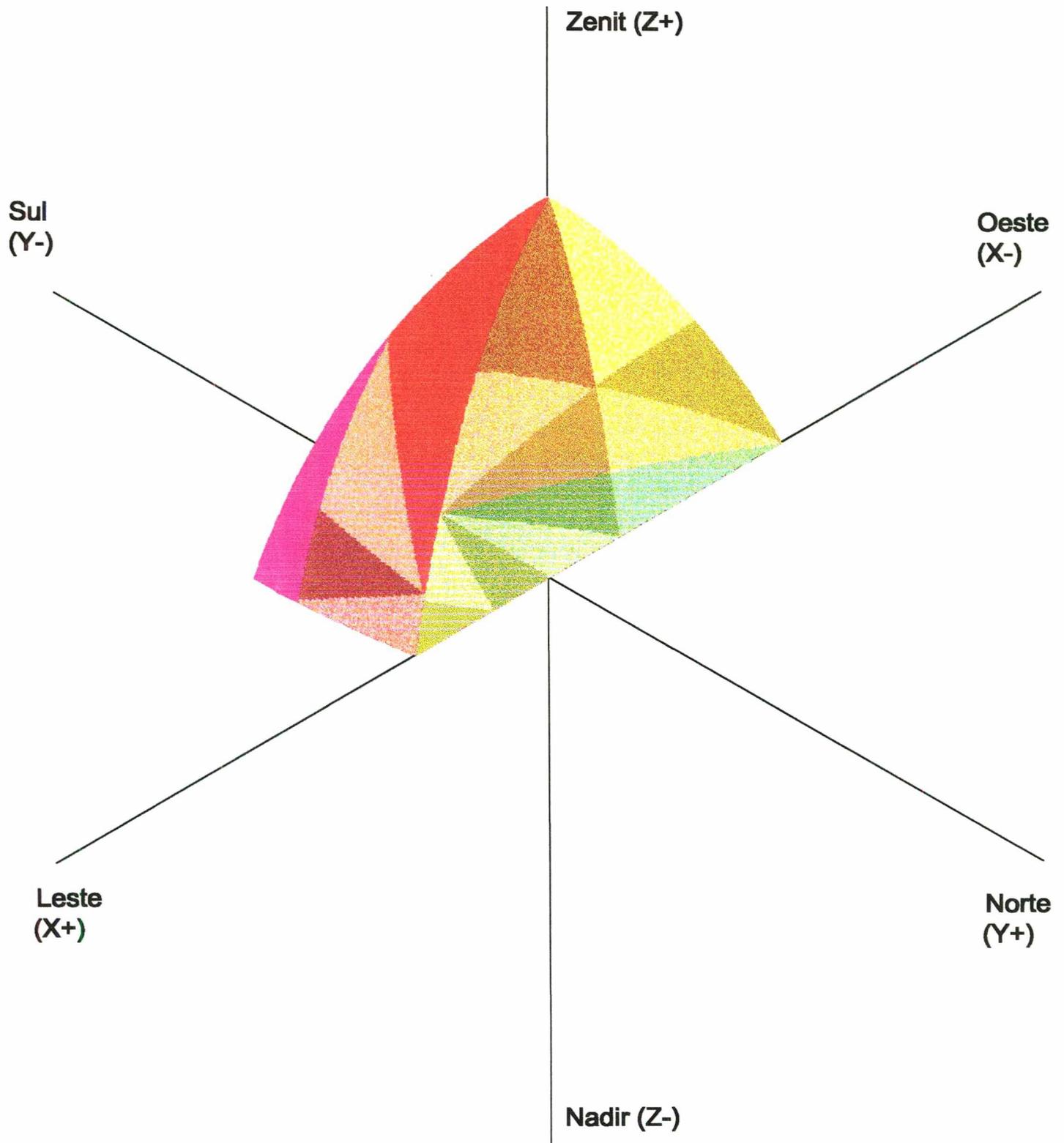


Figura V.25: Projeto ff1 fracionado em 17 triângulos e recomposto. (resolução de 200 faixas).

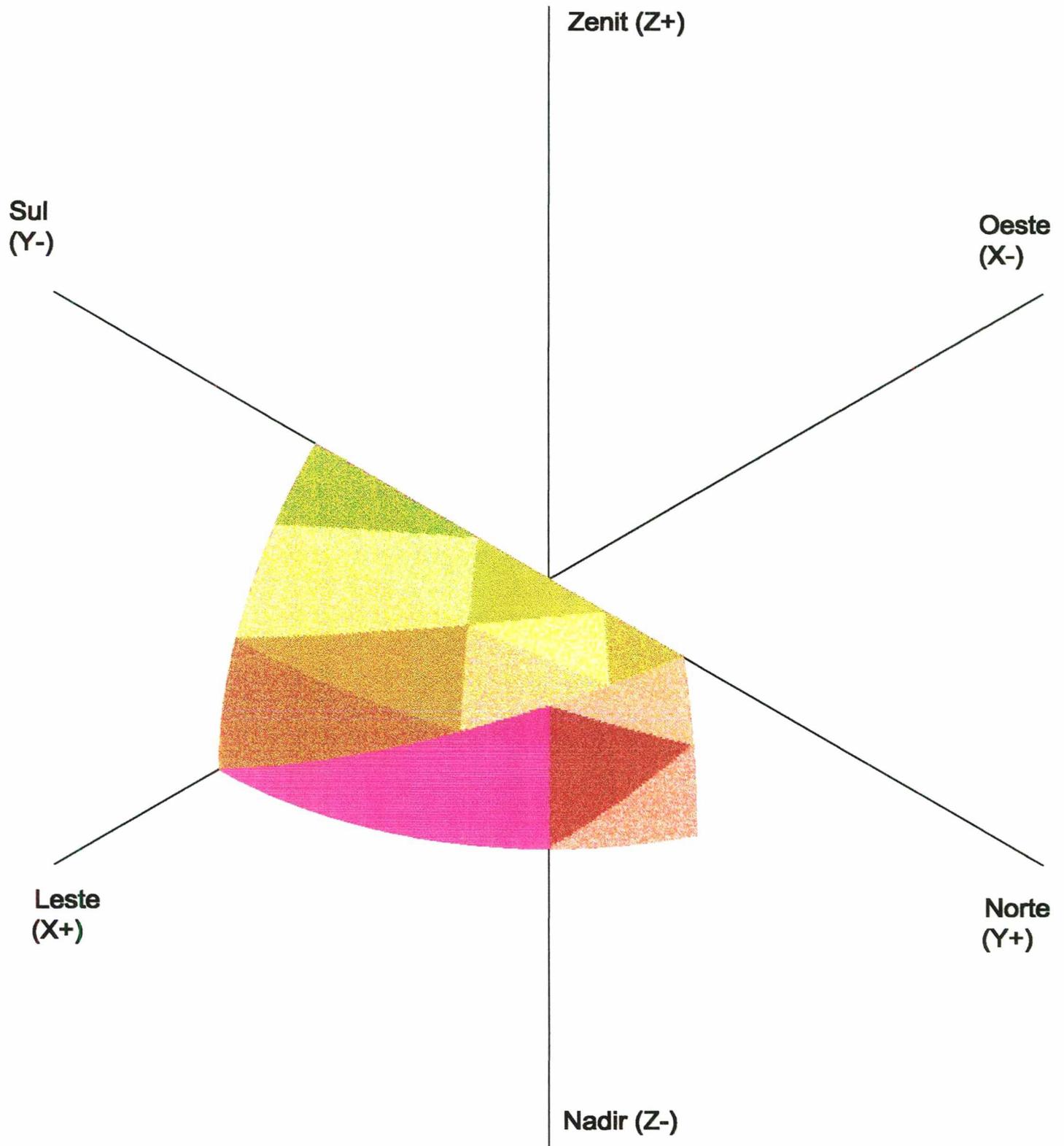


Figura V.26: Projeto ff4 fracionado em 13 triângulos e recomposto. (resolução de 200 faixas)

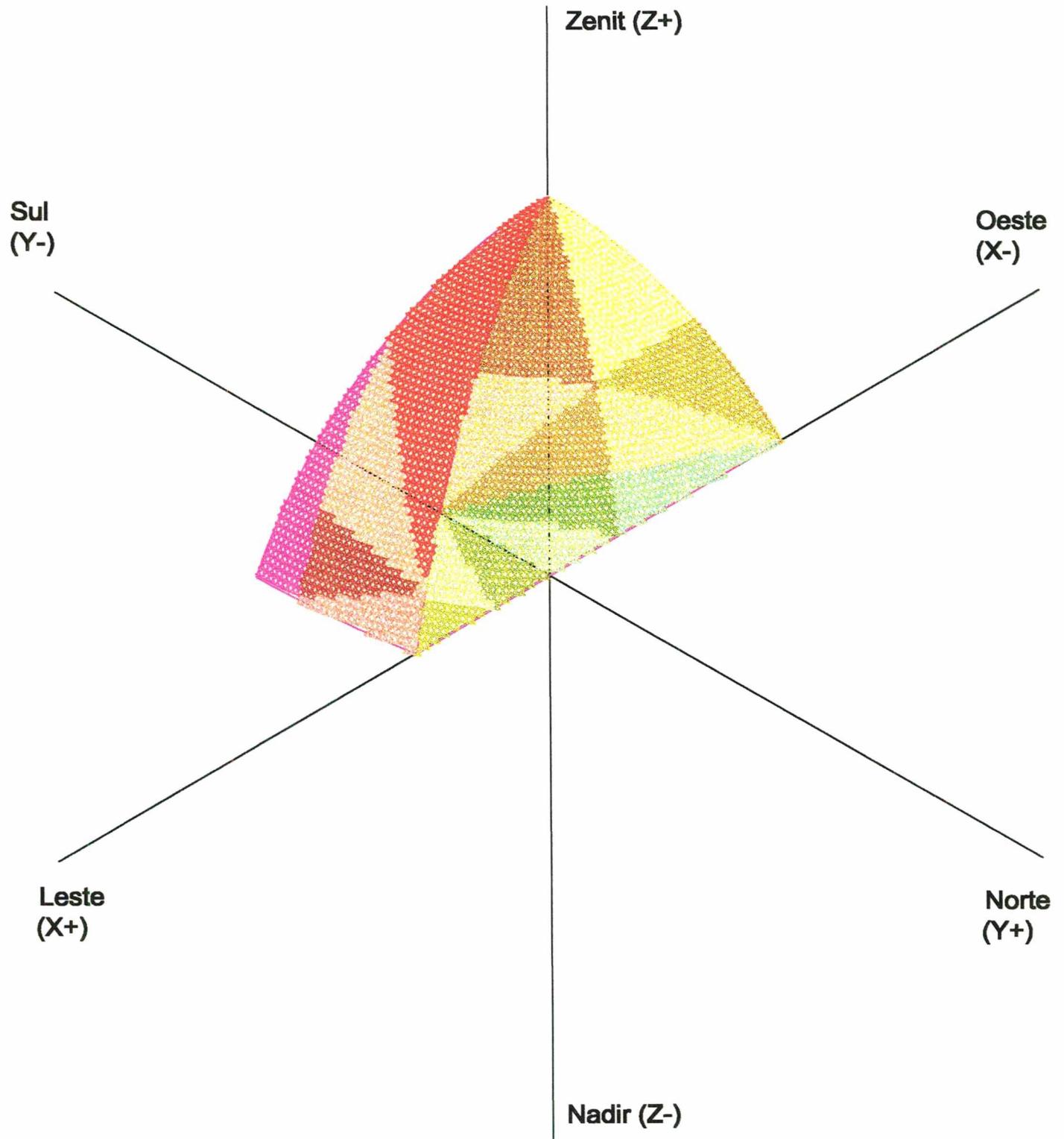


Figura V.27: Projeto ff1 fracionado em 17 triângulos e recomposto (resolução de 90 faixas)

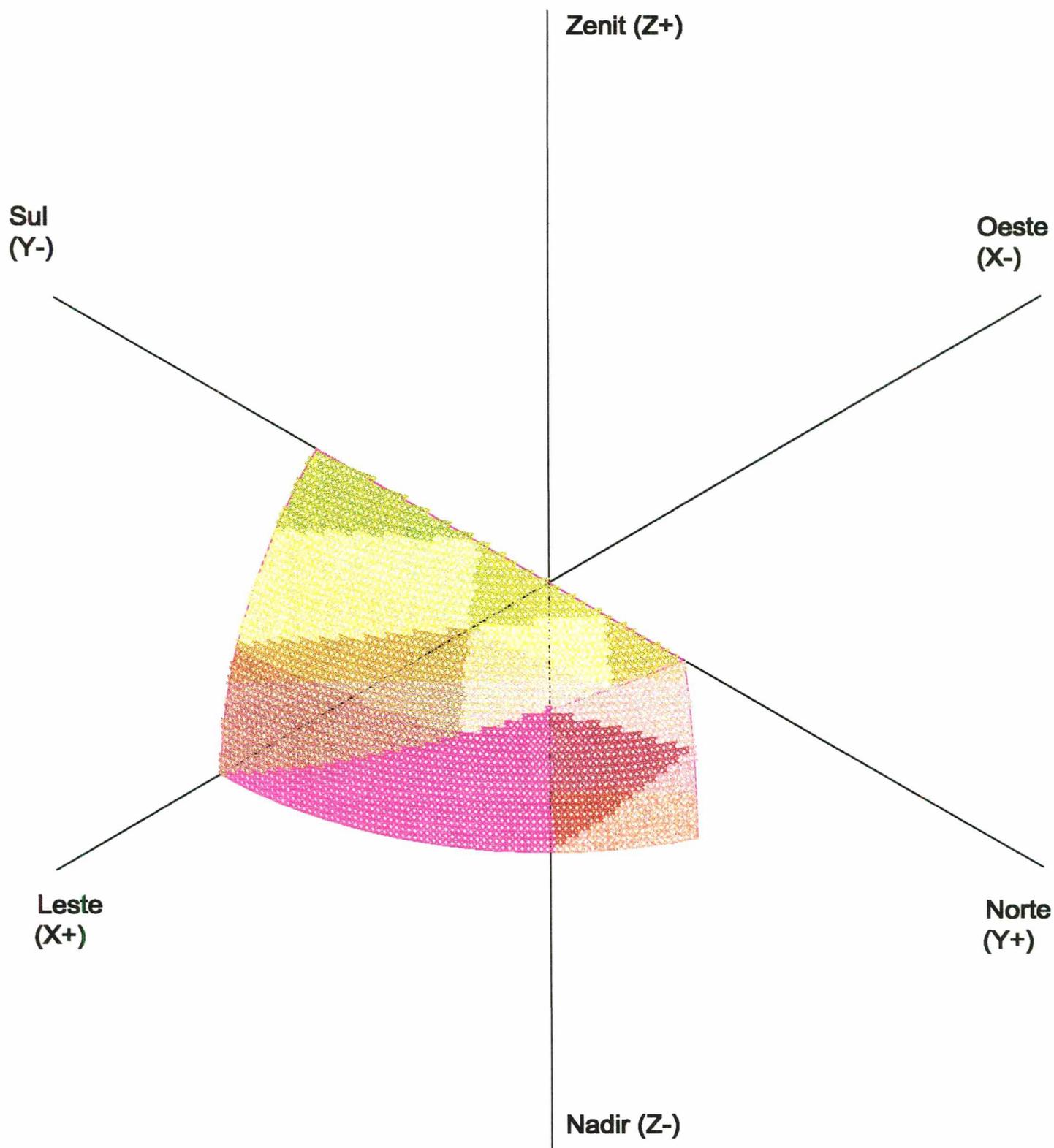
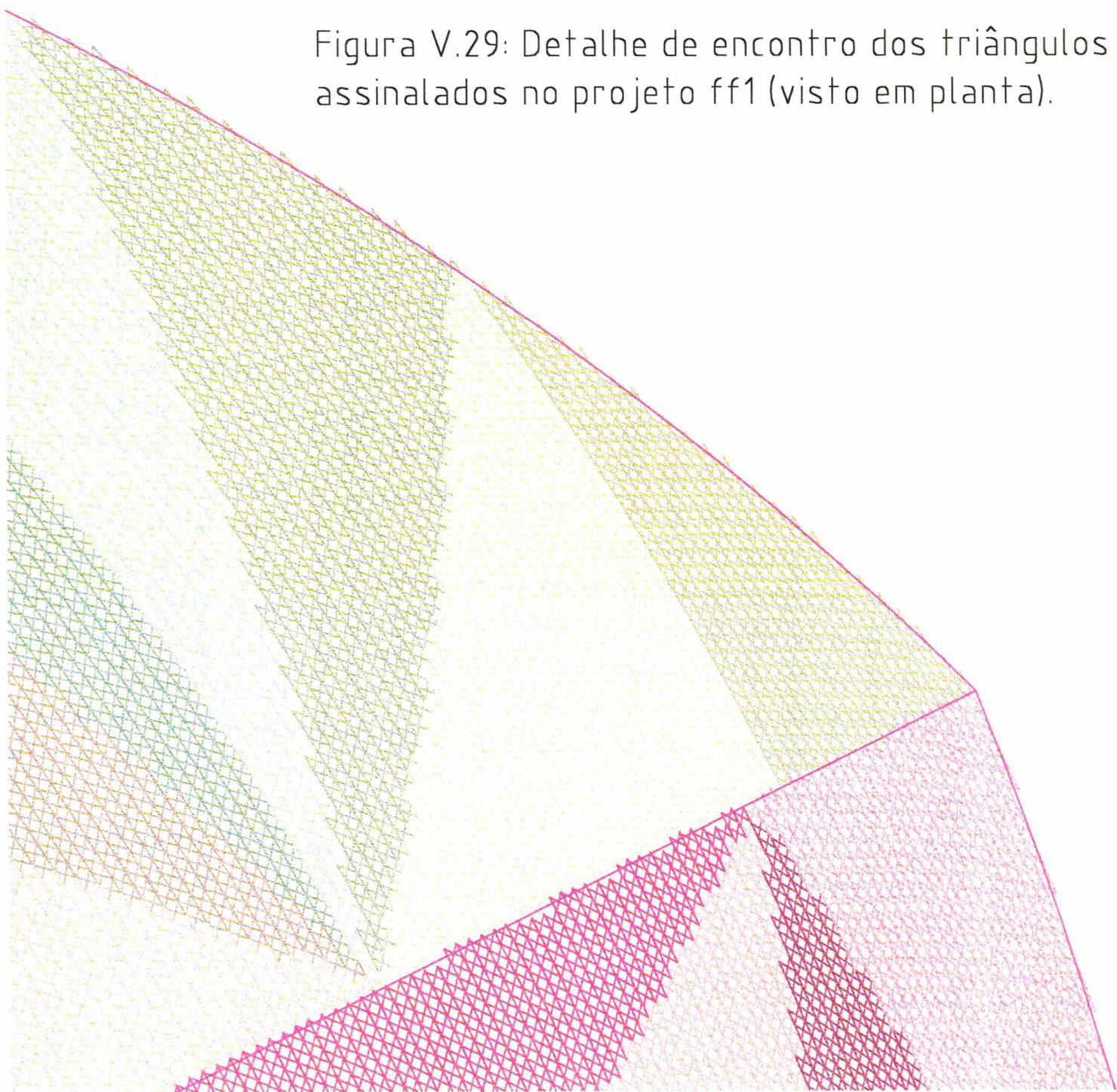


Figura V.28- Projeto ff1 fracionado em 13 triângulos e recomposto (resolução com globo de 90 faixas).

Figura V.29: Detalhe de encontro dos triângulos assinalados no projeto ff1 (visto em planta).



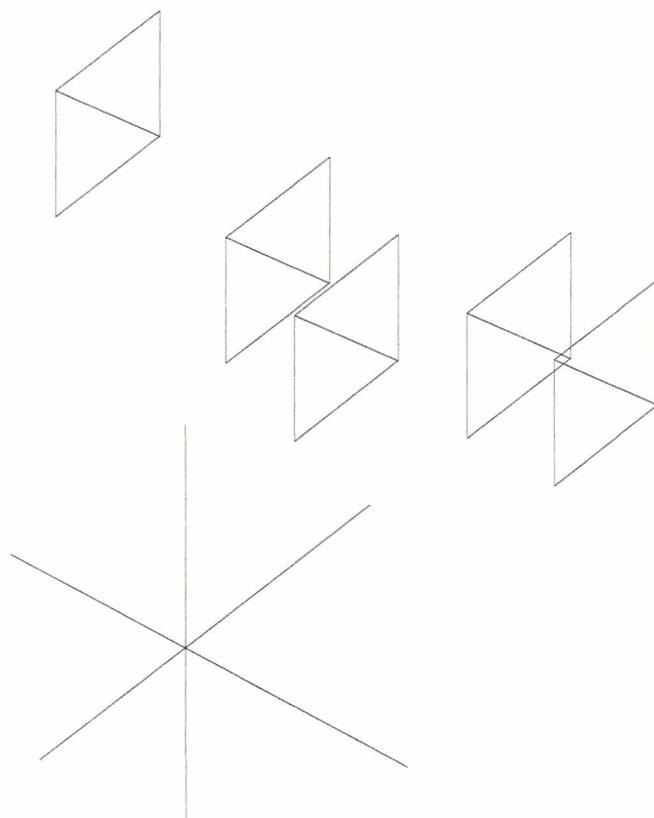


Figura V.30 - Projeto para teste de visibilidade, composto por dois planos opacos nos extremos, entremeados por tres planos transparentes, com o foco no triângulo inferior do plano central

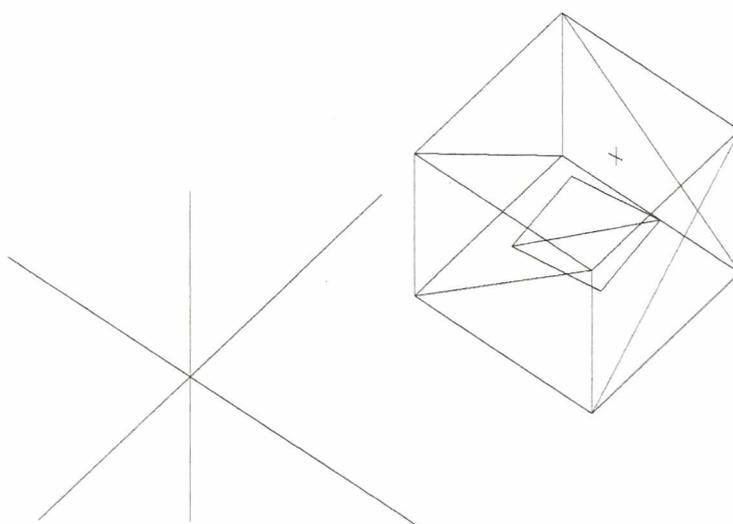


Figura V.32 - Projeto para teste de visibilidade, composto por quatro planos ortogonais e contínuos com um plano inclinado no centro. O foco está colocado no triângulo assinalado no plano Norte.

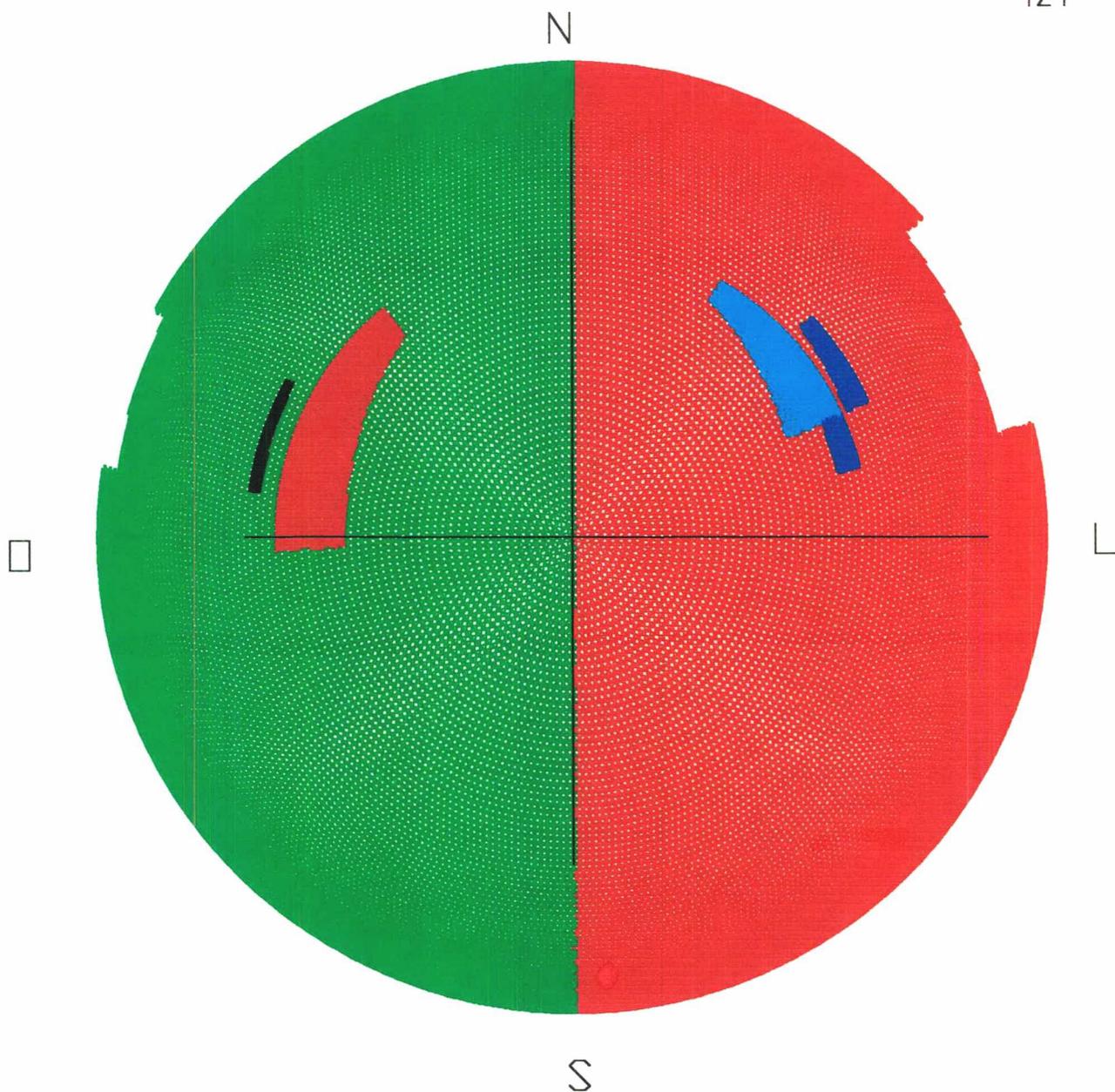


Figura V.31 – Representação vista do Zenith da projeção dos elementos da figura V.30, encimados pela abóbada positiva e negativa do plano central e indicando a obstrução da abóbada pelos planos extremos e a superposição dos planos observados do centro.

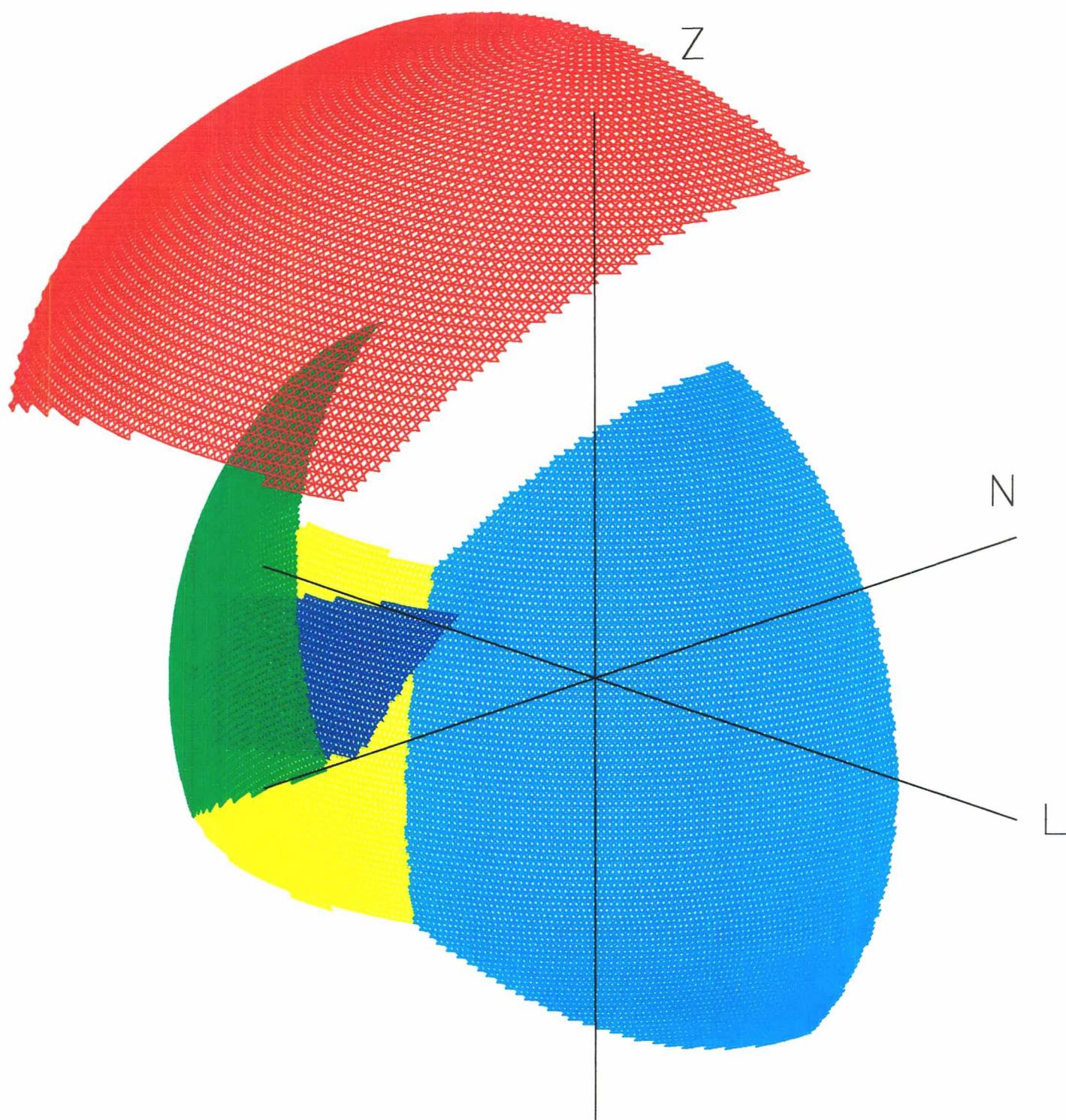


Figura V.33 - Projeção dos planos da Figura V.32, encimados pela projeção da abóbada (em vermelho, com o raio explodido)

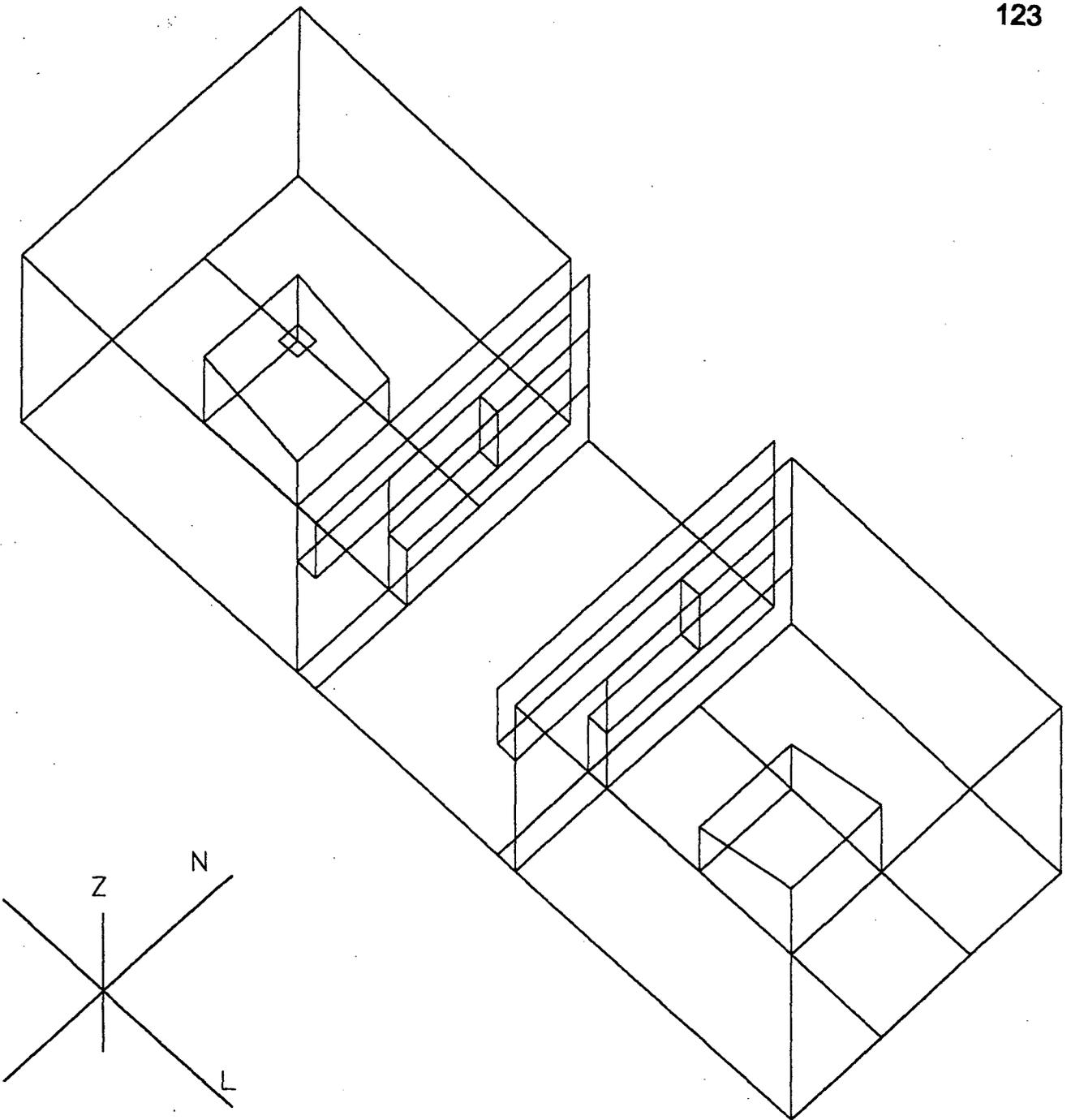


Figura V.34 - Projeto Complex2, com dois ambientes separados por área exterior, constituído de 51 planos e orientado L-0; o foco está situado no ambiente com fachada leste, acima do cubo.

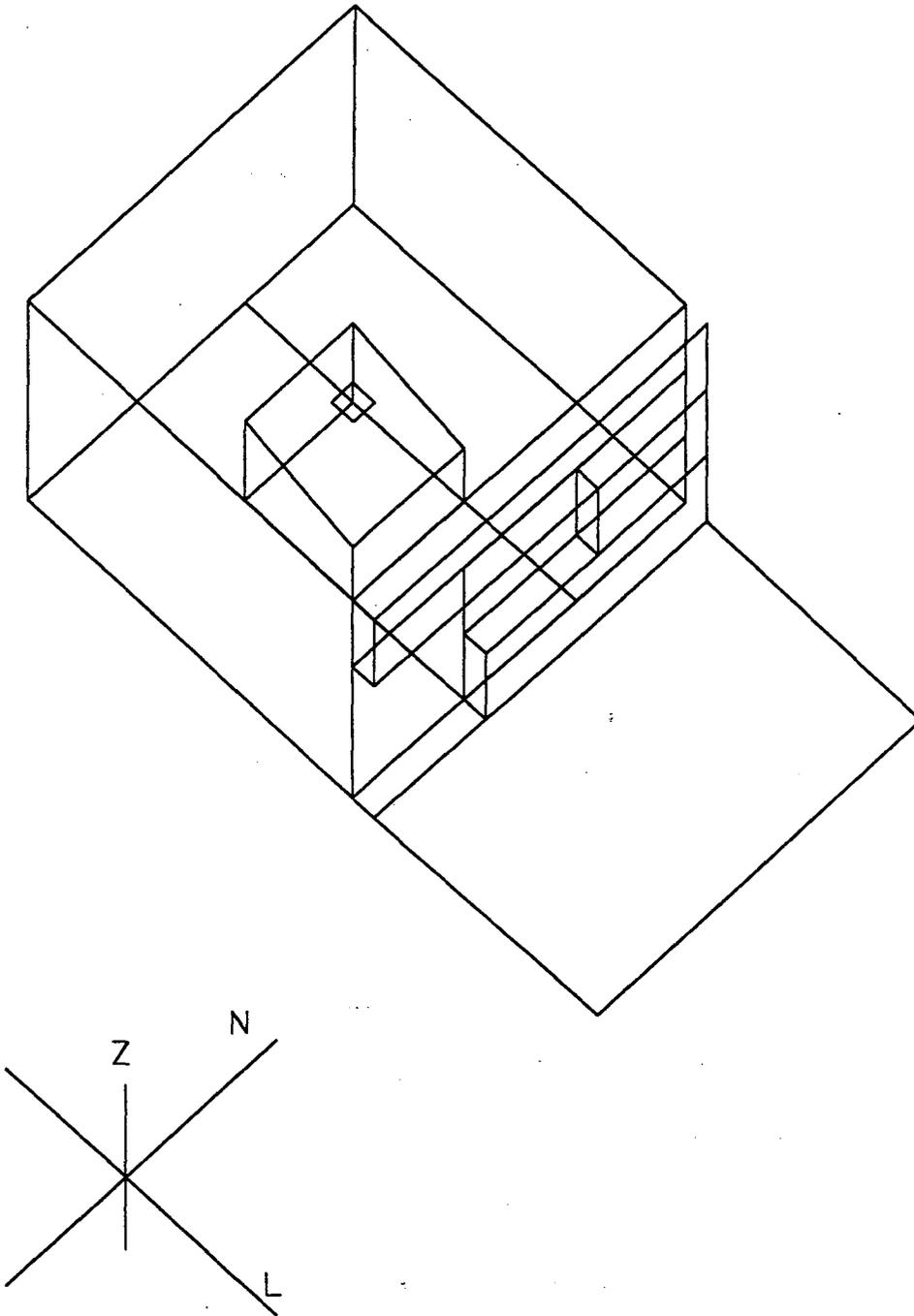


Figura V.35 - Projeto Complex3, equivalente ao projeto Complex2 subtraído o ambiente com face Oeste, restando 26 planos em sua constituição.

V.3.1 -VERIFICAÇÃO DOS VALORES DE ENERGIA

A verificação dos valores de cálculo da energia luminosa incidente da abóbada em diferentes condições foi feita sobre elementos planos unitários equivalentes a plano horizontal e planos verticais em orientações distintas (Norte, Sul, Leste, Oeste). Foram também calculados os valores para cada sub-parcela do projeto, de forma a verificar a coerência com os valores de referência. Utilizamos como valores de referência aqueles obtidos por Scarazzato (1995) adotando procedimento de cálculo próximo do nosso sistema. Este autor utiliza um método simplificado para cálculo das luminâncias da abóbada, baseado em dados pré-tabelados, que fornece o valor para um plano, enquanto nosso modelo utiliza a fórmula de integração dos pontos da abóbada segundo o fracionamento do globo. A fórmula para cálculo da iluminância direta do Sol, entretanto, é a mesma. Era esperada, portanto, alguma diferença nos valores de cálculo, mas o objetivo principal, entretanto, é verificar a consistência geral do procedimento, dado que a rotina de cálculo foi testada anteriormente frente aos métodos descritos no item V.1

Foram calculadas no sistema as condições de iluminação com os dados de Campinas fornecido por Scarazzato (1995), latitude 22° 53' Sul e longitude 47° e 4' Oeste, acrescida da altitude aproximada de 800 m e um fator de turvamento correspondente a áreas urbanas, conforme descrito por Tregenza (1993). Consideramos as datas de 22 de dezembro (Verão) e 24 de setembro (Primavera), considerando céu limpo e céu encoberto, com intervalos de duas horas entre 8h e 16h. Os resultados calculados englobam os valores de iluminância direta do Sol somados à integração da iluminação indireta da abóbada, e estão resumidos nos Quadros V.3 a V.6. Os valores descritos por Scarazzato (1995) estão identificados na linha REF, enquanto os do sistema estão na linha CALC, ambos em Klux.

Quadro V.3 - Quadro comparativo entre os resultados de cálculo e os de referência, em 22 de dezembro para Campinas - SP, com céu limpo

HORAS	PLANOS				
	HORIZ	NORTE	LESTE	SUL	OESTE
8 H REF	62.00	5.3	87.1	27.4	2.6
CALC	62.1	6.9	82.5	26.4	5.5
10 H REF	105.7	5.1	62.8	16.1	2.3
CALC	105.4	8.2	56.6	14.6	6.2
12 H REF	122.9	2.1	9.8	13.9	3.0
CALC	120.5	8.6	8.6	8.6	8.6
14 REF	108.8	4.9	2.2	15.1	58.4
CALC	107.3	8.2	6.3	14.7	54.4
16 REF	67.2	5.4	2.6	26.4	86.8
CALC	67.6	7.1	5.5	25.5	81.9

Quadro V.4 - Quadro comparativo entre os resultados de cálculo e os de referência, em 24 de setembro para Campinas - SP, com céu limpo

HORAS	PLANOS				
	HORIZ	NORTE	LESTE	SUL	OESTE
8 H REF	49.6	21.1	84.7	5.5	2.5
CALC	48.5	23.4	78.4	6.7	5.3
10 H REF	94.3	38.7	61.6	4.0	2.8
CALC	91.7	40.6	58.2	6.7	6.1
12 H REF	110.9	47.4	5.6	2.0	5.4
CALC	107.9	45.8	8.6	6.6	8.6
14 REF	94.5	38.8	2.8	3.9	61.3
CALC	91.8	40.6	6.1	6.7	58.2
16 REF	49.9	21.2	2.5	5.5	84.7
CALC	48.7	23.5	5.3	6.7	78.6

Quadro V.5 - Quadro comparativo entre os resultados de cálculo e os de referência, em 22 de dezembro para Campinas - SP, com céu nublado

HORAS	PLANOS				
	HORIZ	NORTE	LESTE	SUL	OESTE
8 H REF	11.9	4.7	4.7	4.7	4.7
CALC	13.9	5.5	5.5	5.5	5.5
10 H REF	18.6	7.4	7.4	7.4	7.4
CALC	29.5	11.7	11.7	11.7	11.7
12 H REF	21.3	8.5	8.5	8.5	8.5
CALC	36.8	14.6	14.6	14.6	14.6
14 REF	19.1	7.6	7.6	7.6	7.6
CALC	30.8	12.1	12.2	12.2	12.2
16 REF	12.7	5.0	5.0	5.0	5.0
CALC	15.5	6.2	6.2	6.2	6.2

Quadro V.6 - Quadro comparativo entre os resultados de cálculo e os de referência, em 24 de setembro para Campinas - SP, com céu nublado

HORAS	PLANOS				
	HORIZ	NORTE	LESTE	SUL	OESTE
8 H REF	10.2	4.0	4.0	4.0	4.0
CALC	10.1	4.0	4.0	4.0	4.0
10 H REF	17.4	6.9	6.9	6.9	6.9
CALC	25.3	10.0	10.0	10.0	10.0
12 H REF	20.0	8.0	8.0	8.0	8.0
CALC	32.2	12.7	12.7	12.7	12.7
14 REF	17.4	6.9	6.9	6.9	6.9
CALC	25.3	10.0	10.0	10.0	10.0
16 REF	10.2	4.0	4.0	4.0	4.0
CALC	10.2	4.0	4.0	4.0	4.0

Os valores correspondentes às faces iluminadas pelo Sol apresentam resultados bastante aproximados, particularmente nas situações onde a influência da abóbada é proporcionalmente menor (Sol incidindo próximo à normal do plano). Quando consideramos os valores apenas da luminosidade da abóbada (faces não ensolaradas), as diferenças são significativas. Há uma discrepância no dia de verão às 12h, na face Sul, dado que para a latitude de Campinas o cálculo exato aponta uma pequena incidência de Sol na face Sul, enquanto no sistema o valor foi aproximado para a parcela zenital, tratando igualmente as faces Norte e Sul. Nos demais casos, apesar da variação apontada nos valores, nosso modelo demonstrou consistência, principalmente no cálculo da radiação direta do Sol.

Utilizamos o modelo de um ambiente da Figura V.35 para verificar a variação nos valores de cálculo utilizando-se o globo de 30 faixas (5.870 parcelas) e o de 60 (23.404 parcelas). O modelo foi fracionado em 1.180 triângulos e submetido ao cálculo do sistema para a data de 24 de setembro às 10h, em Campinas. Os resultados estão sintetizados para alguns triângulos representativos no Quadro V.7

Como se pode observar nos resultados, a variação do cálculo utilizando-se o globo30 e o globo60 é bastante pequena quando consideramos os triângulos insolados diretamente, aumentando-se a variação conforme diminui a intensidade da iluminância no triângulo. Este resultado era esperado, dado que a incidência direta do Sol não depende da integração das parcelas do globo, como a luz indireta da abóbada, de intensidade muito menor que a luz direta. A questão quanto à luz direta é se uma parcela mudará sua condição de insolada ou não em função da resolução do globo. Das parcelas selecionadas na tabela, que representam uma amostra do comportamento de conjuntos assemelhados no contexto geral do projeto, apenas uma, o triângulo 709, apresentou modificação nesta condição, passando a receber luz direta do Sol quando processado com o globo60. A ordem de grandeza dos erros, avaliada no contexto das parcelas de maior e menor intensidade, demonstram que não há comprometimento da análise, dado que, além de apresentarem erros aceitáveis, as parcelas de pouca iluminância têm peso muito pouco significativo na troca de energia, quando da solução da radiosidade. Provavelmente nunca serão utilizadas e terão o erro inicial atenuado a cada interação.

Quadro V.7 - Comparação dos valores de iluminância processados segundo os globo de 30 faixas (5.487 parc.) e 60 faixas (23.404 parc.)

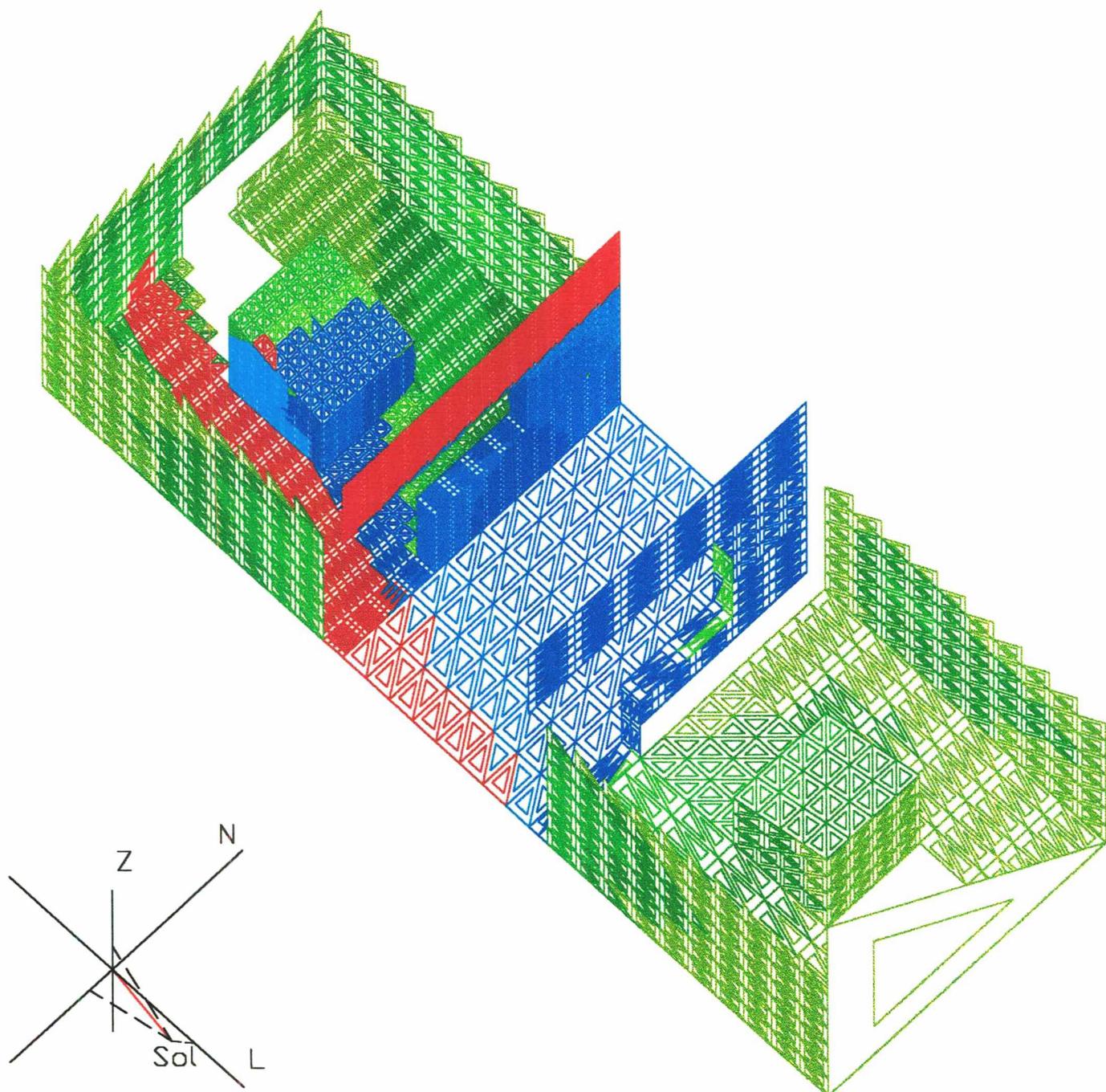
Triângulo	Iluminância		Variação % ((g30/g60)*100) -100
	Globo30	Globo60	
0	57,87765694	58,17782678	-0,52
55	3,88761052	3,87359288	0,36
60	3,16573650	3,15952232	0,20
70	0,62113204	0,61495184	1,00
80	0,63114076	0,61841314	2,06
190	33,77501386	34,32644814	-1,61
200	2,10428937	2,10037364	0,19
240	0,51128613	0,53320107	-4,11
241	0,49934137	0,49218139	1,45
242	0,58301692	0,55041676	5,92
254	34,46768533	35,05111332	-1,66
255	32,71746553	33,26846082	-1,66
470	57,87765694	58,17782678	-0,52
562	3,74114429	3,70582592	0,95
563	2,33331058	2,31829469	0,65
612	3,96271405	3,94855157	0,36
614	4,15293905	4,14286349	0,24
620	0,10846649	0,10102888	7,36
704	78,38585443	78,34836457	0,05
706	78,17619295	78,10756134	0,09
708	77,60280711	77,58174589	0,03
709	3,64282704	76,65777752	-95,25
710	77,03071259	76,91104770	0,16
711	82,43158375	82,34690328	0,10
712	81,02596720	80,91613378	0,14
718	4,75113382	4,63531002	2,50
719	4,45122747	4,39727062	1,23
740	87,55017195	87,47741041	0,08
742	86,79715091	86,76713064	0,03
770	90,05317159	89,97523798	0,09
780	89,46541232	89,42359353	0,05
930	1,37223645	1,37883755	-0,48
931	1,35975128	1,35551589	0,31
932	1,44800494	1,44599464	0,14
933	1,40681403	1,40635493	0,03
934	1,50125424	1,48800664	0,89
935	1,47134585	1,45480205	1,14
936	84,67061675	84,59399451	0,09
937	81,94640161	81,87369748	0,09
938	84,34301119	84,28491892	0,07
939	84,63080618	84,58068190	0,06
940	85,93900384	85,84595244	0,11
960	57,87765694	58,17782678	-0,52

V.3.2 - VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA

A verificação da coerência na distribuição de energia foi realizada sobre os dois modelos arquitetônicos citados, sendo que o modelo com dois ambientes, **Complex2**, foi fracionado em 5.489 triângulos, e o modelo de um ambiente, **Complex3**, foi fracionado em 4.162 triângulos. Estes dois projetos foram submetidos às condições de insolação de um dia de céu claro e ar seco, na latitude de 27° 30' Sul, em Florianópolis, em várias datas diferentes, em vários horários, comparando-se a circunstância de iluminação inicial em cada um dos modelos, bem como a coerência representada pela obstrução do módulo retirado do primeiro para o segundo modelo. Também tomamos o modelo de dois ambientes e giramos até uma orientação Norte-Sul, que chamaremos **Complex4**, submetendo-o ao processamento nas mesmas datas e horários, com as mesmas observações.

A importância foi definida com raios que envolvem todo o primeiro módulo no primeiro raio e até uma parte do interior do segundo módulo no outro raio. Resultaram os seis níveis de importância descrito no cap. IV. Foram criadas 15 faixas de valores para os resultados, em três categorias: verde escuro a verde claro para valores entre 0 e 2 klux; azul escuro a claro para valores entre 2 e 50 klux; vermelho a amarelo para valores entre 50 e mais de 100 klux. A representação dos resultados nos modelos não é um esboço de visualização de imagem, mas um gráfico tri-dimensional apostado ao projeto. Assim, a representação que se observa em faces externas do módulo é na verdade o que ocorre na face interna, com exceção das faces moldadas como exterior. Para evitar dubiedade entre arestas de triângulos com valores diferentes que se superpõem, foi acrescentado um triângulo menor, proporcional, ao centro de cada triângulo do projeto. Como ilustração selecionamos seqüências obtidas em 22 de dezembro para Complex2 e Complex3, e 24 de setembro para Complex4, na latitude 27° 30' Sul, em Florianópolis, nos horários de 7h, 9h, 11h, 12h, 13h, 15h e 17h, sob condições de céu limpo e ar seco, utilizando-se o globo fracionado em 60 faixas (23.404 parcelas). Estão representados nas Figuras V.36 a V.56. Para melhor observação foram excluídos da representação os triângulos da lista de elementos que não pegam o Sol nem vêem o céu, o que correspondeu aos tetos, ao terço superior das paredes internas, às paredes internas que contêm as portas e janelas, e a algumas áreas obstruídas pelo cubo ou por obstrução externa. Para verificar a aplicação do conceito de importância, nas Figuras V.57 a V.59 estão representadas apenas algumas situações de importância definida.

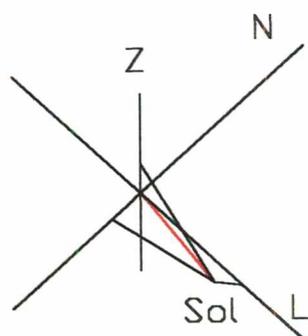
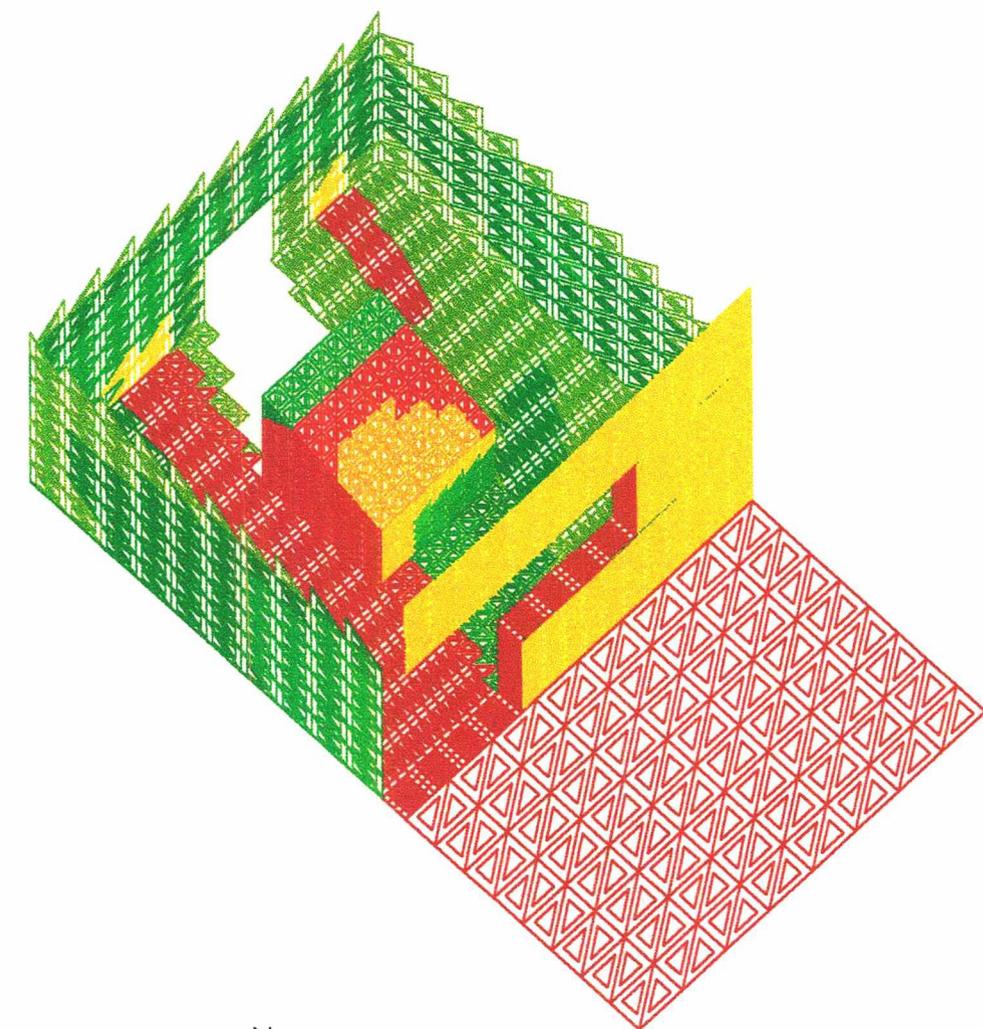
Como se pode observar do resultado, a coerência de distribuição de energia é bastante grande em todas as situações estudadas, tratando unificadamente os módulos e o exterior. No entanto, a aplicação do conceito de importância não atingiu pleno êxito, dado que não estão sendo representadas todas as parcelas que teriam o valor da importância de acordo com os níveis que foram representados no gráfico (como parcelas do peitoril da janela), estando representadas algumas que não deveriam, como as parcelas do batente da porta adjacente à janela. Embora no contexto geral apresentem aproximação com o que se esperava, é necessária revisão e aprimoramento do conceito. O erro, provavelmente no algoritmo de seleção dos graus de importância para inclusão nas listas, não interferiu na distribuição de energia, mas apenas na da confecção das listas de prioridades. Um resultado evidente e importante é a clara definição de insolação e sombreamento, provocado pelas obstruções, que é construída pelo modelo considerando o projeto de forma integrada, sem que seja feita nenhuma distinção entre o que é um espaço interior ou exterior, nem diferencia os níveis de importância na distribuição da energia, mas apenas na confecção das listas de prioridade e importância, para facilitar a visualização das diferentes circunstâncias definidas por elas, bem como para utilizar no processamento posterior do sistema.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

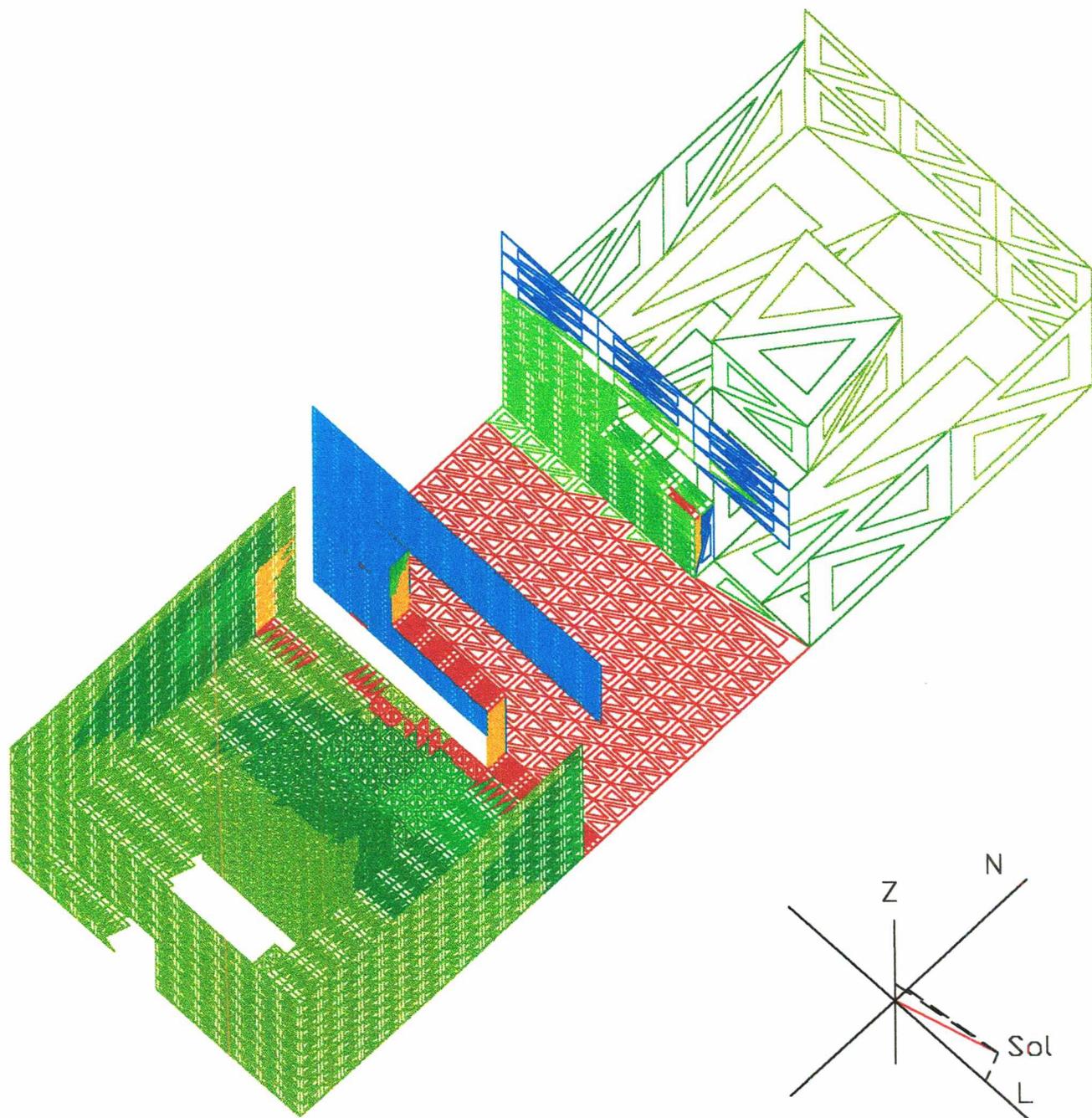
Figura V.36 - Projeto Complex2 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 7:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

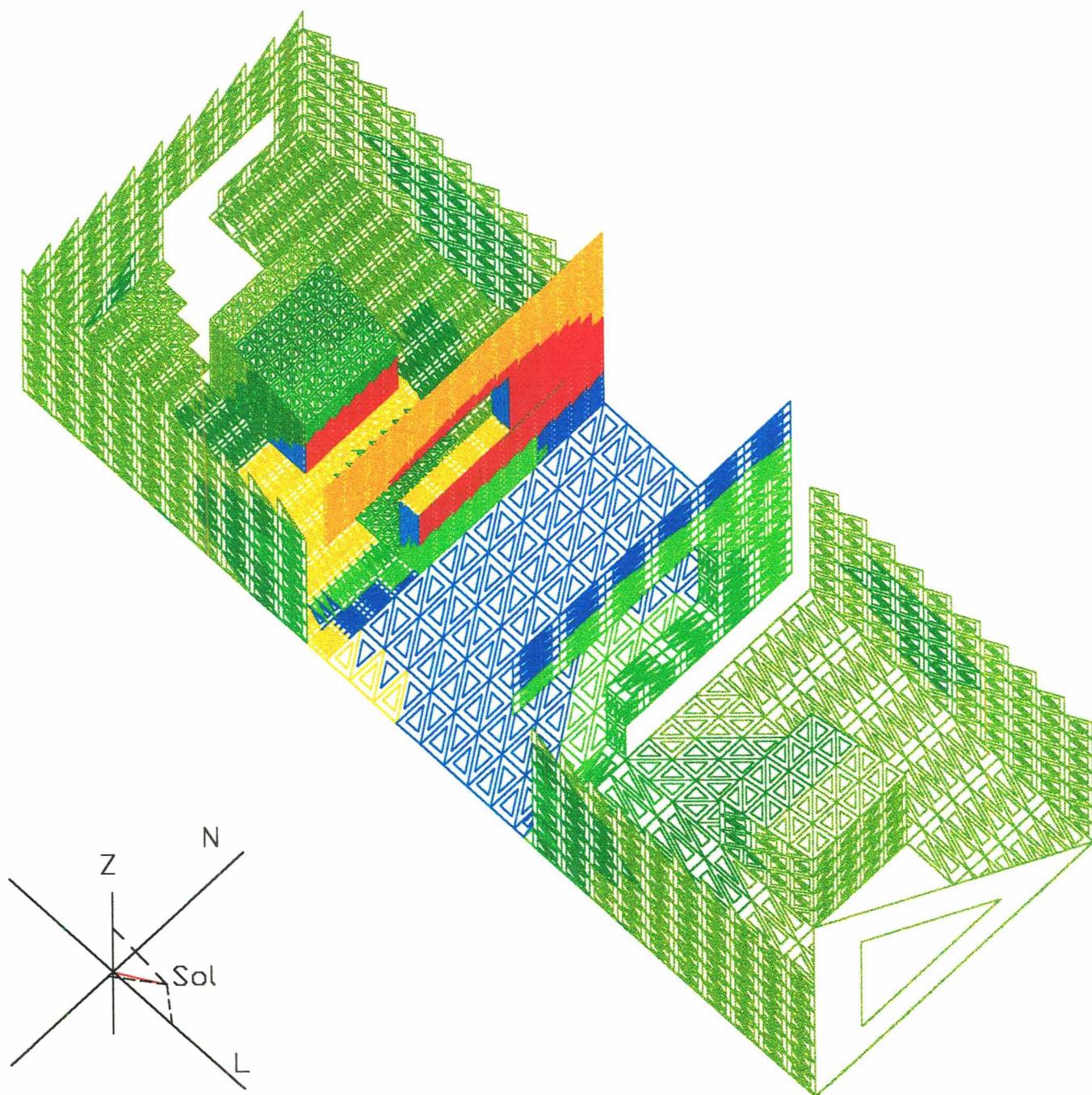
Figura V.37 - Projeto Complex3 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 7:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

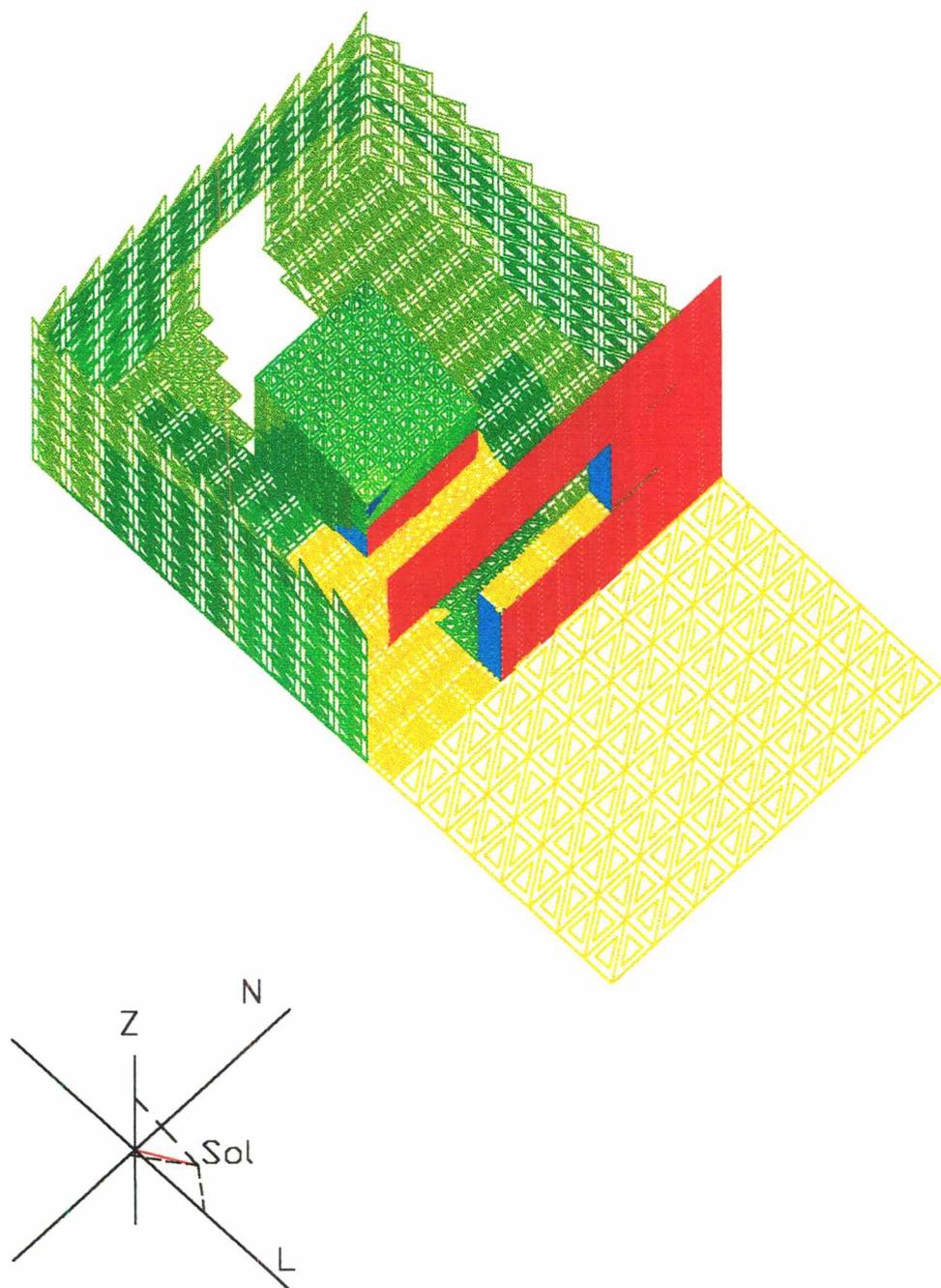
Figura V.38 - Projeto Complex4 com incidência de luz natural calculada em 24 de setembro, às 7:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

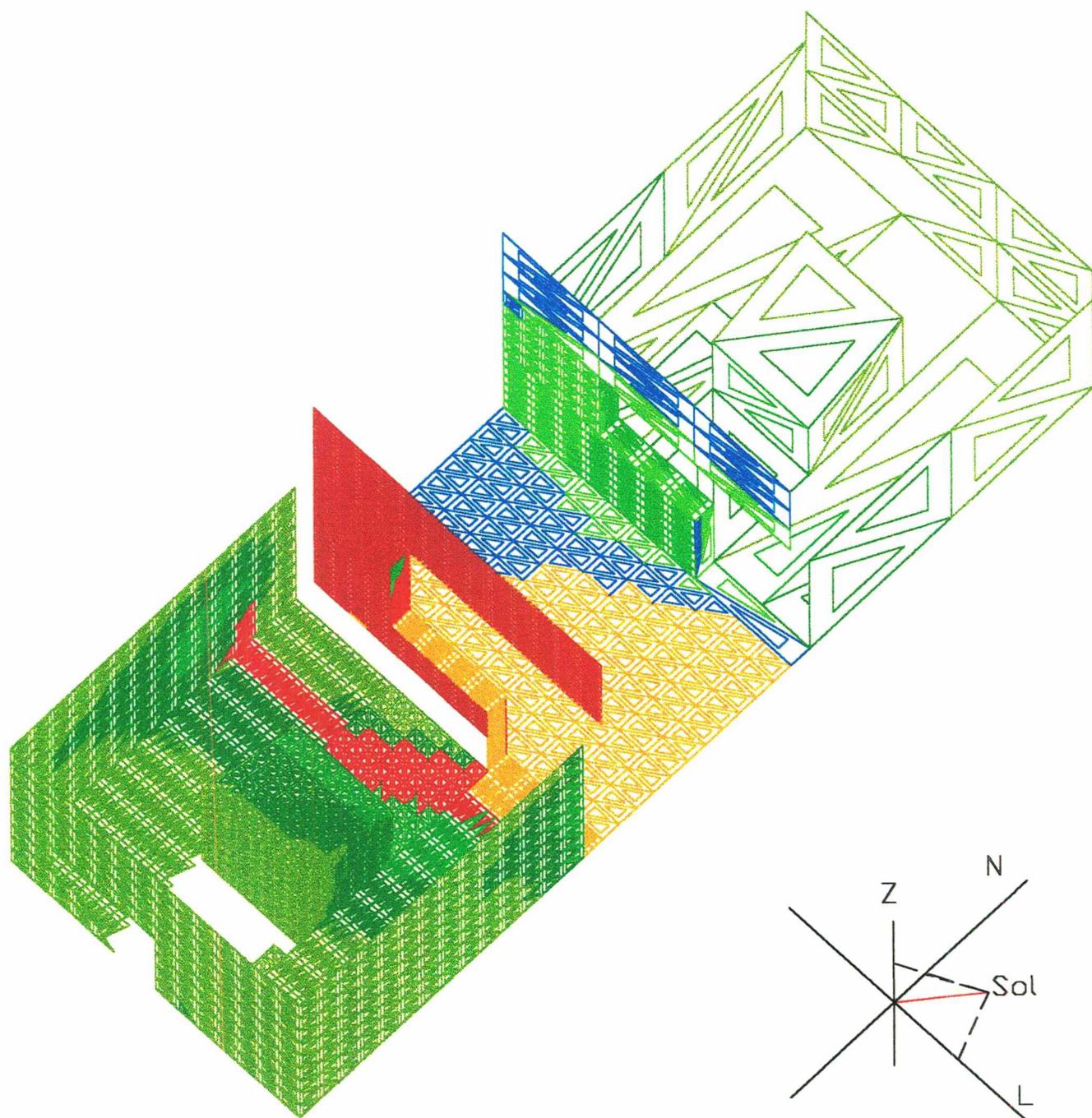
Figura V.39 - Projeto Complex2 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 9:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

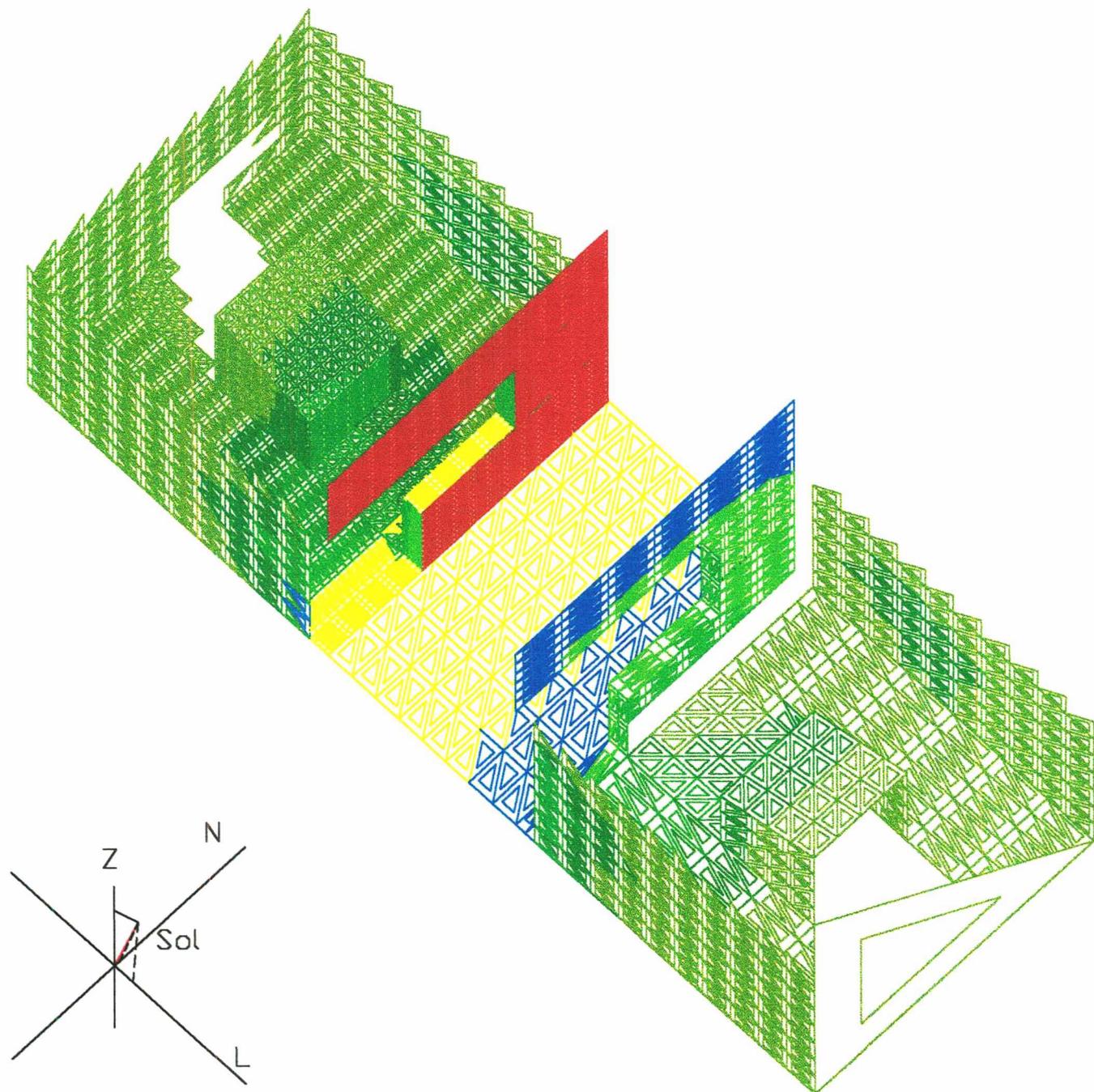
Figura V.40 - Projeto Complex3 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 9:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

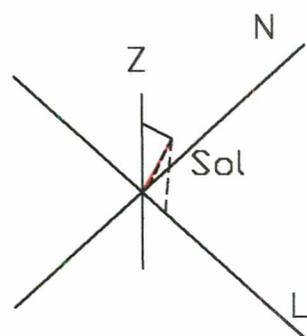
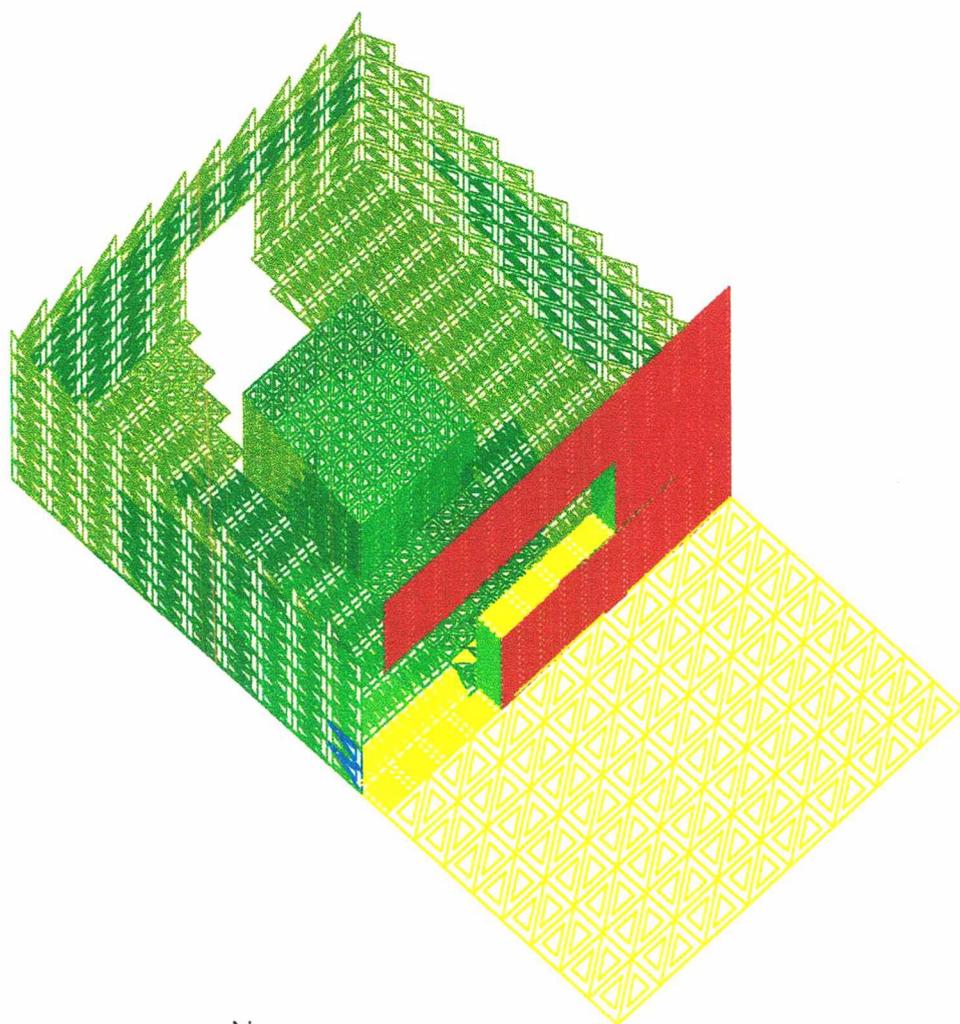
Figura V.41 - Projeto Complex4 com incidência de luz natural calculada em 24 de setembro, às 9:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

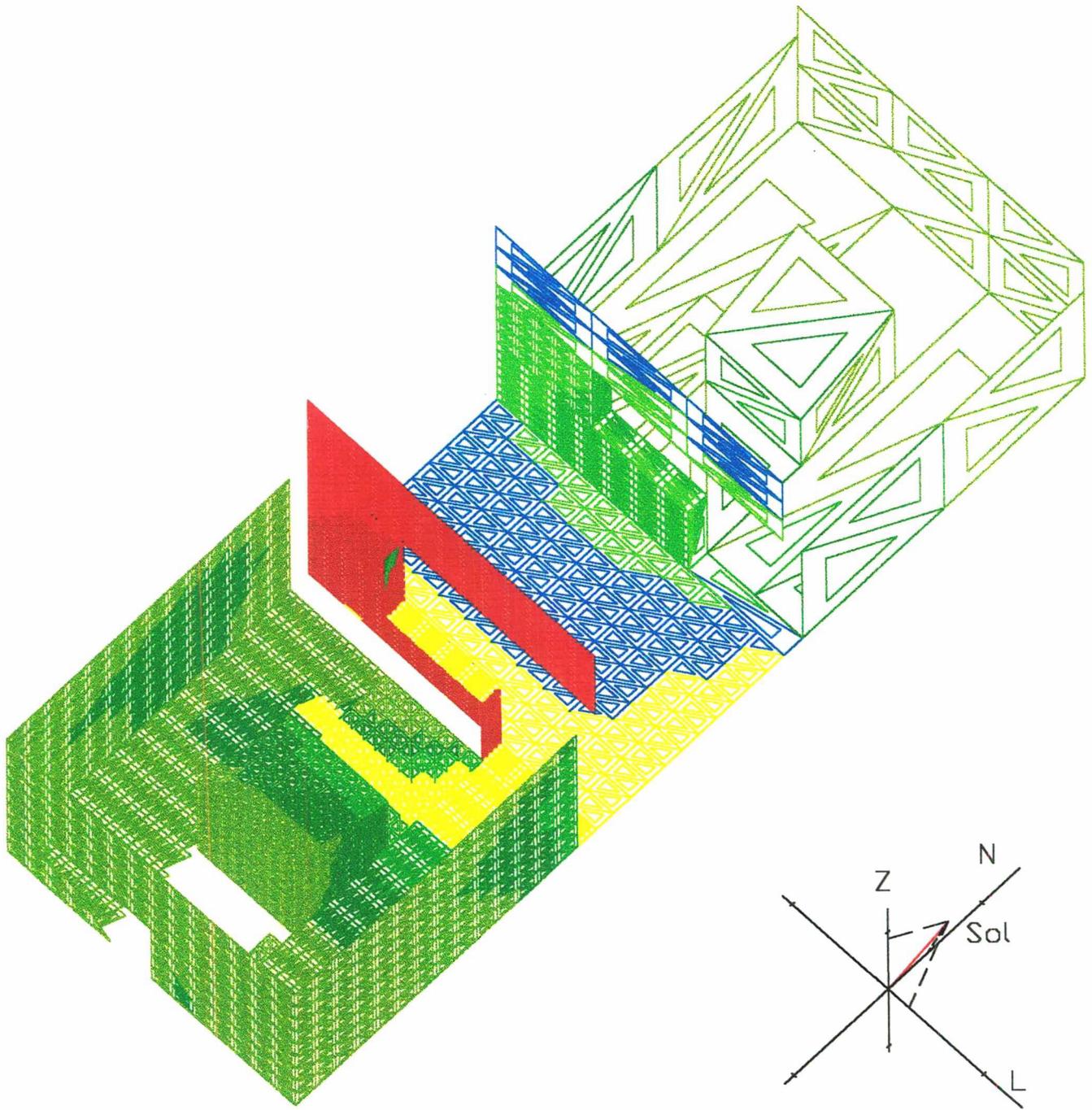
Figura V.42 - Projeto Complex2 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 11:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

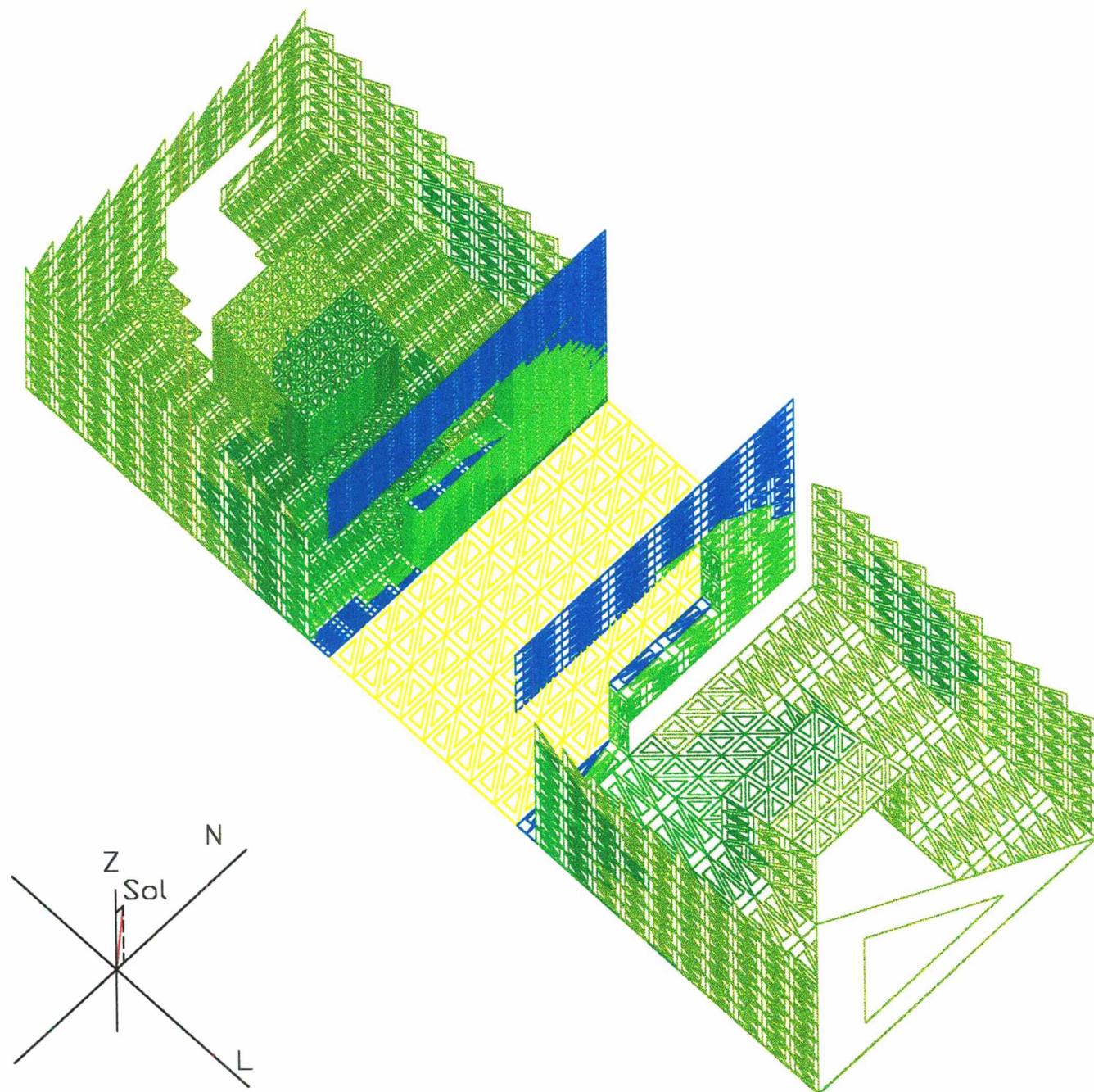
Figura V.43 - Projeto Complex3 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 11:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

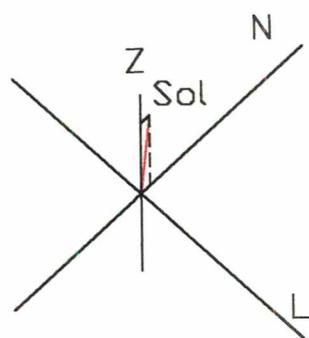
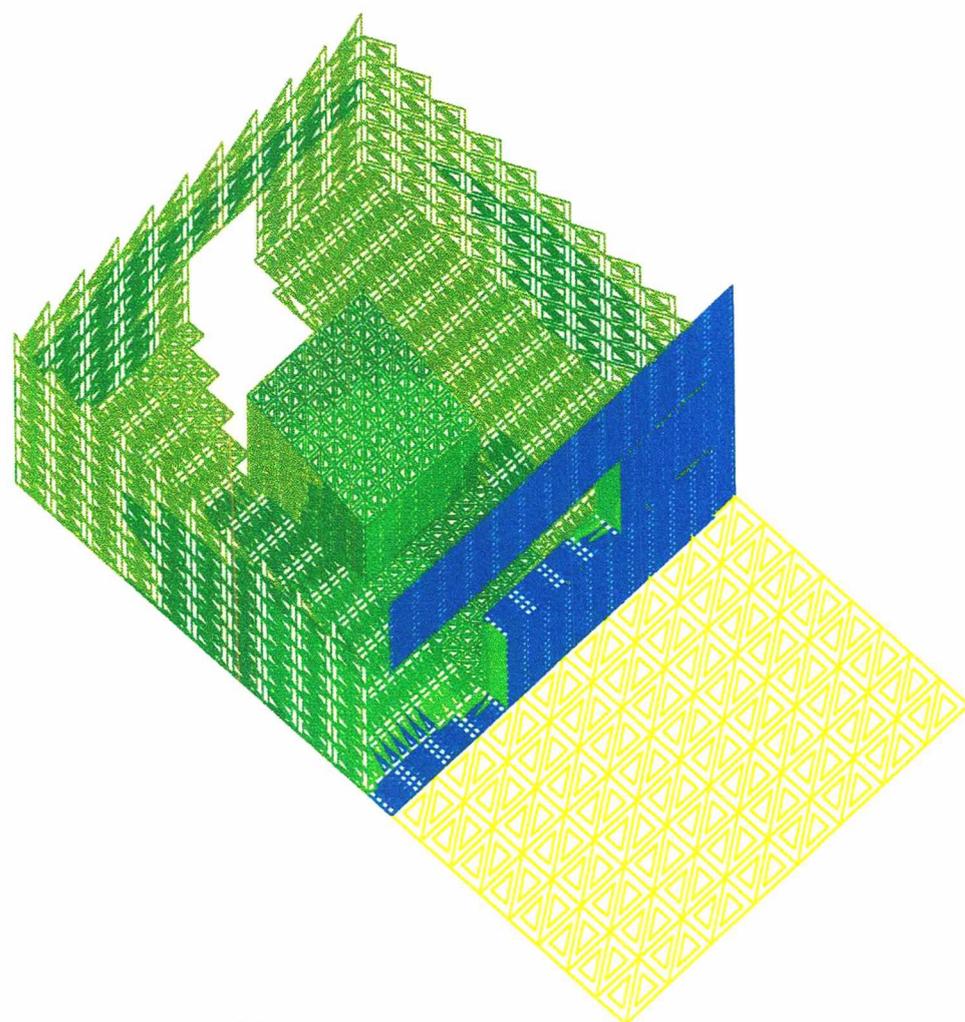
Figura V.44 - Projeto Complex4 com incidência de luz natural calculada em 24 de setembro, às 11:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

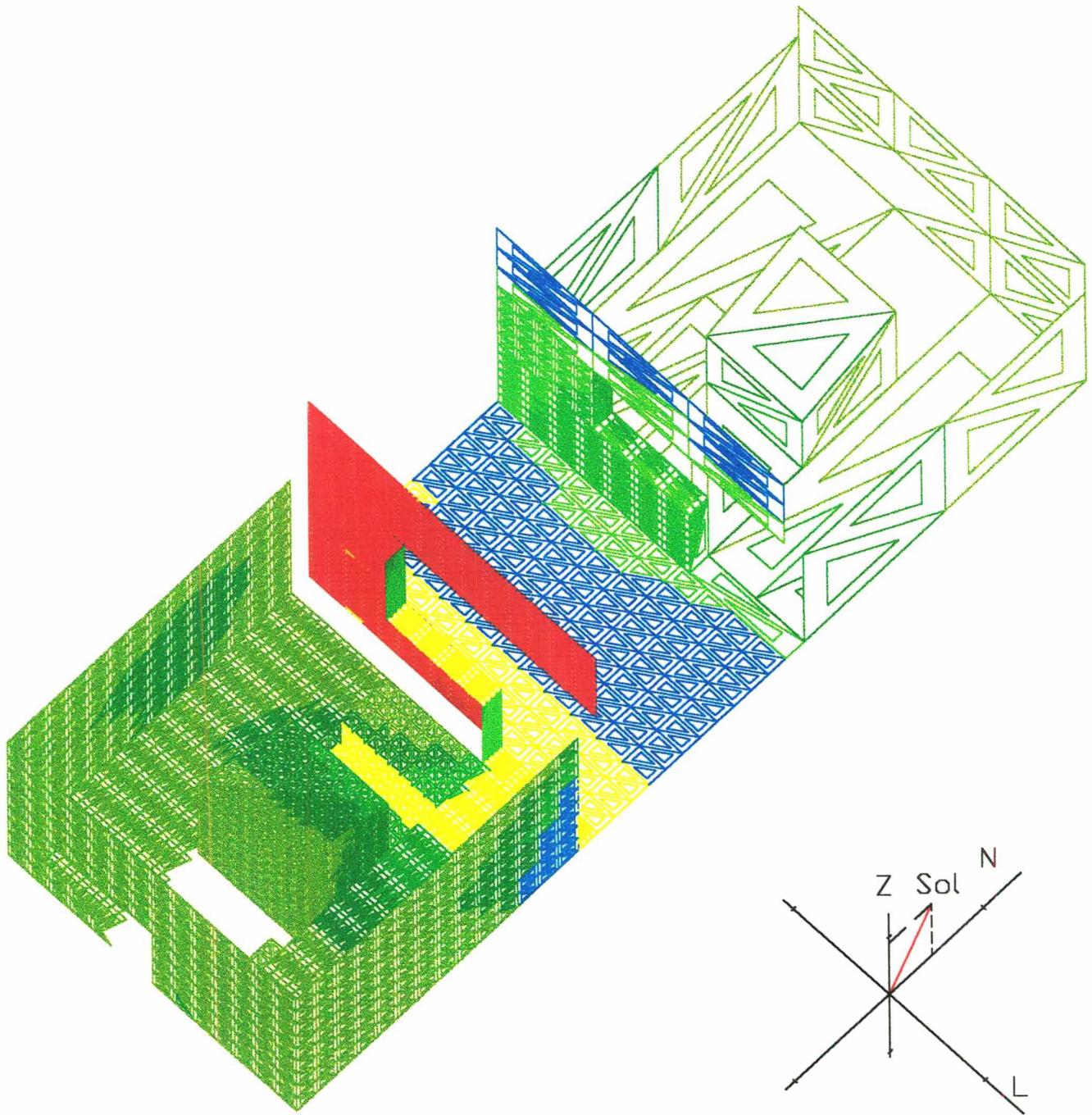
Figura V.45 - Projeto Complex2 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 12:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

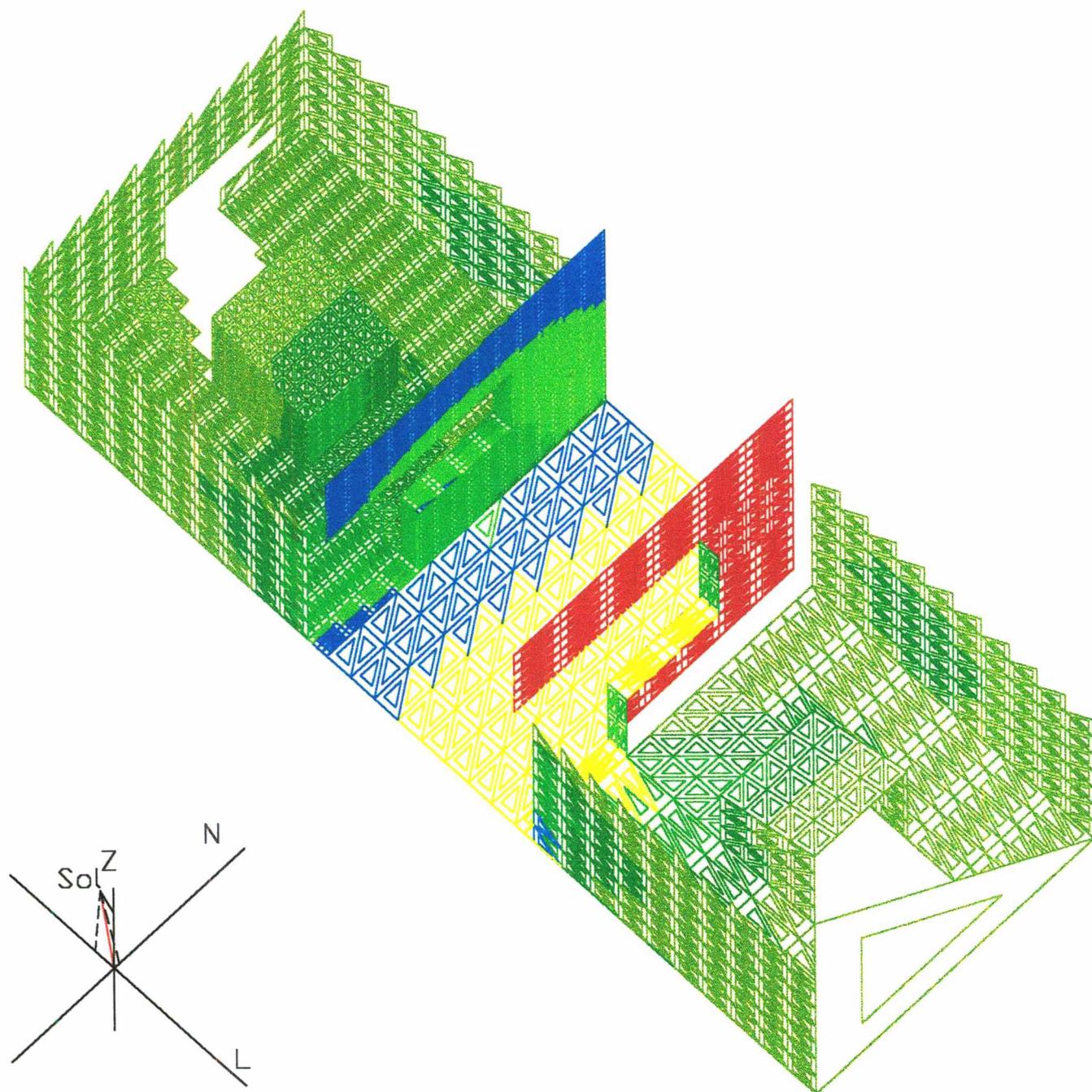
Figura V.46 - Projeto Complex3 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 12:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

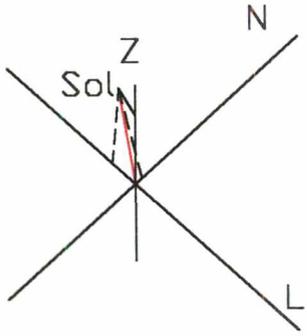
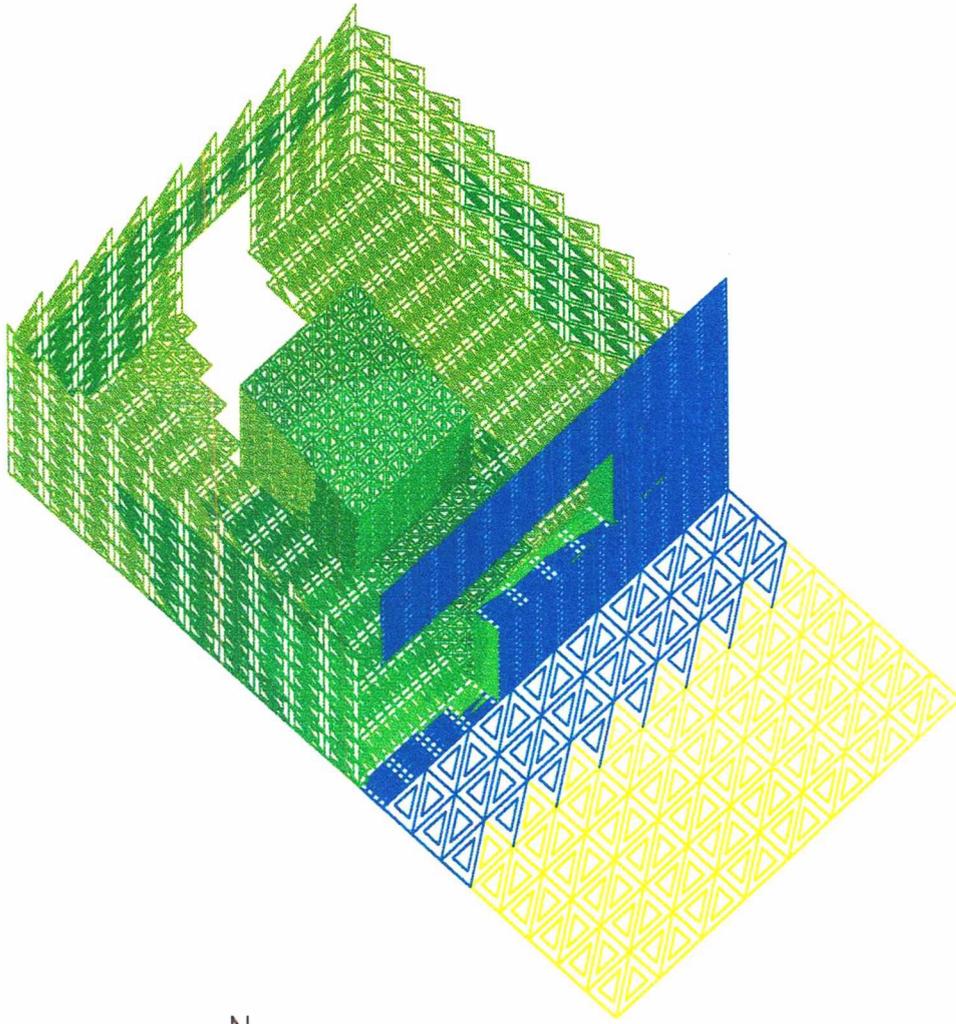
Figura V.47 - Projeto Complex4 com incidência de luz natural calculada em 24 de setembro, às 12:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

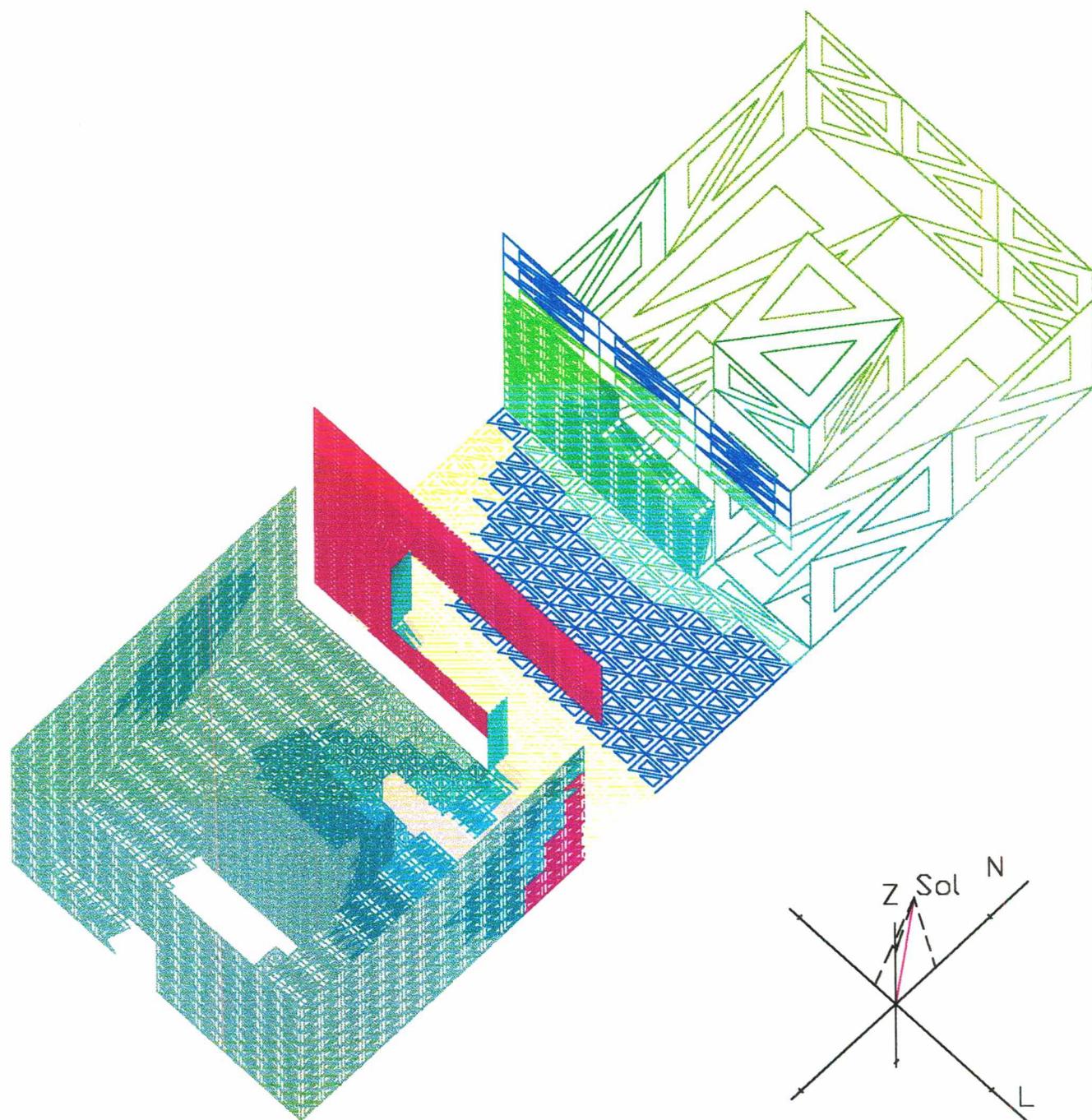
Figura V.48 - Projeto Complex2 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 13:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

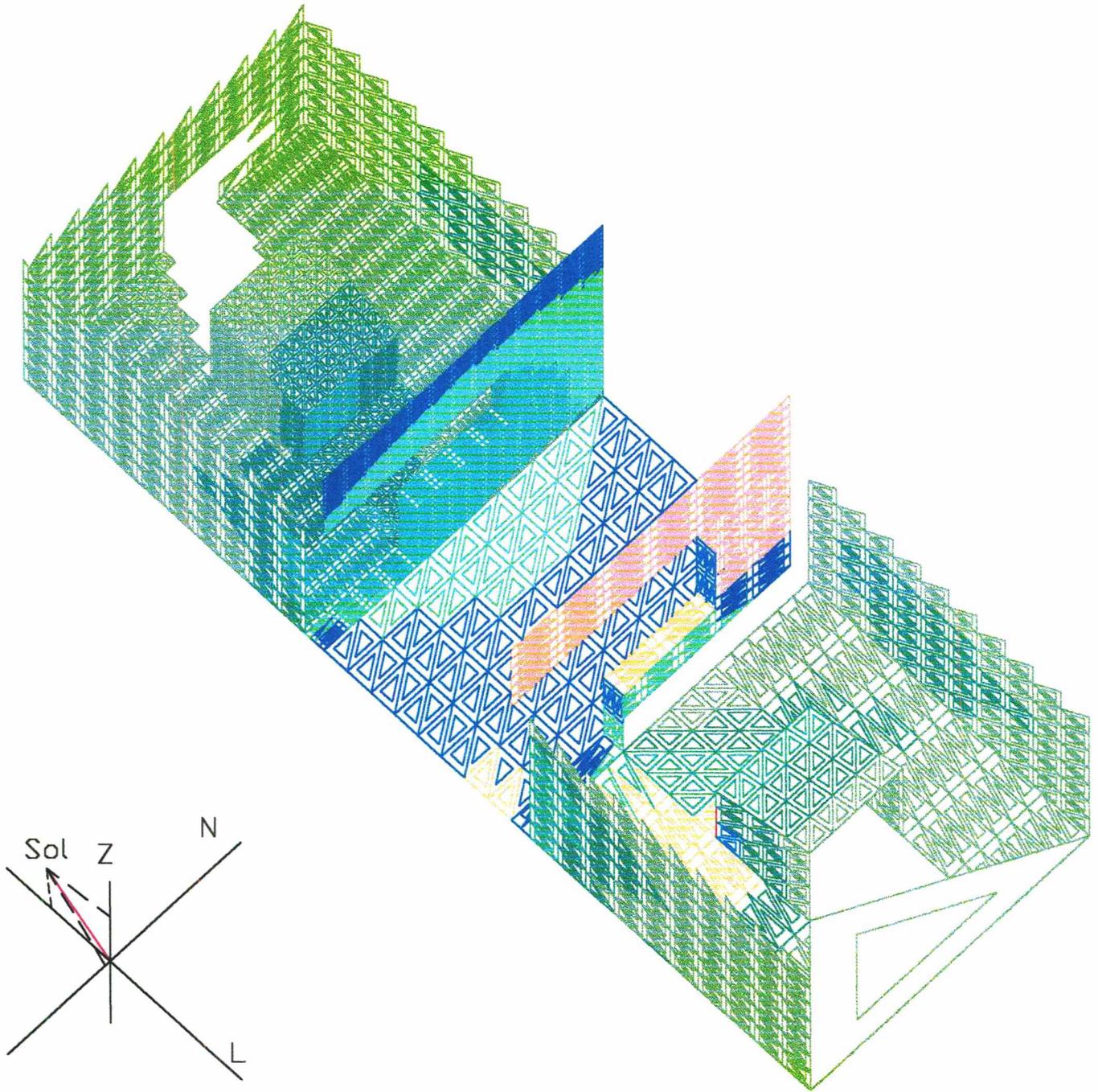
Figura V.49 - Projeto Complex3 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 13:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

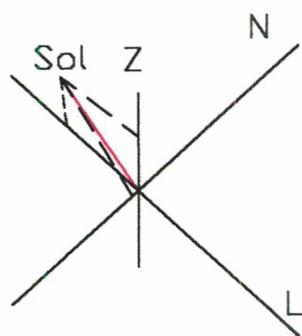
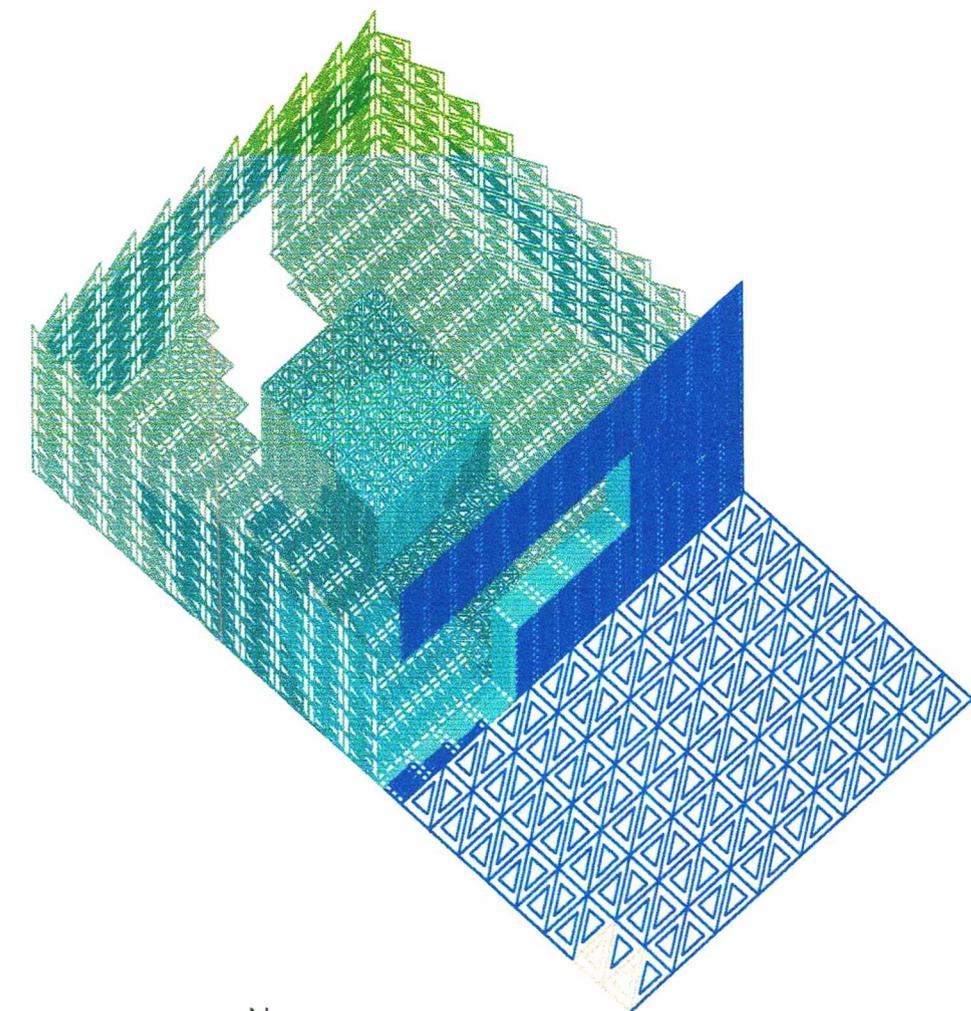
Figura V.50 - Projeto Complex4 com incidência de luz natural calculada em 24 de setembro, às 13:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

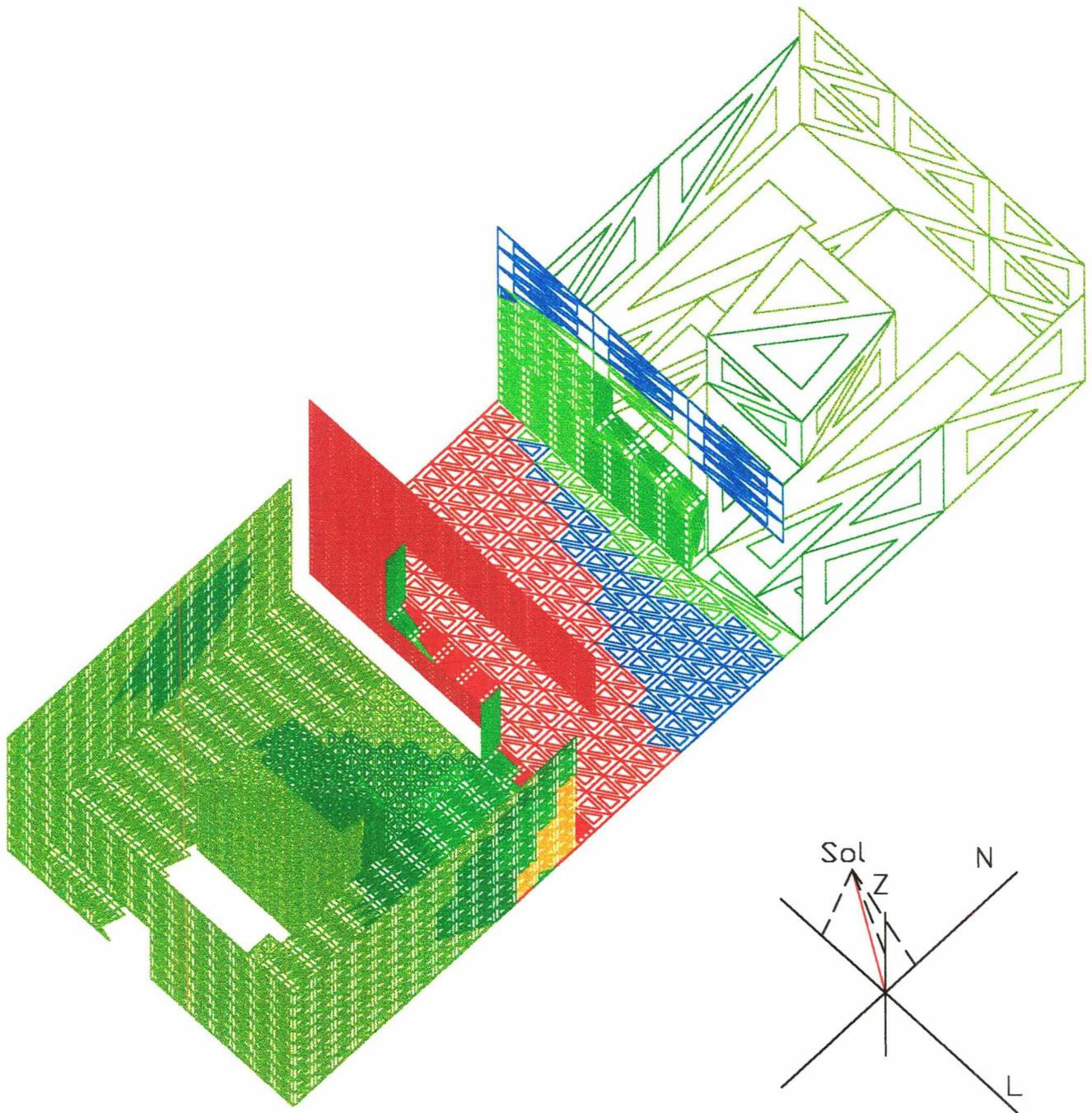
Figura V.51 - Projeto Complex2 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 15:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

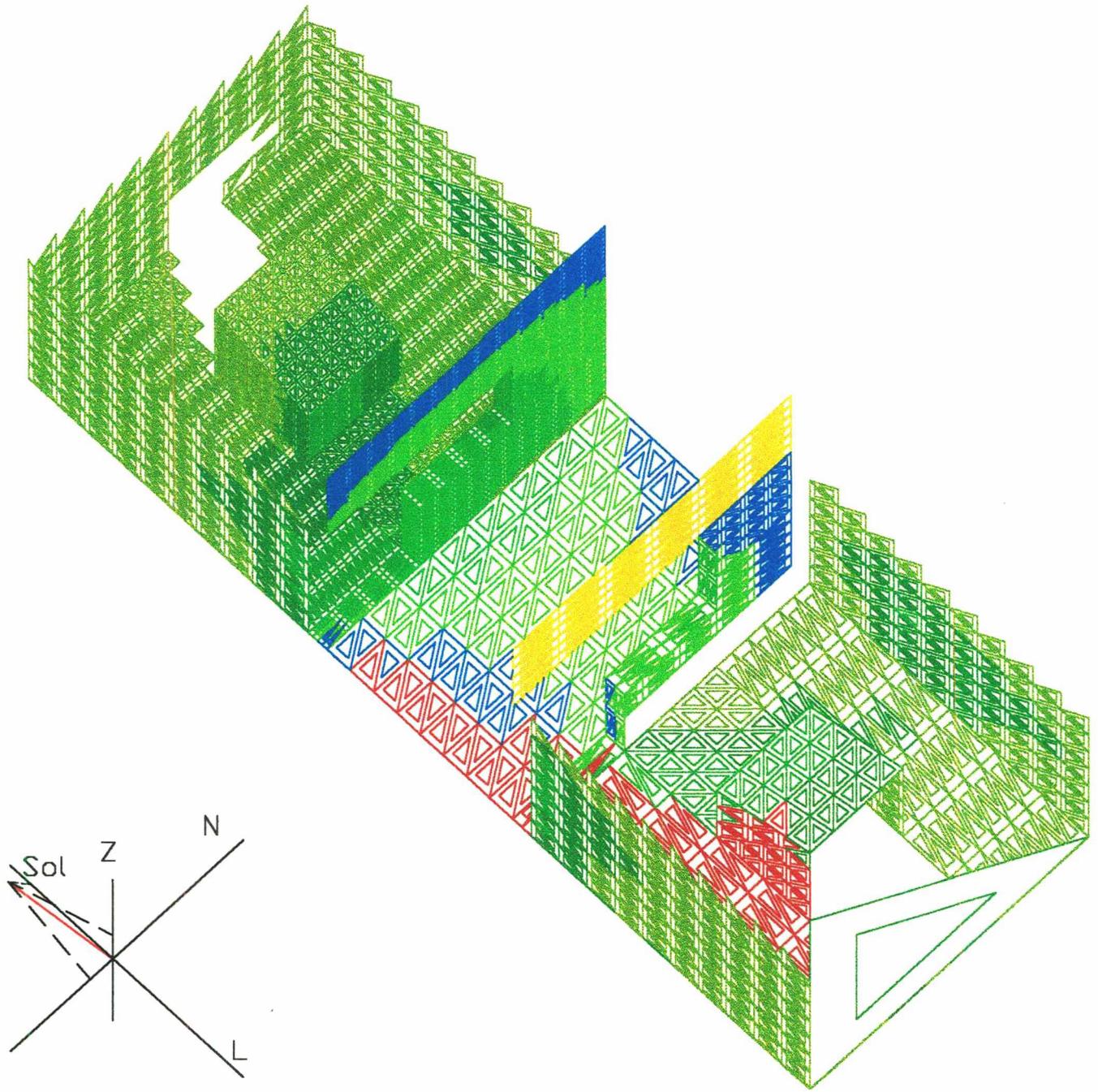
Figura V.52 - Projeto Complex3 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 15:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

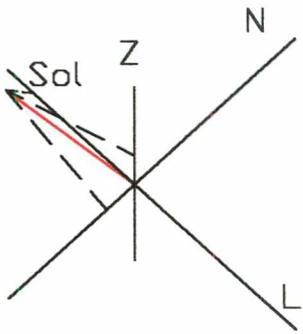
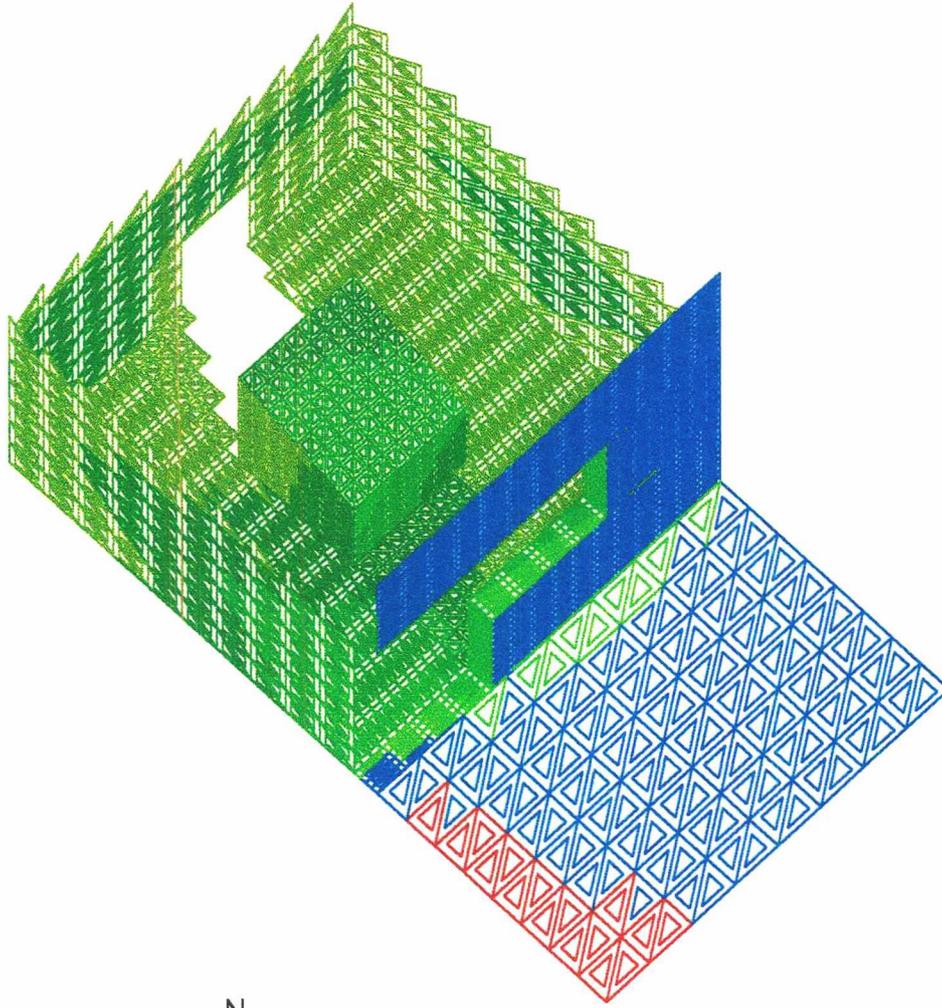
Figura V.53 - Projeto Complex4 com incidência de luz natural calculada em 24 de setembro, às 15:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

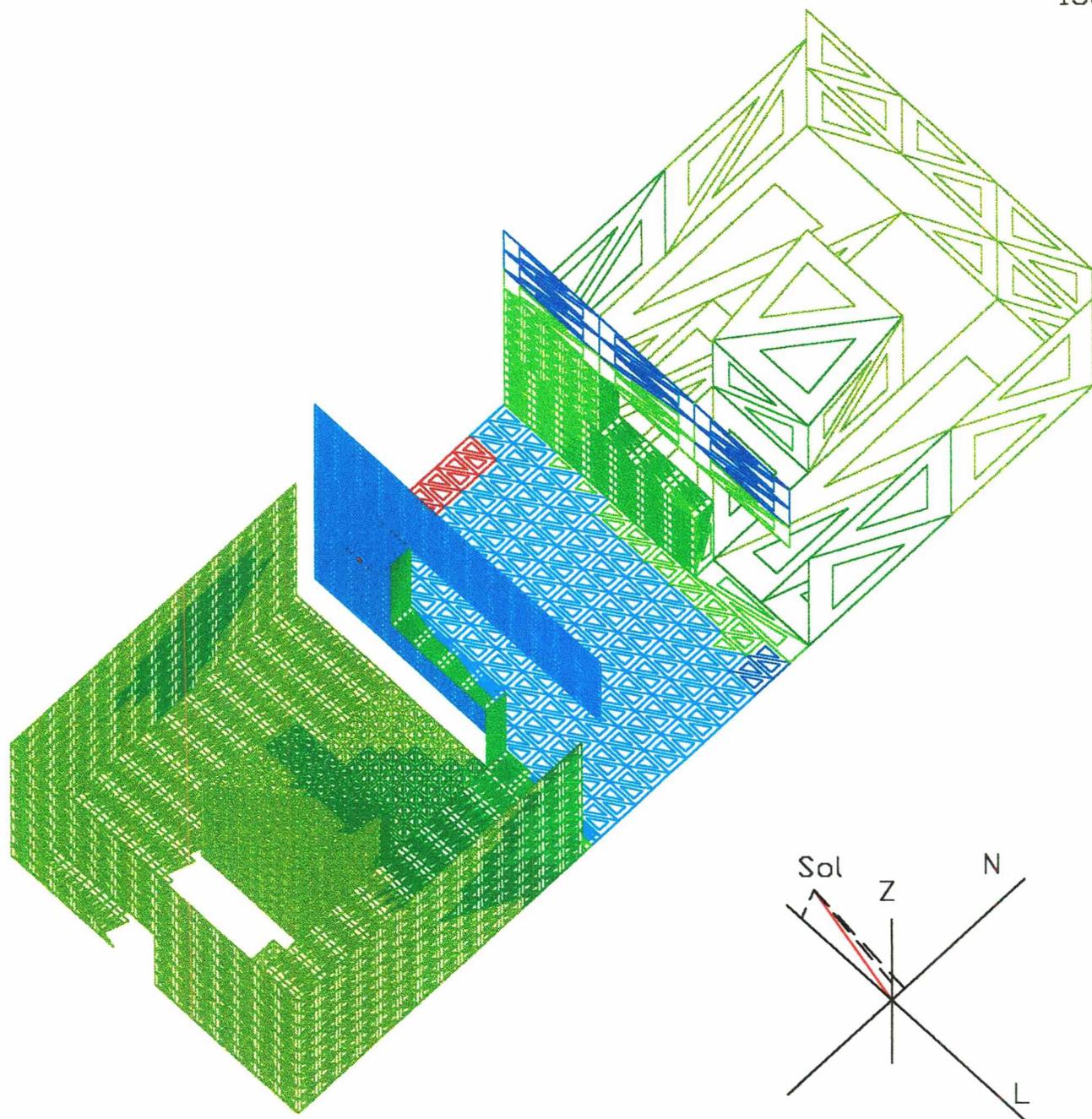
Figura V.54 - Projeto Complex2 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 17:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

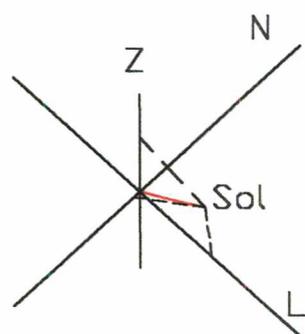
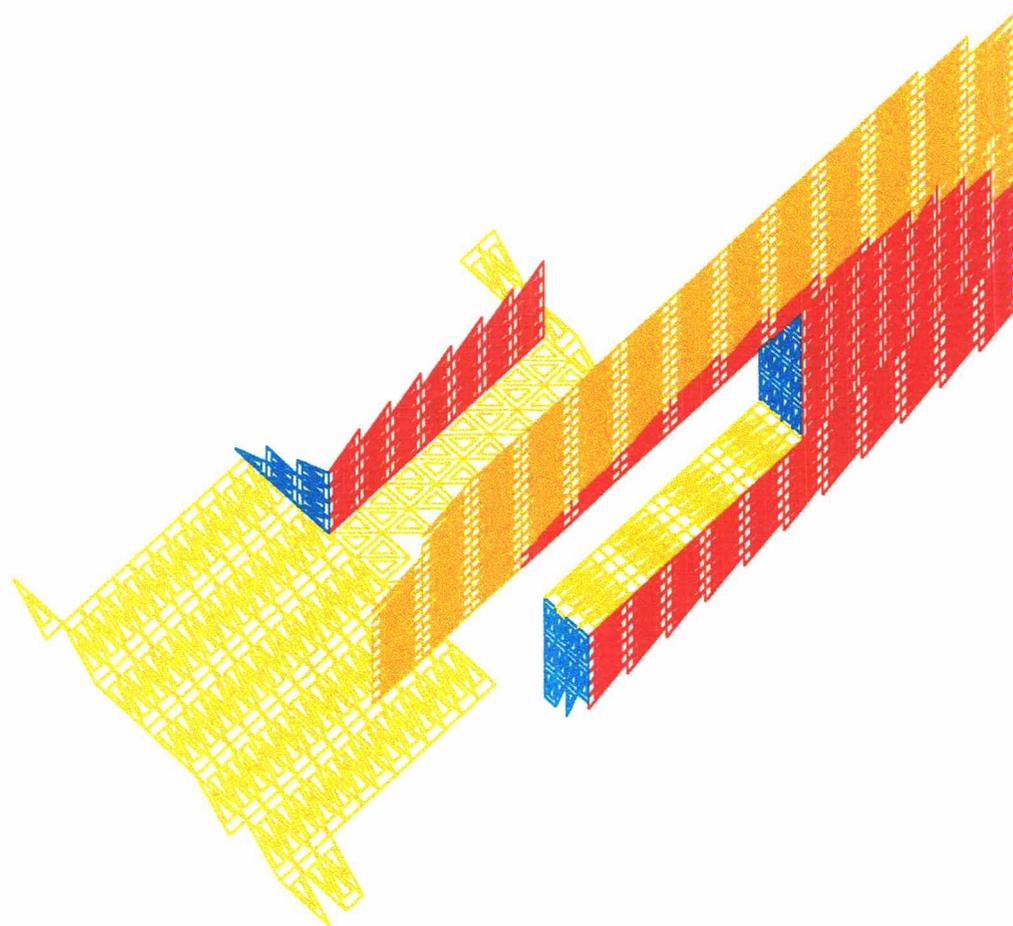
Figura V.55 - Projeto Complex3 com incidência de luz natural calculada em 22 de dezembro, às 17:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

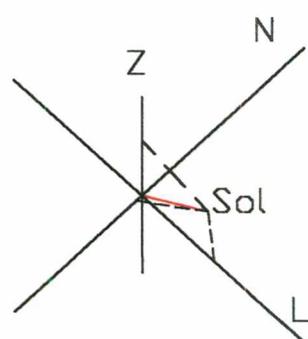
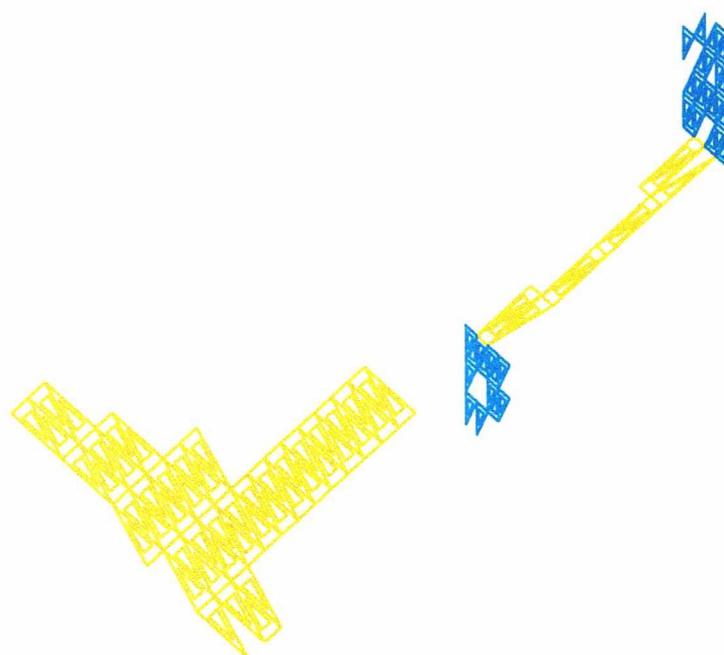
Figura V.56 - Projeto Complex4 com incidência de luz natural calculada em 24 de setembro, às 17:00 hs, em Florianópolis - SC.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

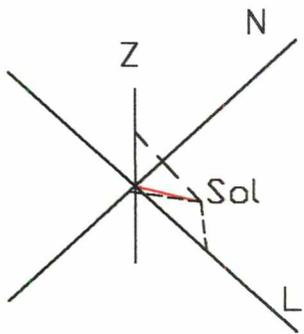
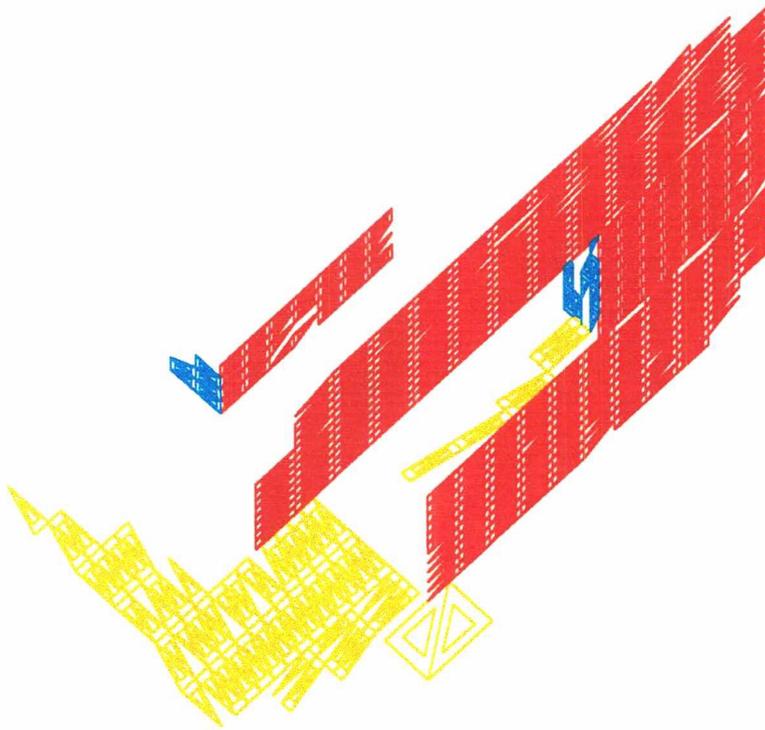
Figura V.57 - Projeto Complex2 em 22 de dezembro, às 9:00 hs, consideradas apenas as parcelas que recebem Sol, estão próximas do foco, estando ou não visível deste (importância 0 e 1). Aparentemente há incorreções.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

Figura V.58 - Projeto Complex2 em 22 de dezembro, às 9:00 hs, consideradas apenas as parcelas que recebem Sol, estão próximas do foco, estando visível deste (importância 0). Aqui também são observadas incorreções por inclusão e por exclusão.



Valores de Iluminância, em Klux.

■ 0 a 0,2	■ 2,0 a 5,0	■ 20,0 a 50,0
■ 0,2 a 0,5	■ 5,0 a 7,5	■ 50,0 a 75,0
■ 0,5 a 1,0	■ 7,5 a 10,0	■ 75,0 a 87,5
■ 1,0 a 1,5	■ 10,0 a 15,0	■ 87,5 a 100,0
■ 1,5 a 2,0	■ 15,0 a 20,0	■ mais que 100,0

Figura V.59 - Projeto Complex3 em 22 de dezembro, às 9:00 hs, selecionadas apenas as parcelas com Sol, próximas e visíveis (importância 0). São observadas incorreções.

V.3.3 - VERIFICAÇÃO DO TEMPO DE PROCESSAMENTO

Para verificar o tempo de processamento foram utilizados os dois projetos complexos do tópico anterior, com diferentes graus de fracionamento. O modelo **Complex2** foi fracionado em 674, em 1.351, em 2.714 e em 5.489 parcelas. O projeto **Complex3** foi fracionado em 569, em 1.180, em 2.437 e em 4.162 parcelas. No processamento foram computados separadamente os tempos destinados ao refinamento do grau de importância das parcelas do projeto; ao cálculo da configuração de visibilidade dos planos geradores e definição das direções visíveis da abóbada para cada parcela do projeto; e ao cálculo da iluminância em cada uma das parcelas e à construção das listas de prioridades. O tempo total considerando um processamento engloba a soma dos três tempos parciais. No entanto realizadas as duas primeiras etapas do cálculo, a etapa de cálculo das iluminâncias pode ser repetida para diferentes condições da abóbada. No nosso exemplo foram consideradas 7 condições diferentes sucessivas da abóbada (7 horários distintos em um dia; ou um horário em 7 dias distintos, p. ex.). Cada um dos modelos, nos diversos graus de fracionamento, foram processados utilizando-se um globo de 5.870 parcelas (30 faixas) e um de 23.404 parcelas (60 faixas). Este procedimento foi realizado em duas máquinas de velocidades distintas: um Pentium 100 Mhz com 96 Mb RAM e um Pentium 330 Mhz com 128 Mb RAM. Os resultados estão resumidos no Quadro V.8 (Pentium 100) e V.9 (Pentium 330).

Quadro V.8 - Dados de tempo de processamento, em minutos, obtidos em máquina Pentium 100 Mhz

Projeto: CPX2		Globo: 5.870 parcelas (Glb30)			
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
674	0,07278	1,62141	0,02908	1,72327	0,27111
1.351	0,14855	3,26828	0,06099	3,47782	0,54911
2.714	0,30098	6,76250	0,13371	7,19719	1,14278
5.489	0,61708	12,94438	0,27786	13,83932	2,21521

Projeto: CPX2		Globo: 23.404 parcelas (Glb60)			
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
674	0,23359	4,12892	0,12019	4,48270	0,74341
1.351	0,47678	8,32268	0,22523	9,02469	1,48230
2.714	0,96782	16,05476	0,51528	17,53786	2,94708
5.489	1,98426	30,73107	0,95035	33,66568	5,62397

Projeto: CPX3		Globo: 5.870 parcelas (Glb30)			
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
569	0,06020	0,93522	0,02778	1,02320	0,16998
1.180	0,12910	1,93451	0,06248	2,12609	0,35728
2.437	0,26735	4,06913	0,13938	4,47586	0,75888
4.162	0,47265	6,37140	0,26918	7,11323	1,24690

Projeto: CPX3		Globo: 23.404 parcelas (Glb60)			
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
569	0,19340	2,38751	0,11042	2,69133	0,62660
1.180	0,41388	4,93858	0,24835	5,60081	1,31884
2.437	0,83960	10,41008	0,53938	11,78906	2,78932
4.162	1,48413	16,30000	1,04168	18,82581	4,59851

Quadro V.9 - Dados de tempo de processamento obtidos utilizando máquina Pentium 330 Mhz

Projeto: CPX2 Globo: 5.870 parcelas (Glb30)					
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
674	0,01436	0,40920	0,00734	0,43090	0,06785
1.351	0,02858	0,82472	0,01539	0,86869	0,13729
2.714	0,05992	1,67149	0,03305	1,76446	0,28039
5.489	0,12742	3,23302	0,06940	3,42984	0,54946

Projeto: CPX2 Globo: 23.404 parcelas (Glb60)					
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
674	0,06175	1,08438	0,03157	1,17770	0,19530
1.351	0,12768	2,18143	0,06725	2,37636	0,39712
2.714	0,25767	4,42905	0,14215	4,82887	0,81168
5.489	0,52983	8,57763	0,28858	9,39604	1,58965

Projeto: CPX3 Globo: 5.870 parcelas (Glb30)					
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
569	0,01280	0,24237	0,00859	0,26376	0,04504
1.180	0,02617	0,49935	0,01875	0,54427	0,09382
2.437	0,05638	1,02247	0,04164	1,12049	0,19576
4.162	0,09967	1,63757	0,08010	1,81734	0,32828

Projeto: CPX3 Globo: 23.404 parcelas (Glb60)					
parcelas	importância	config / abo	iluminância	total p/ 1	média p/ 7
569	0,05123	0,70263	0,03858	0,79244	0,14628
1.180	0,10990	1,44437	0,07575	1,63002	0,29779
2.437	0,22550	2,99585	0,16533	3,38668	0,62552
4.162	0,39420	4,79877	0,31633	5,50930	1,05818

Comprova-se a hipótese inicial de que o processamento obedece à matriz n° parcelas (N) X n° de planos (M). Relembremos que em CPX2 temos 51 planos geradores e em CPX3 apenas 26.

Como a **importância** refere-se ao cálculo da visibilidade de um ponto (foco) em relação a todas as parcelas (N), o incremento deste cálculo depende apenas de N. Em qualquer caso há uma correspondência linear no incremento do tempo de cálculo da importância. No caso de CPX2, para um incremento de 8,14 vezes no número de parcelas do projeto (674 para 5.489), a importância é incrementada em 8,87 vezes com globo30 e em 8,58 vezes com globo60. Em CPX3, para um incremento de 7,31 vezes no número de parcelas do projeto (569 para 4.162), temos um incremento de 7,78 vezes com globo30 e 7,69 com globo60.

Também se observa linearidade aproximada no incremento do tempo de cálculo da **configuração / abóbada** em função do número de parcelas, dado que a configuração da visibilidade dos planos é sempre feita parcela X plano, e a extração da

abóbada visível sempre parte de uma porção da abóbada correspondente ao plano que contém as parcelas, e não das parcelas. A variação deve-se mais à variação da visibilidade das parcelas individualmente em relação a cada plano e à abóbada, resultando em quantidades diferentes de posições do globo obstruídas para parcelas de um mesmo plano. No resultado geral, entretanto, pode-se admitir uma linearidade: para um incremento de 8,14 vezes nas parcelas de CPX2, temos incrementos de 7,89 vezes com globo30 e de 7,91 vezes com globo60; em CPX3, para um incremento de 7,31 vezes nas parcelas, temos incrementos de 6,75 com globo30 e de 6,83 com globo60. Observa-se que o incremento de tempo de cálculo de um globo para outro é inclusive um pouco inferior à variação das parcelas.

No cálculo da **iluminância**, o mesmo tipo de linearidade é verificada, dado que, como depende apenas da abóbada, o maior fracionamento implica em maior quantidade de parcelas, mas com abóbadas visíveis aproximadamente iguais no contexto de subdivisão de cada plano (pode-se considerar que, com maior fracionamento, enquanto umas parcelas verão menos céu, outras verão mais do que uma parcela maior que as englobe num fracionamento menos intenso). Para CPX2, a variação correspondente ao fator de 8,14 vezes na divisão das parcelas, temos um incremento no tempo de cálculo da iluminância de 9,46 com globo30 e de 9,14 com globo60; em CPX3 temos, para variação de 7,31 nas parcelas, temos 9,34 com globo30 e 8,20 com globo60, com uma linearidade um pouco acima da variação das parcelas. Se considerarmos o tempo total de um ciclo, teremos, para CPX2 variações de 7,96 com globo30 e de 7,97 com globo60; para CPX3 temos 6,89 com globo30 e de 6,95, ficando no geral, com uma variação um pouco abaixo da variação do número de parcelas.

Consideremos agora a variação do número de parcelas do globo30 (5.870) para o globo60 (23.404), num fator de 3,98 vezes. Tomemos os projetos no menor e no maior fracionamento. Em CPX2 temos uma variação de 4,3 na importância, 2,65 na configuração/abóbada e 4,3 na iluminância, no menor fracionamento; no maior fracionamento temos 4,15 na importância, 2,65 na configuração/abóbada e 4,14 na iluminância; os tempos totais variam, em ambos os fracionamentos, de 2,73 vezes. Para CPX3 as variações são de 4,00 na importância, 2,90 na configuração/abóbada e 4,17 na iluminância, no menor fracionamento; no maior, as variações são de 3,96 na importância, 2,93 na configuração/abóbada e 3,95 na iluminância. O tempo total de uma interação variou de 3,0 nos dois casos. No processo de definição da configuração dos planos e da abóbada, cada passo depende de fatores distintos. A definição do intervalo de faixas que terão interseção calculadas não depende nem das faixas nem das parcelas do globo; a definição das interseções depende apenas das faixas, o mesmo ocorrendo com a comparação dos intervalos. Definidos os intervalos que representam a projeção, a definição do globo de vetores depende do número das parcelas do globo, assim como a definição da abóbada visível. No final, obtemos uma variação intermediária entre a do número de faixas (que no exemplo foi duplicado) e a do número de parcelas (que foi aproximadamente quadruplicada).

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Por tratar-se de abordagem para a qual não achamos paralelo na literatura consultada, há aspectos destas conclusões que serão abordados apenas da perspectiva conceitual, enquanto que outros já podem ser tratados de uma perspectiva prática.

Da perspectiva teórica pode-se afirmar que temos um modelo que cobre todos os principais aspectos relativos ao fenômeno da iluminação natural nos objetos arquitetônicos em uma concepção que unifica o tratamento destes aspectos num sistema único de referência capaz de lidar com eles simultaneamente. Discutiremos esta perspectiva no tópico **Validade do Modelo**.

Da perspectiva prática, a aplicação do escopo conceitual em um protótipo simplificado de processamento, embora não cumprindo o ciclo completo até o resultado final de análise que a elaboração teórica permite antever, qual seja o resultado final das trocas luminosas, ou pelo menos o mais proximamente aceitável dele, como vem sendo encarado no Estado da Arte, também permite tirar algumas conclusões, já que o protótipo foi desenvolvido dentro de todo o contexto da hipótese inicial de trabalho. Trataremos esta perspectiva no tópico **Utilidade do Modelo**.

A hipótese inicial da pesquisa que fundamentou a tese prendia-se a uma alternativa mais consistente que o hemi-cubo (Cohen *et al.*(1985)) e o *ray tracing* (Wallace *et al.*(1988)) na determinação dos fatores de forma para aplicação da radiosidade no estudo da iluminação natural. A abordagem desenvolvida consiste no "núcleo duro" (*hard core*) do protótipo desenvolvido para teste do modelo proposto. No entanto, a consistência demonstrada pelo modelo superou a expectativa inicial, o que nos permite também formular algumas questões importantes no estudo da iluminação global em arquitetura e urbanismo que podem receber novo tratamento com a aplicação do modelo, como discutiremos no tópico **desenvolvimento futuro**.

VI.1 - VALIDADE DO MODELO

Do ponto de vista conceitual o modelo mostrou-se capaz de responder às principais questões colocadas no capítulo IV:

- a) Determinar a visibilidade de cada parcela de superfície em relação ao céu;
- b) Definir o fator de forma de cada superfície em relação às regiões do céu a que está exposta.
- c) Determinar as condições do céu em uma dada circunstância;
- d) Determinar a exposição das superfícies ao Sol, definindo-se também a contribuição inicial de luz em cada parcela exposta ao céu;
- e) Determinar, para cada superfície exposta, a distribuição da luz que emite a todas que lhe são visíveis, implicando na determinação da visibilidade entre

cada parcela e o conjunto de todas as outras, bem como no cálculo do fator de forma entre os diferentes pares de parcelas;

- f) através de interações sucessivas, redistribuir a energia nas inter-reflexões / transmissões, até que um equilíbrio aceitável seja atingido.

Quanto à **determinação da visibilidade da abóbada**, o método mostrou-se eficiente não só permitindo descrever detalhadamente a visibilidade do céu para cada parcela como também, ao fazê-lo de forma precisa através dos planos geradores e isenta de elementos aleatórios, permite também selecionar os planos que efetivamente serão visíveis de cada parcela na determinação dos fatores de forma em relação às demais parcelas do projeto. É importante notar que não estamos lidando aqui apenas com o conceito de valor do fator de forma, mas atribuindo-lhe uma característica de integração pela geometria do conjunto de parcelas do globo e de sua posição espacial. É um conceito de fator de forma que se insere no contexto do referencial espacial único, e cuja componente espacial será muito útil no desenvolvimento posterior, pois informa não só **quanto** se visualiza de um determinado elemento, como também **onde** este elemento é visualizado. Desta maneira a **visibilidade da parcela do projeto em relação ao céu é expressa por esse fator de forma espacial**, que permite inclusive a obtenção de um valor numérico para o fator de forma em diferentes graus de hierarquia, como o modelo suporta.

A expressão da visibilidade / fator de forma pelo vetor de parcelas superpostas apontando para índices do globo de referência permite também manter registrado o contexto de visibilidade definido nesta primeira etapa, que será útil não só na análise da visibilidade parcela x parcela, como também na análise do fenômeno reflexão / transmissão especular. O modelo não só responde plenamente aos itens a) e b) da proposição inicial, como também permitirá melhor solução de aspectos posteriores..

A **determinação das condições do céu** em uma dada circunstância (item c) não constituiu problema ao modelo, dado que a utilização de fórmulas consagradas nos estudos pode facilmente ser expressa como uma matriz ordenada segundo o globo de referência, cujo índice aponta sua direção. A substituição dos valores da matriz por nova condição do céu é rápida, e seu giro (reorientação do projeto) é elementar. No contexto geral do sistema de referência, as condições da abóbada poderão ser hierarquizadas também em diferentes graus de resolução.

O modelo mostrou-se válido também para determinar as **condições de exposição das parcelas do projeto ao Sol e ao céu** (item d), através do cálculo da insolação direta e através da integração das parcelas visíveis da abóbada. Definidas a importância das parcelas e as condições de visibilidade, este um processo mais demorado, o cálculo da luz natural incidente é bastante simples, mesmo considerando a inscrição das parcelas nas listas de prioridade / importância descritas. O próprio conceito de importância enquanto referencial espacial de análise, expresso em termos de proximidade / visibilidade de um foco de maior interesse, mostrou-se estratégico e fundamental para o ciclo completo que se pretende atingir, embora na prática o protótipo tenha apresentado "ruídos", devido, talvez, a erro na rotina inicial de refinamento da importância (que tem uma pré-definição testada e correta), ou, o que é mais provável, na montagem das listas. Quando, nas verificações, a seleção das parcelas mais importantes e prioritárias foram verificadas, houve algumas inclusões e exclusões errôneas, que no entanto não comprometeram a expressão geral do modelo em termos de incidência de

luz em todas as parcelas, não sendo portanto erro decorrente da visibilidade ou incidência de luz, mas devido à importância ou à prioridade.

No entanto, o próprio conceito de importância expresso pela continência em espaço esférico definido por um raio de proximidade não é totalmente consistente, principalmente num espaço geralmente definido por planos ortogonais. O conceito de visibilidade, na importância, é bastante consistente, principalmente se considerarmos que a importância, tanto na proximidade quanto na visibilidade, pode ser definida em termos de um conjunto de focos de interesse, como aliás faz parte da estrutura do modelo, embora tenhamos usado nas verificações apenas um foco de interesse. A revisão do conceito de importância, no entanto, faz parte de uma etapa posterior de refinamento, com extensos testes para captar sua real expressão.

Até esta etapa, o modelo foi testado através do protótipo. Os resultados obtidos permitem tirar algumas conclusões sobre as etapas posteriores.

Quanto à distribuição da luz inicial: Numa análise mais detalhada do relatório de um processamento, confrontado com o desenho organizado segundo as listas de prioridade / importância, executado sobre o projeto **Complex2** fracionado em 5.489 parcelas, observou-se que o número de parcelas insoladas no interior do ambiente (visíveis do foco ou não, excluídas as que faceavam para o exterior) apontou cerca de 300 parcelas. Das parcelas selecionadas, cerca da metade recebeu em média 95 klux (valores entre 90 e 100, aproximadamente), enquanto a outra metade recebeu em média cerca de 60 klux (valores aproximados entre 58 e 63 klux). Estes dois conjuntos respondem, os primeiros 150, por 60% desta fatia significativa da luz inicial incidente no ambiente, enquanto as outras 150 responde por 40% desta energia. Cada uma, em média, responde por 0,4% da luz no primeiro grupo e 0,26% no segundo. Consideremos que a luz destas 300 parcelas é apenas parte, embora significativa, da luz total que incide no ambiente. Mas é a parte que terá maior impacto na solução da radiosidade. Mesmo assim, estes valores demonstram com clareza a dificuldade de distribuir rapidamente a luz natural em projetos muito fracionados, mesmo partindo da abordagem do refinamento progressivo.

Tomemos como referência inicial o tempo utilizado para o refinamento da importância, que consiste na determinação da visibilidade / configuração de um ponto em relação a todas as demais do projeto, sem considerar a definição da abóbada, processado no Pentium 330 Mhz. Para o projeto **Complex2** fracionado em 5.489 parcelas, o tempo de cálculo com o globo30 foi de 0,127 minutos, enquanto que com globo60 foi de 0.53 min. Isto significa que, tomado linearmente, teríamos com o globo30 um tempo de cerca 12,7 min. Para distribuir o primeiro terço das 300 parcelas, com cerca de 40% da energia do lote; mais um tempo equivalente para o terço seguinte, que acrescentaria mais 34% da energia; e o terço restante, no mesmo tempo, acrescentaria os 26% restantes da energia do lote. Isto considerando a energia das parcelas selecionadas, que não correspondem a todas as insolaradas que influem (algumas de mesma influência, um pouco além da soleira da porta, p. ex., foram excluídas); no entanto, estas parcelas têm o peso mais significativo para o foco da análise.

Há que se considerar, entretanto, que o tempo considerado foi obtido extrapolando-se o cálculo da importância, que é feito sobre todas as parcelas de todos os planos geradores do projeto, mas que no cálculo da visibilidade da abóbada, a construção da lista de planos visíveis para cada parcela permitirá maior eficiência a esta segunda etapa. A configuração será feita apenas para as parcelas contidas nos planos

que seguramente são visíveis da parcela distribuidora, o que tem duas vantagens: permite reduzir significativamente o número de planos a serem projetados para cada parcela, como se pode deduzir do projeto CPX2, onde para algumas parcelas apenas 7 dos 51 planos são visíveis; evitará muitos testes que são feitos antes de se saber se o plano deve ou não ser projetado, como por exemplo saber se o plano é o mesmo que contem a parcela ou não. A distribuição de energia pode, ainda, considerar o fator de importância, dado que uma parcela, mesmo visível, mas que esteja bastante distante poderá ser desconsiderada, pela sua pouca influência no contexto próximo da análise.

Consideremos que estes aspectos possam reduzir o tempo de cálculo a 50%, o que é uma estimativa conservadora, pois no projeto **Complex2** isto poderá ser obtido apenas pela exclusão dos planos não visíveis, sem considerar os aspectos da importância. Isto reduziria os tempos de distribuição do conjunto inicial de 40 para 20 min com globo30 e de 160 para 80 min com o globo60, processado no Pentium 330 Mhz. No pentium 100 Mhz os tempos equivalentes seriam aproximadamente 90 min para globo30 e 272 min para globo60. Considere-se ainda que o modelo está em estado praticamente inicial, desenvolvido sob ótica que pode ser revista da perspectiva de maior otimização do tempo de processamento.

Outro aspecto a considerar é a construção de hierarquia da **visibilidade / configuração** nas relações **parcela x parcela**. No entanto, a hierarquia, em princípio, pareceu-nos aqui de pouca utilidade, principalmente por três aspectos:

a) Há um grande número de parcelas que constituem-se em fontes iniciais de pequena intensidade relativa ao total de luz natural incidente nos modelos. Após o primeiro ciclo de distribuição de luz, a grande maioria das parcelas estarão com boa parte da energia que receberão, considerando-se o que tinham de início e o acréscimo da 1ª distribuição. É muito pouco provável que haja necessidade de um segundo ciclo de interações

b) No nosso exemplo, de 5.489 parcelas, o tamanho relativo das projeções será pequeno, na grande maioria dos casos, excluídas as parcelas com alta relação de proximidade. Isto implicaria em pouca eficiência da hierarquia.

c) Conhecida a visibilidade, a distribuição de energia não é um processo muito demorado, o que, associado ao aspecto anterior, diminui o peso relativo do tempo que a hierarquia diminuiria, frente ao tempo que acrescentaria para o seu cálculo. Isto sem considerar que, no tempo de referência, que é o cálculo da iluminância inicial, estão incluídas a determinação da insolação direta e a definição das listas de prioridades. Por estes aspectos, deixamos para o refinamento posterior do modelo a aplicação da hierarquia. Há algumas hipóteses sobre sua aplicação:

c.1) Aplicar após a determinação da visibilidade **parcela emissora x parcela receptora**. Trabalhando-se com o globo de maior resolução na projeção das superfícies receptoras, a hierarquia é construída por agrupamento. Como a razão de tempo de cálculo de um globo para o outro é menor que a razão entre as parcelas dos dois globos, o cálculo de distribuição depende do número de parcelas das projeções, que varia na proporção de variação das parcelas dos globos; esta hipótese pode diminuir sensivelmente o tempo de cálculo de projeções com muitas parcelas. A introdução de um indicador no cálculo de visibilidade pode apontar projeções com grande quantidade de parcelas, que seriam então objeto de hierarquia. Este

procedimento pode resultar em tempo de cálculo menor até do que se investigarmos a hierarquia para todas as parcelas.

c.2) Aplicar a hierarquia após a distribuição de energia. Este procedimento teria utilidade apenas no caso de pretender-se realizar um segundo ciclo de distribuição de energia. Também é útil na sucessão de estudos de condições diferenciadas.

c.3) Resgatar a visibilidade **parcela x plano** calculada para a obtenção da visibilidade da abóbada. Embora aparentemente mais complexa, esta abordagem pode ser produtiva. Considerando-se que já é conhecido um globo de vetores de cada parcela apontando os planos geradores visíveis da parcela; e que este globo aponta todas as direções que visualizam o plano, estas direções também representam as parcelas do plano que são visíveis do centro do globo. Investigar esta descrição permite, em princípio, determinar o globo de vetores de cada parcela em relação as demais sem percorrer os mesmos algoritmos de forma mais detalhada. Este procedimento facilitaria inclusive investigar mais profundamente o grau de importância das parcelas.

Consideremos agora a questão das **inter-reflexões especulares**. O modelo mostrou-se bastante eficiente na manipulação do referencial único, o que permite lidar de imediato com o comportamento especular dos materiais. Ao final da etapa verificada em protótipo até o momento, são conhecidas todas as parcelas que recebem luz direta do Sol. Numa concepção simplificada, materiais com diferentes graus de especularidade podem ter, no momento da distribuição de energia, a componente direta distribuída de forma especular. O algoritmo da reflexão é simples e, aplicado à direção do Sol, fornece de imediato a direção e, conseqüentemente, a parcela que receberá a luz refletida. Como a direção que atinge a segunda parcela é dada no referencial absoluto, uma segunda aplicação da reflexão determinaria a segunda direção de reflexão, e assim sucessivamente.

VI.2 - UTILIDADE DO MODELO

No tópico anterior concluímos pela validade do modelo, da perspectiva teórica. Temos que discutir se não percorremos o mesmo caminho que Hanrahan e Schöder (1993) que, ao buscar uma fórmula para a integral do fator de forma entre dois polígonos quaisquer, concluem que a solução, apesar de válida teoricamente, apresentava pouca utilidade prática pela complexidade, servindo apenas para aferir outros métodos.

As questões práticas principais que se colocam frente a um método desta natureza referem-se basicamente a três aspectos:

- a) Correção dos Resultados;
- b) Tempo de Processamento;
- c) Memória Utilizada.

A correção dos resultados mostrou-se bastante adequada, incorrendo apenas nos erros inerentes à abordagem teórica de elementos finitos, conforme descrito por Baum *et al.* (1989) para o hemi-cubo.

Quanto ao tempo de processamento, os valores atualmente atingidos constituem resultado prático, viabilizando de imediato uma sucessão de estudos sobre diferentes condições de incidência da luz natural em tempo bastante útil. Pode-se considerar que um tempo médio de 5,6 minutos, se utilizarmos globo60, para obter-se uma dada condição celeste (supondo-se 7 estudos num cálculo de fator de forma) é um tempo aceitável mesmo para uma máquina Pentium 100 Mhz, que hoje em dia é uma máquina praticamente fora de linha. Utilizando-se globo30, este tempo reduz-se a apenas 2,2 minutos.

Se considerarmos num projeto um estudo hora a hora (7h a 17h, p. ex) efetuado sobre seis datas significativas (é possível programar uma sucessão de dados da abóbada a serem automaticamente computados para diferentes condições celestes), teremos 66 situações, para um tempo total de cerca de 95 minutos, o que daria em média 1,5 min para cada cálculo trabalhando-se com um globo60, e de cerca de 31 min no total e média de 0,6 min com globo30, isto no Pentium 100 Mhz. No Pentium 330 Mhz estes tempos seriam de aproximadamente 28 min no total e média de 0,4 min para globo60, e 8 min no total e média de 0,15 min para globo30.

Suponhamos que cerca de 10% das situações sejam representativas do comportamento do projeto (é importante lembrar que 6 datas em seis meses representam, em termos do trânsito solar, um dia em cada mês do ano. Nossa amostra de 10% representaria, na verdade, 10% das datas associadas mês a mês, estudadas hora a hora, durante 1 ano, para uma determinada localidade. Selecionam-se então 7 estudos para distribuir energia.

Pelos padrões teóricos abordados no tópico anterior, teremos um primeiro procedimento que consiste em definir a visibilidade **parcela x parcela** e a primeira distribuição, consumindo, no Pentium 330 Mhz, 20 min com globo30 e 80 min com globo60. Podemos considerar que cerca de 10% deste tempo para uma distribuição posterior, que já não envolve a determinação da visibilidade, é um tempo bastante aceitável. O sistema consome, para calcular a iluminância de cerca de 3.600 parcelas das 5.489, ou seja, aquelas que recebem Sol ou céu, cerca de 0,07 min e 0,29 min em cada globo. Considerar 2 min e 8 min para a distribuição de 300 parcelas, num procedimento de cálculo semelhante, pode até ser um exagero. No entanto, serve para observarmos a ordem de grandeza dos procedimentos.

Assim, com globo30, após 8 min da realização dos 66 estudos, teremos 20 min para a distribuição das 300 parcelas do primeiro estudo, e mais 12 min para a distribuição dos seis estudos restantes, totalizando 40 min. Utilizando-se o globo60, teríamos 28 min para o estudo inicial, 80 min para a primeira distribuição e 48 min para as restantes, totalizando 2h 36 min. Se utilizarmos um Pentium 100 Mhz, teremos, com globo30, os tempos parciais de 31 min, 90 min e 54 min totalizando 2h 55 min; utilizando-se o globo60, teremos parciais de 95 min, 272 min e 162 min, totalizando 8h 49 min. É importante relembrarmos que a diferença de valores de cálculo entre o processamento com o globo 30 e o globo60 foi insignificante, pelo menos no que toca ao cálculo da incidência da luz natural, o que significa que pode-se obter, no Pentium 100 Mhz um estudo com o globo30 quase tão rápido e preciso como o obtido no Pentium 330 Mhz com o globo60. Uma hipótese que não foi aplicada refere-se à aplicação do refinamento progressivo logo na identificação de uma parcela de grande importância que recebe Sol: neste caso, a distribuição de energia recebida por esta parcela pode ser imediatamente distribuída, retomando-se em seguida a verificação da insolação nas parcelas seguintes.

No estágio atual o modelo também é bastante útil no sentido de avaliar a disponibilidade de luz em configurações topográficas diferenciadas, o que poderia ser muito útil no mapeamento de terras agrícolas ou outra atividade que exija medição de luminosidade ao longo do tempo.

Quanto ao uso da memória pelo sistema, o volume mais significativo é a matriz que reúne o conjunto de direções assinaladas para o globo de vetores de cada parcela do projeto. No protótipo foi feita a gravação da relação de visibilidade **parcela x plano**, que é, em termos de memória, do mesmo tamanho que a matriz **parcela x parcela**, apenas mudando-se o índice de plano para o do triângulo, na direção obstruída. Assim sendo, podemos considerá-los equivalentes. Os maiores volumes de memória atingidos durante os diferentes estudos situaram-se entre 180 Mb e 220Mb, o que pode-se considerar, para os padrões atuais de disco rígido (acima de 4 Gb, ou mesmo 8 Gb), valores bastante aceitáveis. Ressalte-se que durante o estudo não houve grande preocupação em otimizar ao máximo o uso da memória em disco, mas sim de garantir a precisão dos cálculos. Não consideramos este um problema ao desenvolvimento do sistema. Os demais arquivos, tais como matriz de configuração do céu (máximo aproximado de 20 Mb), listas de prioridades (medidas em Kb), projetos e globos, não apresentaram volume significativo de memória no processamento. Todos os estudos foram desenvolvidos considerando um espaço livre em disco de cerca de 1 Gb.

VI.3 - DESENVOLVIMENTO FUTURO

A tarefa imediata para o desenvolvimento futuro do modelo é aplicar a solução da equação da radiosidade entre as parcelas, para a implementação completa do método. Alguns aspectos, entretanto, permitem aprofundar perspectivas investigativas abertas pelo método.

A primeira perspectiva refere-se à **avaliação dos erros fundamentais de falseamento**, detectados mas não corrigidos nesta etapa do trabalho. A possibilidade de aplicar uma hierarquia ascendente, a partir de um globo de maior resolução, indica uma linha de solução destes problemas. O custo computacional, entretanto, é acrescido.

O programa LightScape, que trabalha com o refinamento progressivo, estabelece uma divisão em *quadthree* após a primeira distribuição da fonte de luz, hierarquizando a superfície de acordo com a distribuição inicial das fontes. No caso da iluminação natural este procedimento não é recomendável porque a distribuição da luz natural emitida por sucessivas parcelas pode alterar significativamente a distribuição de luz em um plano maior. Por este motivo neste modelo a hierarquia deve ser construída para cada parcela emissora, segundo os vetores de posição em diferentes graus de refinamento do globo. Assim, apesar de uma subdivisão inicial para garantir homogeneidade da distribuição de luz pela superfície geradora, a hierarquia deve ser construída a partir da subdivisão destas parcelas nos vetores do globo.

A segunda perspectiva diz respeito aos aspectos da **visibilidade**, uma vez que a proposição do globo de parcelas definido por faixas e intervalos apresenta ainda muita possibilidade de especulação teórica, como por exemplo métodos de extrapolar o cálculo de interseções nas faixas do globo, ou mesmo na construção do globo de vetores. A construção dos algoritmos de definição da visibilidade pode sofrer o aporte de outras abordagens teóricas, como técnicas estatísticas ou aplicação de funções aproximativas.

Ressalte-se que o modelo em si não utiliza funções matemáticas complexas, sendo em princípio pouco provável que surtam efeitos métodos numéricos, apontando melhores perspectivas a abordagem de refinamento conceitual do modelo.

Um aspecto da visibilidade que pode ser considerado é a aplicação do método na determinação dos elementos visíveis da cena de uma dado ponto de observação. Se considerarmos uma “janela” retangular correspondente ao campo de visão, a aplicação da técnica sobre as quatro arestas permite definir um conjunto de intervalos que constituem a zona de visibilidade do globo através da janela de observação. Os planos que não estiverem, através de uma análise de seus vértices, pelo menos parcialmente contidos na projeção da janela, não são analisados. Outra possibilidade que pode ser considerada é a definição de múltiplos focos de interesse para a definição da importância, que pela sua natureza de cálculo já forneceria, para estes focos, um globo de visibilidade relativa a todas as parcelas do projeto. Desta forma, após a solução da distribuição de energia luminosa, que como se pode depreender do modelo não se restringirá apenas às trocas difusas, mas às especulares inclusive, o globo de visibilidade dos focos é resgatada, selecionando-se apenas as direções contidas na projeção da “janela” de visibilidade.

Esta técnica pode ser muito útil na determinação da alteração das condições de visibilidade pela inserção ou remoção de um objeto da cena. Na hipótese de retirarmos um objeto da cena poderíamos investigar a transformação apenas nas parcelas que contiverem em sua lista de visibilidade os planos do objeto retirado. Identificadas estas parcelas, apenas as direções correspondentes contidas, novamente, em uma “janela” definida pela projeção do objeto seriam reanalisados para saber se estariam visíveis a partir da remoção do objeto, sendo que a investigação da abóbada visível de cada parcela com a remoção está inserida no contexto de análise do globo de vetores. Se não há planos afetados pela remoção do objeto, pela lógica espacial do modelo parte da abóbada tornar-se-á visível e deve ser atualizada na visibilidade da abóbada pela parcela a partir da projeção conhecida do objeto removido. No caso de inserção de um objeto, além da determinação da condição de visibilidade das parcelas deste objeto, seria necessário somente analisar a inserção da nova projeção no globo de vetores de cada parcela pré-existente, como um adendo ao globo de cada uma, sendo necessário observar se a inserção do objeto não provocou mudança na abóbada, caso as direções afetadas pelo objeto não interfiram em zonas já obstruídas. Não aprofundamos estas considerações com relação à movimentação do observador em um cenário, mas aparentemente os conceitos aqui descritos encontram aplicabilidade também na hipótese do movimento de um ponto, pois se a técnica otimizaria a obtenção de uma imagem de um ponto de vista, certamente otimizaria a obtenção de uma sucessão delas. Nosso protótipo, no entanto, ainda não chegou no estágio de testar hipóteses de síntese de imagens. É uma das perspectivas mais interessantes de investigação do modelo. Dentro deste contexto, não podemos esquecer de acrescentar o conceito de **importância**, dado que seu papel mostrou-se relevante no sentido de lidar com as dificuldades da iluminação natural, embora em nosso protótipo tenha sido tratada de maneira ainda simplista, sendo um conceito com potencial de desenvolvimento.

A terceira perspectiva de desenvolvimento do modelo diz respeito ao **tratamento dos materiais**. A possibilidade de utilização de um algoritmo de reflexão de raios no momento da aplicação da solução de radiosidade abre uma perspectiva de tratamento mais complexa dos materiais, principalmente se considerarmos que os principais materiais não são puramente difusores ou especulares. Se admitirmos uma

disponibilidade de memória significativa e maior rapidez de cálculo do que a aqui utilizada (lembramos que as máquinas de 400 Mhz ou mais já estão bastante acessíveis no mercado), é possível considerar a possibilidade de distribuir a energia da abóbada de forma direcional, utilizando-se uma função de distribuição direcional da energia de um raio incidente, dado que os diferentes pontos da abóbada projetariam luz diferenciada em diferentes direções, quando incidindo sobre este tipo de superfície. A constituição de uma matriz para guardar a energia nas diferentes direções poderia dar maior precisão ao processo de solução da radiosidade, dado que este fenômeno poderia ser considerado a cada passo do cálculo, e não apenas num processo posterior de visualização, quando é aplicado apenas aos elementos do cenário vistos de um determinado ponto. Esta solução, em princípio, permitiria uma definição global da energia emitida em cada direção por todas as parcelas, facilitando inclusive o processo de determinação de imagens para visualização.

A quarta perspectiva de pesquisa diz respeito à **possibilidade de incorporar ao protótipo a modelagem celeste obtida por outros métodos**, ao invés de formulações matemáticas. Consideremos a possibilidade de registro analógico de determinadas condições da abóbada celeste (uma fotografia com lente "olho de peixe", p.ex., como as fotos registradas por Gillette (1981)) e sua possibilidade de conversão para um modelo digital, ou então as proposições de Ruck *et al.* (1995) para modelagem digital através de formulações matemáticas obtidas de medições empíricas de abóbadas em condições diferenciadas de nublagem. Ou ainda a utilização de mapas de texturas para representar nuvens, como é sugerido por Tadamura *et al.* (1986). A possibilidade de converter estes modelos para o formato do globo de referência é bastante grande e permitiria simulações bastante eficientes, pois não implicam no procedimento de determinação da visibilidade no projeto, parte mais pesada do processamento.

A quinta e última perspectiva que apontaremos (o que não exclui outras formulações) diz respeito à **possibilidade de aplicação do modelo com fontes artificiais**. Consideremos, primeiro, um ambiente onde foi calculada a distribuição da luz natural e pretende-se analisar a complementação por uma fonte artificial. No caso, a visibilidade das parcelas é conhecida e trata-se de inserir um objeto onde algumas parcelas dispõem de energia inicial, modelado segundo os métodos do sistema. O procedimento aqui limita-se, num primeiro passo, ao cálculo da visibilidade dos elementos da fonte, que é reduzido (no caso do projeto **complex2** fracionado em 5.489 parcelas, levaria 0,127 min. no globo30 e cerca de 0,5 min. no globo60), distribuindo-se então a energia da fonte. Num segundo passo, supondo-se que a fonte seja um objeto de dimensões significativas, capaz de provocar obstruções e sombras relevantes, aplica-se o refinamento progressivo e, tomando-se a parcela com maior variação de energia a transmitir, insere-se a projeção da fonte no globo de visibilidade desta parcela, na forma de apêndice, num procedimento bastante simples que se repete para a parcela seguinte. Há a hipótese de aplicar-se o refinamento progressivo a partir dos globos de vetores definidos para os elementos da fonte a partir dos planos geradores, e não a partir da projeção de todas as parcelas do projeto, construindo-se a hierarquia a partir da distribuição da luminosidade conhecida do plano.

Na segunda circunstância, consideraremos apenas a iluminação artificial, como um modelo a ser estudado no comportamento noturno, ou em ambientes totalmente fechados, ou mesmo em um ambiente de características intermediárias, com amplas aberturas para o exterior, em situação noturna, também. Nesta hipótese basta informar ao modelo a inexistência de luz natural, que o algoritmo fica bastante simplificado. A

fonte (suporemos uma não pontual) é inserida no projeto no início da análise e a determinação da visibilidade é feita a partir dos elementos iluminantes da fonte. Deixaremos de lado o conceito de importância porque a suposição é que o foco é a fonte e o importante é o que ela visualiza; no entanto, o conceito de distância não deve ser desconsiderado. O que se pode é adotar o conceito de hierarquia como é feito no modelo tradicional de refinamento progressivo e, determinada a visibilidade a partir dos planos geradores e distribuída a energia da fonte, estabelecer-se um fracionamento a partir de uma análise da distribuição da luminosidade pelos planos geradores e de seu grau de importância. Observe-se que não é necessário informar ao modelo que elementos constituem abertura ou não, ou se é um modelo de interior ou de exterior. O simples fato de saber que não há luz natural é suficiente, pois a análise da componente natural é feita após a determinação do globo de vetores, que é o elemento de visibilidade entre as parcelas, e cuja determinação depende apenas dos planos geradores e de seu fracionamento. Tomemos como referência o maior fracionamento do projeto **complex2**, com 5.489 parcelas, das quais suporemos que cerca de dez constituam elementos de fonte iluminante não pontual. O tempo necessário para determinar a visibilidade de um elemento, equivalente aproximadamente ao tempo de cálculo da importância obtido em nosso protótipo, com globo30 (5.870 parcelas) seria de cerca de 0,127 min; no globo60 (23.404 parcelas) seria de cerca de 0,5 min. Supondo-se cerca de 20% do tempo gasto para a visibilidade para distribuir a energia da fonte (o que é um tempo excessivo, perto da performance do modelo no cálculo da luminosidade da abóbada), podemos raciocinar, para efeito de hipótese, com um tempo de 0,15 min e 0,6 min, processados no Pentium 330 Mhz, o que resultaria em 1,5 min e 6 min para a distribuição de toda energia da fonte, e mais 0,15 min e 0,6 min para cada interação posterior. É importante observar que estamos lidando com o pior caso, de utilizar um fracionamento excessivo dos planos, sem utilização de nenhuma hierarquia (esta, como demonstra a literatura, é bastante útil no caso da abordagem tradicional). E observa-se também que, no caso do modelo citado, teríamos uma análise que consideraria inclusive os efeitos da iluminação de um ambiente nos outros, podendo inclusive as fontes serem colocadas em ambientes distintos, ou mesmo no exterior. O modelo não desperdiçaria raios emitidos, pois não trabalha com este conceito, tanto externamente quanto em cada ambiente há uma descrição precisa das direções válidas para a emissão da energia luminosa. A energia que parte para fora do projeto não é considerada em nenhum momento, pois o modelo trabalha apenas com as projeções prévia e precisamente determinadas. Da mesma forma, aqui o conceito de importância também é relevante, pois apesar de considerar o projeto em sua integridade, o modelo suporta a consideração dos elementos mais próximos da zona de interesse, como já foi descrito. O abandono do conceito **dentro / fora** constitui vertente de interesse no contexto da pesquisa sobre a distribuição de energia no desenvolvimento posterior.

No caso de nosso modelo, não é necessário, como no programa LighScape, designar **aberturas**, ou **janelas**, ou **interiores** e **exteriores**, para evitar emissão desnecessária de raios para buscar o céu (mandando apenas para as aberturas, ou escolhendo um algoritmo interior ou exterior), novamente, porque não trabalha com conceito de emissão de raios, nem com a projeção plena das superfícies.

Embora não sejam únicas, estas perspectivas de pesquisa para desenvolvimento do modelo podem propiciar em futuro breve a disponibilidade de uma ferramenta de apoio ao projeto que, acreditamos, muito poderá colaborar no aprimoramento das soluções de iluminação, tanto natural quanto artificial, do espaço arquitetônico e urbano, em condições plenamente acessíveis, no contexto atual de mercado, ao profissional arquiteto e urbanista.

BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

- ADAMS, L. - *"Visualização e Realidade Virtual"*. Trad. Mário M. Fecchio. São Paulo: Makron Books, 1994.
- ANAIS DO III Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens. Gramado, RS, 30 de maio a 1 de junho de 1990.
- ASHDOWN, I. - *"Global Illumination 'Bible'?"*. Ray Tracing News, v. 10, n. 2, June 1997. <http://www.acm.org/tog/resources/RTNews/text/>
- AUPPERLE L. - *"Hierarchical Algorithms for Illumination"*. PhD Thesis, Department of Computer Science, Princeton University, 1993.
- BAKER, N., Fanchiotti, A., STEEMERS, K. - *"Daylighting in Architecture - A European Reference Book"*. London: James & James, 1993.
- BASTOS, R.; GOSLIN, M.; ZHANG, H. - *"Efficient Rendering of Radiosity using Texture and Bicubic Reconstruction"*. Walkthrough Project, Department of Computer Science, Technical Report TR96-025. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, 1996.
- BAUM, D.R.; RUSHMEIER, H.E.; WINGET, J.M. - *"Improving Radiosity Solutions Through the Use of Analytically Determined Form-Factors"*. ACM - Computer Graphics, v.23, n.3, July 1989, pp 325-334.
- BRAGA, M.J.F.; BARRETO, J.M.; MACHADO, M.A.S. - *"Conceitos de Matemática Nebulosa na Análise de Risco"*. Rio de Janeiro: Artes e Rabiscos, 1995.
- CAMPBELL III, A. T. - *Modeling Global Diffuse Illumination for Image Synthesis*. PhD Thesis in Computer Sciences, University of Texas, Austin - USA, 1991.
- CARBONARI, A. - *"Ombre - Urbane 2: a Software to Evaluate Available Sun Radiation on Building's Surfaces, and Daylighting Level in Urban Spaces or Interiors, in Presence of Urban Obstructions"*. Environmentally Friendly Cities, Proceedings of PLEA'98, Lisboa, Portugal, June 1998, pg. 453 - 456. James & James Pub. Lt, 1998.
- CHICHERCHIO, L. C. - *"Manual Técnico de Iluminação Zenital"*. Colorplast, SP., s/ data.
- CIE - Commission Internationale de l'Eclairage, *"Standardisation of Luminance Distribution on Clear Skies"*. Paris: CIE (1973)
- COHEN, M.F.; CHEN, S.E.; WALLACE, J.R.; GREENBERG, D.P. - *"A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation"*. ACM - Computer Graphics, v.22, n.4, August 1988, pp 75 - 84.

- COHEN, M.F.; GREENBERG, D.P. - **"The Hemi - Cube: A Radiosity Solution for Complex Environments"**. ACM - Computer Graphics, v.19, n.3, 1985, pp 31 - 40
- COHEN, M.F.; HANRAHAN, P.; SCHRÖDER, P.; GORTLER, S.J. - **"Wavelet Projections for Radiosity"**. Computer Graphics Forum, v. 13, n. 2, June 1994, pp 141-151.
- DOBASHI, Y.; KANEDA, K.; NAKATAMI, H.; NISHITA, T.; YAMASHITA, H. - **"A Quick Rendering Method Using Basis Functions for Interactive Lighting Design"**. Computer Graphics Forum, v.14, n.33, 1995-9, p.229-240.
http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/~nis/pub_nis.html.
- DOBASHI, Y.; KANEDA, K.; NISHITA, T.; YAMASHITA, H. - **"A Fast Display Method of Sky Color Using Basis Functions"**. The Journal of Visualization and Computer Graphics, v.8, n.2, (1997-4), p.115-127.
http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/~nis/pub_nis.html.
- DOBASHI, Y.; KANEDA, K.; NISHITA, T.; YAMASHITA, H. - **"Display Method of the Sky Color Taking into Account Multiple Scattering"**. Proceedings of Pacific Graphics 96 , p. 117-132.
http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/~nis/pub_nis.html.
- DOBASHI, Y.; NAKAMAE, E.; NISHITA, T. - **"Display of clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light"**. SIGGRAPH' 96.
http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/~nis/pub_nis.html.
- DRAKOS, N. - **"Application Challenges to Computational Geometry"**. Technical Report TR-521-96, Computer Based Learning Unit, University of Leeds, 1996.
<http://graphics.lcs.mit.edu/~seth/pubs/taskforce/>
- DRAKOS, N. - **"Radiosity Method"**. Technical Report, Computer Based Learning Unit, University of Leeds, 1996 (1st. In 1993).
<http://www.fsz.bme.hu/~szirmay/radiosit/>
- DRETTAKIS, G.; DURAND, F.; PUECH, C. - **"The Visibility Skeleton: A Powerful And Efficient Multi-Purpose Global Visibility Tool"**. Proceedings of ACM SIGGRAPH' 97, 1997. T. Whitted, ed., p. 89-100, Los Angeles,
- DRETTAKIS, G.; SILLION, F. X. - **"Acurate Visibility and Meshing Calculations for Hierarquical Radiosity"**. Proceedings of 7th EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING, Portugal, 1996.
- DRETTAKIS, G.; SILLION, F. X. - **"Interactive Update Of Global Illumination Using a Line-Space Hierarchy"**. Proceedings of ACM SIGGRAPH' 97. T. Whitted, ed., p. 57-64, Los Angeles, 1997.

- FAINGUELERNT, E. K.; BORDINHÃO, N. C. - **"Álgebra Linear e Geometria Analítica"**. S. Paulo: Ed. Moderna, 1980.
- FOLEY, J. ; VAN DAM, A. ; FEINER, S.; HUGHES, J. - **"Computer Graphics: Principles and Practice"**. 2ª ed. Addison - Wesley Pub. Co., USA, 1993.
- FREIRE, M. R. - **"A Luz Natural no Ambiente Construído"**. Salvador, FAUFBA/Depto IV, LACAM, 1997.
- GERSHBEIN, R. - **"An Adaptative Gauss Method for Computing Irradiance Coefficients of Galerkin Radiosity Systems"**. Technical Report, Department of Computer Science, Princeton University, 1995.
- GIECK, K. - **"Manual de Fórmulas Técnicas"**. 2ª ed. revista e ampliada. Hemus, SP, 1979.
- GILLETTE, G. - **"Sky Research: Blue Skies Aren't Always Brightest"**. Architectural Record -Aug. 81, p.42-3.
- GORAL, C. M.; TORRANCE, K. E.; GREEMBERG, D. P.; BATAILLE, B. - **"Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces"**. ACM - Computer Graphics (Proceedings 1984), pp 213-222.
- HANRAHAN, P.; LEVOY, M. - **"Light Field Rendering (To appear in SIGGRAPH' 96)**. Technical Report - Computer Science Department, Stanford University, Stanford - CA, 1996.
- HANRAHAN, P.; SCHRÖDER, P. - **"On the Form Factor Between Two Polygons"**. In Computer Graphics, Annual Conference Series, 1003 (August 1993), SIGGRAPH' 93.
- HANRAHAN, P.; TELLER, S. - **"Global Visibility Algorithms for Illumination Computations"**. Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH' 94, pp 443-450, June 1994.
- HANRANHAN, P.; SALZMAN, D.; AUPPERLE, L. - **"A Rápido Hierarquical Radiosity Algorithm"**. Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH' 91) 25, 4 (1991), p. 197-206.
- HEITZ, M. - **"HOOD, une méthode de conception hiérarchisée orientée objets pour le développement des gros logiciels techniques et temps-reel"**. Bigre n. 57, dec 87, Journées ADA France: le parallélisme em ADA.
- HOAYS, H.S. - **"Influência do Tipo de Ático no Conforto Térmico"**, dissertação de mestrado, UFSC, 1993.
- HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. - **"Iluminação Natural"**. Trad. Antonio S. L. de Faria (original 1966). Fund. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1975.

- IES - Illuminating Engineering Society of North América - **"Procedures Committee Recommended Practice for the Calculation of Daylight Availability"**. Journal of IES, 13(4) 381-392 (1984).
- INCROPERA, F.P. e WITT, D.P. - **"Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa"**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992.
- KELLER, A . - **"Quasi - Monte Carlo Methods in Computer Graphics: the Global Illumination Problem"**. Proceedings of the SIAM Conference in Park City, 1995.
- KELLER, A . - **"A Quasi - Monte Carlo Algorithm for the Global Illumination Problem in the Radiosity Setting"**. In Monte Carlo and Quasi - Monte Carlo Methods in Scientific Computing (H. Niederreiter and P. Shiue, eds), Springer, 1995, pp 239-251.
- KELLER, A . - **"Quasi - Monte Carlo Radiosity"**. Rendering Techniques' 96, edited by X. Pueyo e P. Schröder, Springer, 1996, pp 101-110.
- KELLER, A . - **"The Fast Calculation of Form Factors Using Low Discrepancy Sequences"**. Proceedings of the 12st. Spring Conference on Computer Graphics, Bratislava, 1996, pp 195-204.
- KHODULEV, A . - **"Comparision of two Methods of Global Illumination Analysis"**. Technical Report, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, 1996.
<http://rmp.kiaml.rssi.ru/articles/cmgi/index.htm>
- LAMBERTS, R. et alii - **"Eficiência Energética em Edificações: Estado da Arte"**. Eletrobrás, R. de Janeiro, 1996.
- LD+A -Lighting Design + Application, September 1996. **"1996 IESNA Software Survey"**, p.39.
- LEVOY, M. - **"Computer Graphics: Image Synthesis Techniques"**. Lecture Notes CS348B, Department of Computer Science, University of Stanford, 1996.
<http://graphics.stanford.edu/courses/cs348b-96/>
- LIGHTSCAPE TECHNOLOGIES - **"LIGHTSCAPE Technology Overview"**. 1998.
- <http://www.lightscape.com/productinfo/techoverview/>
- MANN, S. (instructor) - **"Introduction to Computer Graphics - Winter 1998"**. Department of Computer Science (Computer Graphics Lab). Course Notes CS488/688, University of Waterloo, 1998.
<http://www.undergrad.math.uwaterloo.ca/~cs488/>
- MOORE, Fuller - **"Concepts and Practice of Architectural Daylighting"**. 1a. ed 1985. Van Nostrand Reinhold, N. Y., 1991.

- MÜLLER, S.; KRESSE, W.; GATEMBY, N.; SCHÖEFFEL, F. - **"A Radiosity Approach for the Simulation of Daylight"**. Eurographics Rendering Workshop 1995. Eurographics, June 1995.
- MÜLLER, S.; SCHÖEFFEL, F. - **"Fast Radiosity Repropagation For Interactive Virtual Environments Using A Shadow-Form-Factor-List"**. Technical Report, Fraunhofer Institute for Computer Graphics, Darmstadt, Germany, 1994.
- MÜLLER, S.; SCHÖEFFEL, F.; GOLLER, M.; STOFFEL, J. - **"TaLis"**. Research Project: Fraunhofer Institute for Computer Graphics (ICG, Darmstadt), Fraunhofer Institute for Solar Energy (ISE, Freiburg), Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP, Stuttgart), 1997.
- NISHITA, T.; NAKAMAE, E. - **"A New Radiosity Approach Using Area Sampling for Parametric Patches"**. Computer Graphics Forum EUROGRAPHICS'93, v. 12, n.3 (1993), pg 385-393.
- NISHITA, T.; NAKAMAE, E. - **"Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Illuminated by Sky Light"**. ACM Computer Graphics (SIGGRAPH' 86 Proceedings), Vol. 20, No. 4, August 1986, pp 125 - 132.
- PAGE, J.K; THOMPSON, J.L.; SIMMIE, J. - **"A Metereological Data Base System for Architectural and Building Engineering Designers Handbock - V. II: Algorithms for Building Climatology Applications"**. 1^a ed. Dept. of Building Science, University of Sheffield, UK, 1984.
- PEREIRA, F.O.R; TURKIENICZ, B; CLARO, A. - **"A Methodology for Sunlight Urban Planning: Computer-based Solar and Sky Vault Obstruction Analysis"**. 4th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, em Melbourne, Australia, julho de 1995.
- PERRY, G. - **"Programação Orientada para Objeto com Turbo C++"**. Trad. R. V. Riegger. Rio de Janeiro: Berkeley Brasil, 1994.
- RADEMACHER, P. - **"Calculating Form Factors"**. Technical Report COMP238, (1997)
<http://www.cs.unc.edu/~rademach/238/ffactors.html>
- RICH, E.; KNIGHT, K. - **"Inteligência Artificial"**. 2^a ed. Trad. Maria C. S. R. Ratto. Makron Books, S.P., 1994 (McGraw-Hill, 1991)
- RIMER, S. - **"Multimídia - Programação para Windows"**. Trad. L.Y. Sato. São Paulo: Makron Books, 1994.
- RUCK, N.; ROY, G.G.; REID, G. - **"Modelling the Sky - A standard digital form."** Tech. Rep. 1995.

- SCARAZZATO, P. S. - **"O Conceito de Dia Típico de Projeto Aplicado à Iluminação Natural"**. Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo - SP, 1995.
- SCHMIDT, O . - **"Parallel Online Radiosity"**. PARAGRAPH Research Project, University of Paderborn, 1997. http://www.uni-paderborn.de/fachbereich/AG/monien/RESEARCH/par_online_radiosity.html.
- SCHRÖDER, P. - **"Numerical Integration for Radiosity in the Presence of Singularities"**. Technical Report, Department of Computer Science, Princeton University, 1993. Proceedings of 4th Eurographics Workshop on Rendering.
- SHEA, G. T. - **"Radiosity Rendering With Specular Shading"**. Thesis of Master Science, Department of Computer Science - University of Kansas, 1994. <http://www.xmission.com/~shea/th1/thesis.html>.
- SHIRLEY, P.; NGUYEN D. C.; WESTIN, S.; VEACH, E. - **"What's Wrong with Monte - Carlo Methods?"**. Ray Tracing News, v. 10, n. 2, June 1997. <http://www.acm.org/tog/resources/RTNews/text/>
- SIEGEL, R; HOWELL, J. R. - **"Thermal Radiation Heat Transfer"**. Hemisphere Pub. Co. 1978.
- SILLION, F. X. ; DAUBERT, K.; DRETTAKIS, G.; SCHIRMACHER, H. - **"Hierarquical Lighting Simulation for Outdoor Scenes"**. In Rendering Techniques' 97, proc. Of 8th EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING, 1997, França. <http://.....>
- SILLION, F.; PUECH, C. - **"A General Two-Pass Method Integrating Specular and Diffuse Reflection"**. ACM - Computer Graphics, v. 23, n. 3, July 1989, pp 335 - 343. (incluir na Revisao Biblio)
- SLUSALLEK, P.; DRETTAKIS, G.; PUEYO, X.; WILLIS, P. - **"Erasmus Computer Graphics Course, Barcelona 96"**. Course Notes, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 1996. <Http://www.bath.ac.uk/~mapmjt/Erasmus/>
- SOTERAS, R.M - **"Geometria e Iluminación Natural - Introducción de la iluminación natural en el processo de control gráfico del disseno"**. Tese de Doutorado, Cátedra de Geometria Descritiva do Depto. de Expressión Gráfica, ETSAB - Barcelona, 1985.
- STUTTARD, D.; WORRALL, A .; PADDON, D.; WILLIS, C. - **"A Radiosity System for Real Time Photo - Realism"**. Technical Report, Kaleidoscope Computer Graphics Laboratory, Department of Computer Science, University of Bristol, Bristol - UK, 1996.
- SZOKOLAY, S.V. - **"Environmental Science Handbook for Architects and Builders"**. The Construction Press, Lancaster, UK. 1980.

- TADAMURA, K.; NAKAMAE, E.; KANEDA, K.; BABA, M.; YAMASHITA, H.; NISHITA, T. - **"Modeling of Skylight and Rendering of Outdoor Scenes"**. Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS' 93), v. 20, n. 4 (1986), p.125-132;
- TREGENZA, P. R. - **"The Monte Carlo Method in Lighting Calculations"**. Lighting Researchs and Technology, 15 (4) 163 - 170, 1983.
- TREGENZA, P. R. - **Daylighting Algorithms**. School of Architecture Studies, Univ. of Sheffield, UK. 1993.
- WALLACE, J. R.; ELMQUIT, K. A .; HAINES, E. A . - **"A Ray Tracing Algorithm for Progressive Radiosity"**. Computer Graphics, v.23, n.3 (1989), p.315-324.
- WALLACE, J.R.; COHEN, M.F.; GREENBERG, D.P. - **"A Two-Pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods"**. Computer Graphics, v.21, n.4 (1987), p.311-320.
- WARD, G. J. - **"The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System"**. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH' 94 Conference), July 1994, pp 459-72.
<http://radsite.lbl.gov/radiance/papers/sg94.1/>
- WATERMAN, D.A. - **"A Guide to Expert Systems"**. Addison-Wesley Pub. Co., USA, 1986.
- WATT, A. - **"Fundamentals of Three-Dimensional Computer Graphics"**. Wokingham, UK: Addison-Wesley, 1990.