

## **2**

### **Traçado de Feixes**

Neste Capítulo, a metodologia utilizada para a implementação do algoritmo de traçado de feixes em ambientes interiores tridimensionais (3D) é descrita. Na seção 2.1, o método de traçado de feixes é apresentado. Na seção 2.2, a organização do modelo e as etapas utilizadas na sua implementação são brevemente descritas. Em seguida, cada etapa é explicada detalhadamente nas seções 2.3, 2.4 e 2.5.

#### **2.1.**

##### **O Método de Traçado de Feixes**

O método de traçado de feixes [36] determina os percursos de propagação com o auxílio de feixes traçados da fonte em direção a um ambiente tridimensional (3D) no qual as paredes e objetos são representados por um conjunto de polígonos convexos planos. Nesta tese, os feixes emitidos são caracterizados por vértices e bases poligonais também convexas e planas. Desta forma, à medida que os feixes interagem com o ambiente, definem Figuras geométricas tridimensionais igualmente convexas denominadas feixes poliédricos, como as mostradas na Figura 2.

De um modo geral, um grupo de feixes é utilizado para representar um conjunto contínuo e infinito de raios que saem da fonte. À medida que cada polígono  $P$  (que forma uma parede ou face de um objeto) é encontrado, o feixe original é subdividido em novos feixes.

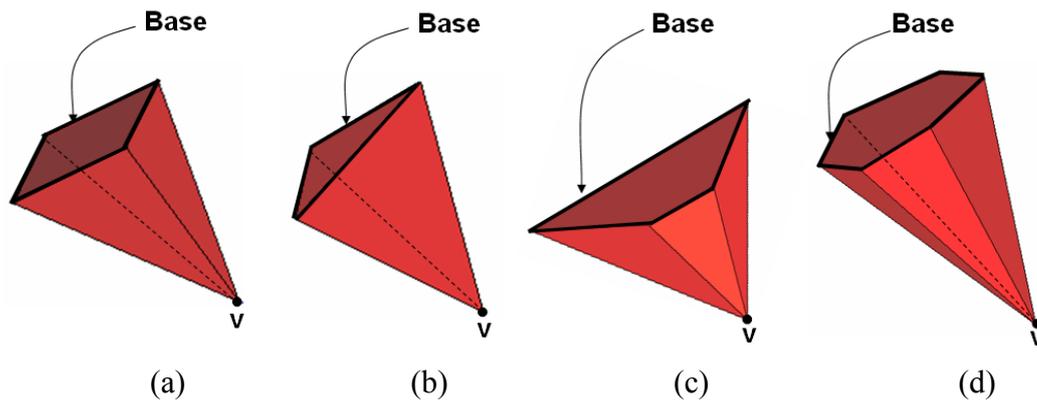


Figura 2 - Tipos de feixes poliédricos utilizados. (a) Feixe com vértice V e base quadrada. (b) Feixe com vértice V com base triangular. (d) e (e) Feixes com vértices V e bases convexas quaisquer.

## 2.2. Organização do Modelo

A organização do modelo, mostrada na Figura 3, foi dividida em quatro fases distintas: subdivisão espacial, emissão de feixes, determinação dos percursos de propagação e caracterização do canal UWB (obtenção dos parâmetros de dispersão do canal de rádio propagação).

Na primeira fase, com a subdivisão espacial é obtida uma estrutura de dados que identifica as células, representadas por um grupo de polígonos convexos, que formam o ambiente, assim como suas características (espessura, vetores normais e parâmetros constitutivos).

Na segunda fase, são recursivamente traçados os feixes de transmissão, reflexão especular e difração, para a obtenção de uma estrutura na forma de árvore (*beam tree*) que relaciona um feixe ao seu antecessor.

Na terceira fase, são obtidos os múltiplos percursos de propagação do sinal oriundo da posição do transmissor até a posição do receptor, com base nos feixes de transmissão, reflexão e difração traçados na segunda fase.

Na última fase, são obtidos os parâmetros de dispersão do canal assim como as características do campo em pontos de observação de interesse, através de informações referentes aos múltiplos percursos de propagação do sinal. Esta última fase será tratada separadamente no capítulo 3.



Figura 3- Organização do modelo.

O programa que executa as etapas do modelo de traçado de feixes (subdivisão espacial, emissão de feixes, determinação dos percursos de propagação e caracterização do canal UWB), foi desenvolvido na linguagem de programação FORTRAN desenvolvido no *software* Compaq Visual Fortran 6.6 em um código fonte de 9.000 linhas (aproximadamente).

Este programa foi executado em um PC com processador Intel Core 2 Duo 3.0 GHz, com 1GHz de memória RAM, gerenciados pelo sistema operacional Windows XP.

## 2.3 Subdivisão Espacial

Um dos principais desafios do traçado de feixe é o desenvolvimento de métodos que façam uma modelagem 3D robusta e eficiente, proporcionando a obtenção rápida das componentes de multipercurso. Assim, um importante compromisso é representar a modelagem 3D do espaço de interesse de tal forma que operações computacionais dispendiosas em termos de tempo de simulação sejam reduzidas de forma significativa.

Muitas estruturas foram propostas para acelerar a obtenção dos feixes em duas dimensões (2D), para posterior obtenção dos multipercursos, tais como: *Binary Space Partition* (BSP) [55], grafos de adjacência de célula [37]-[39], [41], [47] e uso de triangulação [44], [46]. No entanto, existem na literatura poucos trabalhos que considerem ambientes 3D para emissão de feixes, fato que dificulta a determinação do melhor tipo de estrutura a se utilizar.

Nesta tese, a subdivisão espacial é construída através da subdivisão do ambiente em regiões 3D poliédricas convexas denominadas de células. Cada célula é representada por um conjunto de faces planas (polígonos convexas). Estas

faces podem representar uma parede, porta ou janela de um determinado ambiente. O mobiliário é representado de forma simplificada por outro conjunto de faces, com as mesmas características.

Para melhor explicar a subdivisão espacial, considera-se um exemplo de um ambiente com portas e janelas mostrado na Figura 4 (a). Antes de subdividir o ambiente em células, as faces que não são convexas, como as que contêm portas e janelas devem ser subdividida em polígonos convexos de cor vermelha, como mostrados na Figura 4 (b). A Figura 4 (c) mostra a criação de três faces planas na cor azul denominadas de faces transparentes que não possuem informação sobre os parâmetros constitutivos da face, sendo apenas utilizadas para que o ambiente possa ser subdividido em células. A Figura 4 (d) mostra uma vista superior do ambiente, onde as seis células criadas podem ser visualizadas (“A”, “B”, “C”, “D”, “E”, e “F”).

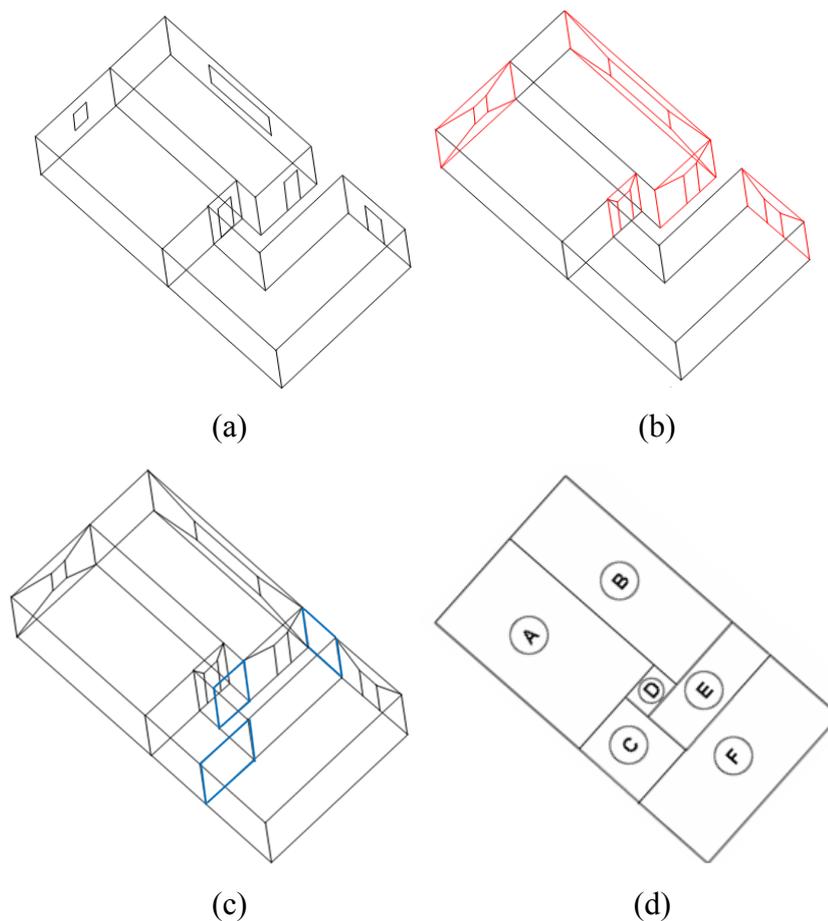


Figura 4-Subdivisão espacial. (a) Ambiente em três dimensões. (b) Ambiente formado por polígonos convexos. (c) Subdivisão espacial em células com auxílio de faces transparentes. (d) Vista superior da subdivisão espacial formada por seis células.

Nesta tese, a subdivisão espacial leva em consideração a subdivisão do ambiente no menor número de células e polígonos. Desta forma, os feixes emitidos interagem como um menor número de células e faces, assim diminuindo o número de subdivisões para representar os feixes transmitidos, refletidos e difratados nas faces e arestas das células. Desta forma, o tempo computacional utilizado no processo de emissão de feixes explicado na seção 2.4 também diminui.

A subdivisão espacial do ambiente possibilita a obtenção de uma estrutura de dados que permite identificar as faces planas que definem cada célula, assim como as faces comuns a duas células, para a determinação de células vizinhas.

Para a obtenção da estrutura de dados, foi criado um programa na linguagem de programação FORTRAN capaz de extrair as características de ambientes tridimensionais compostos por estruturas multifacetadas planas geradas no formato \*.DXF. Estes ambientes, subdivididos em células, foram definidos com o auxílio do software comercial AUTOCAD 2007. Por exemplo, a subdivisão das faces e das células apresentadas na Figura 4(c) é realizada com o auxílio deste software.

Um aspecto importante referente aos arquivos DXF é que os mesmos possuem várias entidades primitivas de desenhos, como pontos (*Point*), linhas (*Line*), etc. O programa que extrai as características do ambiente define como entidade padrão para desenho das faces que constituem o ambiente o *Polyface Mesh* [67] criado no AUTOCAD 2007 através do comando *Pface*. Isto significa que os dados correspondentes a qualquer ambiente criado em programas comerciais, como o apresentado com vista em perspectiva na Figura 5, podem ser lidos pelo programa desenvolvido. O ambiente da Figura 5 desenvolvido possui 596 vértices, 597 faces planas e convexas, e 68 células.

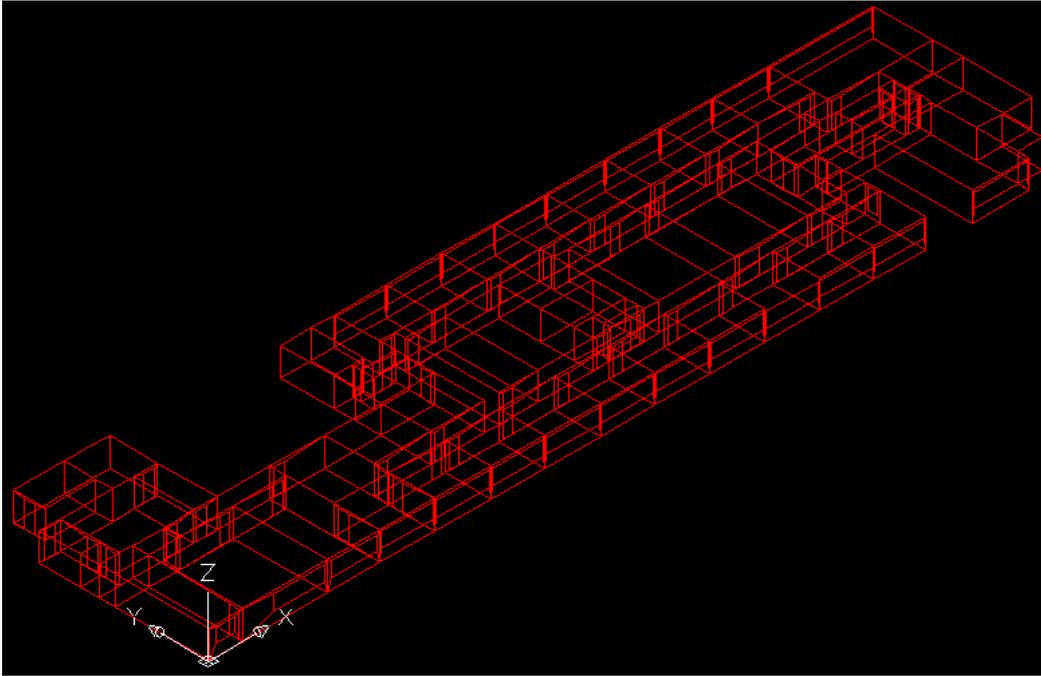


Figura 5- Ambiente virtual que representa o Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC) da PUC-Rio, composto de 596 vértices, 597 faces planas e convexas, e 68 células.

O programa é capaz de explicitar, através de comparação de faces, aquelas comuns a múltiplas células do ambiente, para que seja possível a transmissão de um feixe contido em uma determina célula para a sua respectiva célula vizinha.

Um exemplo de arquivo de saída do programa que determina a estrutura de dados que especifica a subdivisão espacial do ambiente é mostrado na Figura 6. Este arquivo possui uma estrutura de listas ordenadas sequencialmente, que se relacionam da seguinte forma:

- Uma lista de vértices, que inicia com o número total de vértices que formam o ambiente. Em seguida, observam-se as três coordenadas cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) de cada vértice do ambiente. Nesta lista, cada vértice é identificado por um índice que varia de um até o número total de vértices do ambiente.

- Uma lista de faces, que inicia com o número total de faces. Para cada face, tem-se: um número indicador ( $ind\_Visibili$ ) para saber se a face é opaca (1) ou transparente (0); o número de vértices que constituem a face ( $num\_vértice$ ); números indicadores dos vértices que a face possui ( $lst\_vert$ ) na lista de vértice encontrada anteriormente, ordenados de acordo com a regra da mão direita relativa ao vetor unitário descrito a seguir; números indicadores das células comuns à face ( $Cell1$  e  $Cell2$ ); número indicador do vetor unitário ( $ind-Vunit$ ) normal à face e orientado para fora da célula  $Cell1$ ; e um indicador ( $ind-param$ ) para uma lista que possui os parâmetros constitutivos (permissividade, permeabilidade e condutividade) e a espessura da face. Nesta lista, cada face é identificada por um índice que varia de um até o número total de faces do ambiente.
- Uma lista de células do ambiente, que inicia com o número total de células. Para cada célula do ambiente, tem-se: o número de faces que a formam ( $num\_face$ ); números indicadores das faces que formam a célula ( $lst\_faces$ ) relativos à lista de faces citada anteriormente; um indicador ( $ind-param$ ) para uma lista que possui os parâmetros constitutivos do meio no interior da célula. Nesta lista, cada célula é identificada por um número que varia de um até o número total de células do ambiente.
- Uma lista de vetores unitários, que inicia com o número de diferentes vetores unitários normais às faces encontrados no ambiente. Na sequência, temos os valores nas três direções cartesianas destes vetores.
- Uma lista de parâmetros constitutivos, que inicia com o número total de combinações de valores de parâmetros encontrados no ambiente. Em seguida, são apresentadas sequencialmente as combinações de valores de parâmetros (permissividade, permeabilidade, condutividade e espessura).

```

596 // número de vértices da lista de vértices.
//vértices Coordenada X(m) Coordenada Y(m) Coordenada Z(m)
1 0.0000 0.0000 0.0000
2 0.0000 7.6000 0.0000
3 0.0000 8.9000 0.0000
4 0.0000 10.4000 0.0000
6 1.7000 8.9000 0.0000
:
:
:
597 // número de faces da lista de faces.
// face ind_Visibilidade (1 ou 0) num_vértices lst_vert (1 num_vértices) Cell Cel2 ind_Vunút ind_param
1 1 4 394 35 177 395 1 11 4 1
2 1 4 398 48 190 399 1 12 4 1
3 1 4 402 59 201 403 1 13 4 1
5 1 4 410 76 218 411 1 15 4 1
7 0 5 110 103 245 252 253 6 2 3 2
:
:
:
68 // número de células da lista de células
// célula num_face lst_faces (1 num_FC) ind_param
1 13 101 105 106 107 352 375 104 442 443 444 3 503 504 5
3 13 109 113 114 115 354 377 112 448 449 450 5 507 508 5
4 13 113 117 118 119 355 378 116 451 452 453 6 509 510 5
6 9 132 133 134 135 136 385 22 523 524
:
:
:
6 // número de vetores unitários.
//ind_Vunút Coordenada X(m) Coordenada Y(m) Coordenada Z(m)
1 1.0000 0.0000 0.0000
2 -1.0000 0.0000 0.0000
3 0.0000 1.0000 0.0000
4 0.0000 -1.0000 0.0000
:
:
:
9 // número de parâmetros constitutivos do meio.
ind_param permissividade (f/m) permeabilidade (h/m) condutividade (h/m) espessura(m)
1 0.61 1.000 1 0.100
:
:
:

```

Figura 6- Arquivo de saída do programa que processa arquivos DXF.

## 2.4. Emissão de Feixes

O primeiro passo na emissão de feixes em um ambiente 3D é a determinação dos feixes iniciais. Estes feixes são sempre obtidos na célula que possui o transmissor. O feixe inicial é considerado um feixe estigmático, ou seja, um feixe que possui um ponto focal (vértice) que indica a origem de todos os raios no interior deste feixe.

Após obtenção dos feixes iniciais, utiliza-se a estrutura de dados vista anteriormente na seção 2.3, para se determinar a interação de um feixe inicial que incide sobre a face P de uma célula do ambiente. A interação de um feixe inicial com a face P de uma célula pode resultar em três tipos de feixes:

- transmissão, que tem em comum com o incidente somente o vértice, mas que existe na célula vizinha à anterior que com ela compartilha o polígono P.
- reflexão, construído pela imagem do feixe incidente em relação ao plano suporte do polígono P e que existe na mesma célula do feixe incidente.
- difração, construído para representar o efeito devido a uma aresta l do polígono P e que pode existir em qualquer uma das células que compartilham da mesma aresta l, com exceção da célula vizinha à anterior que com ela compartilha o polígono P.

Os feixes transmitidos e refletidos são feixes estigmáticos. Por outro lado, os difratados são astigmáticos, ou seja, feixes que possuem mais de um ponto focal, com cada foco indicando a origem de um diferente grupo de raios no interior destes feixes.

Cada um dos três tipos de feixes (transmissão, reflexão e difração) será considerado um feixe incidente sobre outra face de uma célula do ambiente, originando novos feixes resultantes da interação do feixe incidente com a sua

própria célula (feixes de reflexão), com a célula vizinha (feixes de transmissão), ou da interação de um feixe com uma aresta da célula (feixes de difração). Estes novos feixes são traçados através do ambiente até que um critério de parada pré-definido seja encontrado.

A utilização de feixes incidentes estigmáticos e astigmáticos sobre os obstáculos do ambiente é baseado nos trabalhos desenvolvidos por Funkhouser et al. [31]-[32],[38],[42],[45]. No entanto, nestes trabalhos não se explicava detalhadamente a maneira pela qual se obtinha os feixes resultantes da interação dos mesmos com os obstáculos, explicando somente que os feixes resultantes eram obtidos da interseção dos feixes incidentes com as faces das células. Assim, nesta Tese, para que os feixes resultantes sejam obtidos, algoritmos próprios foram desenvolvidos.

O algoritmo para a obtenção dos feixes resultantes é explicado nas seções 2.4.1 a 2.4.9.

#### **2.4.1 Feixes Iniciais**

Os feixes iniciais possuem como vértice a posição do transmissor e como bases as faces poligonais da célula que o contém. Desta forma, o número de feixes iniciais é igual ao número de polígonos convexos da célula que contém o transmissor.

Seja o ambiente mostrado na Figura 7 (a), representado por uma única célula com uma porta e uma janela, que contém um transmissor localizado no seu centro. A subdivisão das faces, formada por treze polígonos convexos, está mostrada na Figura 7(b). A Figura 7 (c) ilustra os feixes iniciais correspondentes a seis polígonos convexos. Os outros sete feixes foram omitidos para que a visualização fosse facilitada.

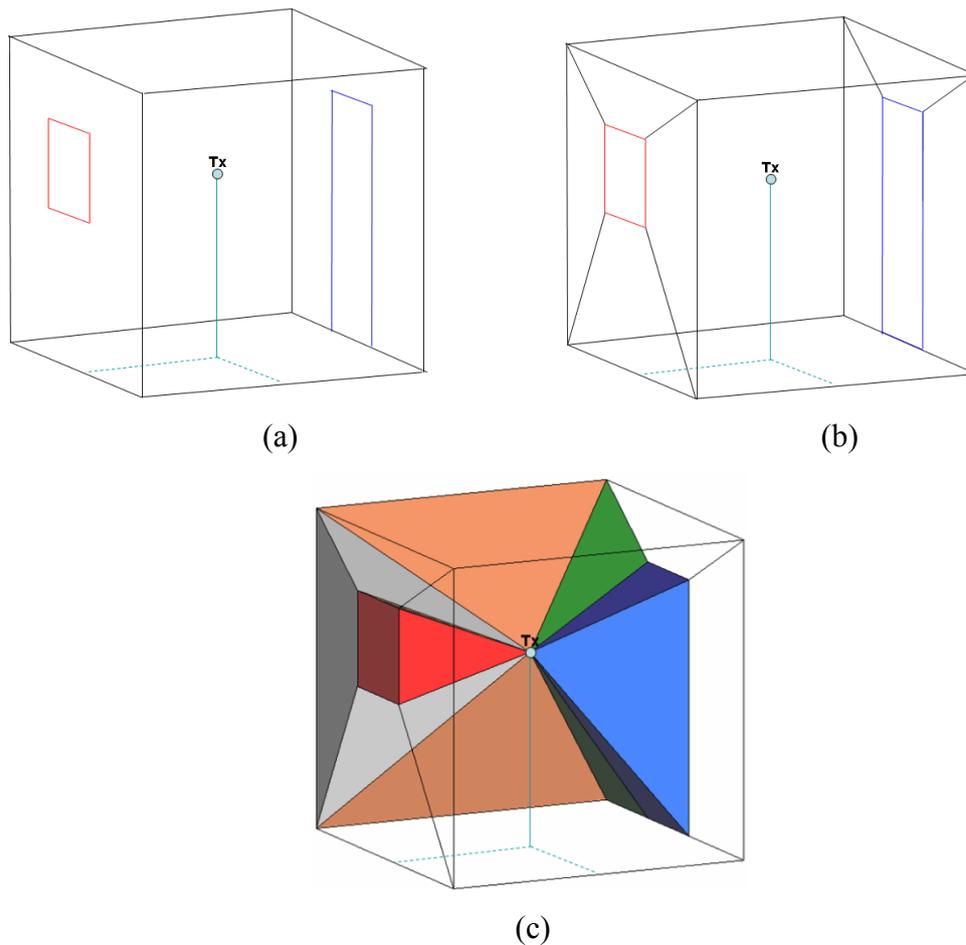


Figura 7- Emissão dos feixes iniciais. (a) Ambiente analisado. (b) Subdivisão espacial do ambiente. (c) Feixes iniciais emitidos no ambiente.

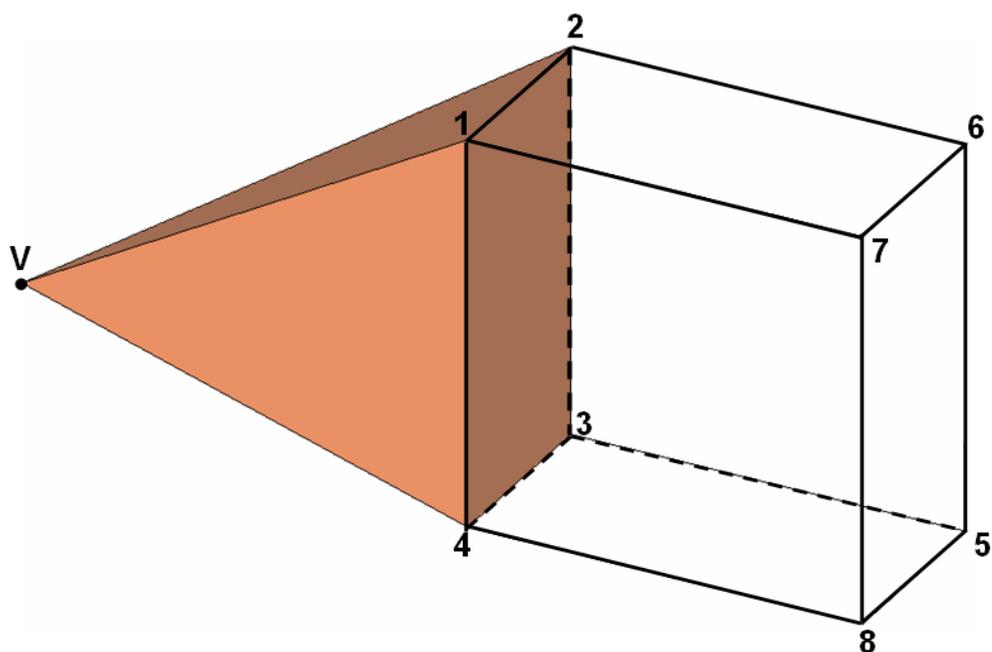
#### 2.4.2 Algoritmo de Transmissão de um Feixe

Seja um transmissor emitindo um feixe de vértice “V” em uma célula vizinha à de interesse. Este feixe, chamado de original, irá gerar outros, chamados de resultantes. A Figura 8 (a) mostra o feixe original de incidência.

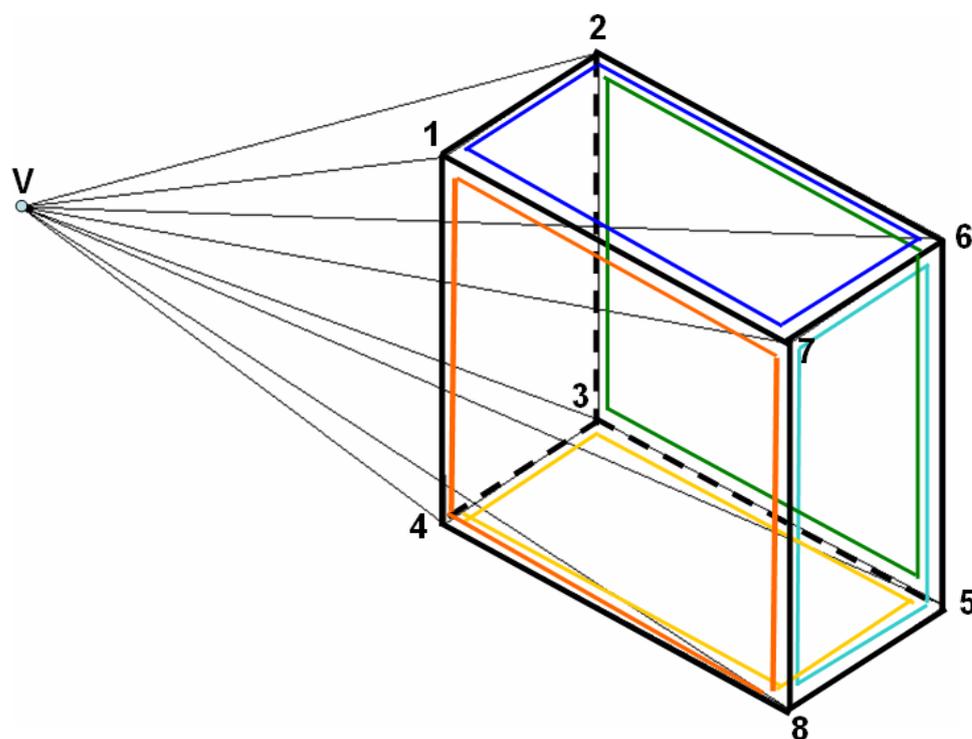
Para determinar os feixes de transmissão resultantes da interação de um feixe original com vértice “V” e base dada pelo polígono 1234 com a célula vizinha que compartilha a face comum, alguns passos são seguidos:

- 1) Identificar as demais faces da célula vizinha. A Figura 8 (b), mostra estas faces (polígonos 1487, 7856, 6532, 8435 e 7621).

- 2) Projetar estas faces no plano que contém a base do feixe original. As projeções são obtidas através de algoritmo para a interseção entre reta e plano [57]. Estas projeções dão origem a novos polígonos. Por exemplo, os polígonos 1487, 7856, 6532, 8435 e 7621 originaram os polígonos  $1'4'8'7'$ ,  $7'8'5'6'$ ,  $6'5'3'2'$ ,  $8'4'3'5'$  e  $7'6'2'1'$ , respectivamente, como ilustrado na Figura 9 (a).
- 3) Determinar as interseções entre os polígonos resultantes da projeção e a base do feixe inicial. As interseções entre os polígonos convexos foram obtidas através do método de O' Rourke [58]. Na Figura 9 (b), estas interseções deram origem aos polígonos  $A'B'5'6'$ ,  $A'6'2'1'$ ,  $6'5'3'2'$  e  $B'4'3'5'$ .
- 4) Determinar a projeção dos polígonos de interseção sobre suas respectivas faces originais. Estas projeções serão as bases dos feixes de transmissão resultantes da transmissão do feixe original para a célula vizinha. Como ilustrado na Figura 9 (b), esta projeção final dá origem aos polígonos  $A''B''5''6''$ ,  $1''A''6''2''$ ,  $2''3''5''6''$  e  $4''3''5''B''$ .

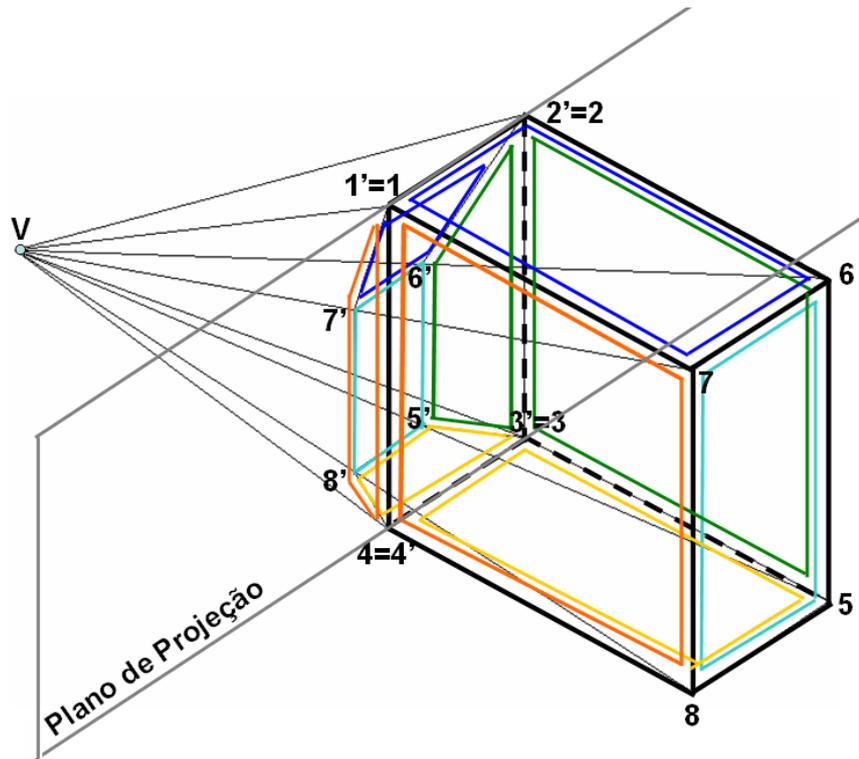


(a)

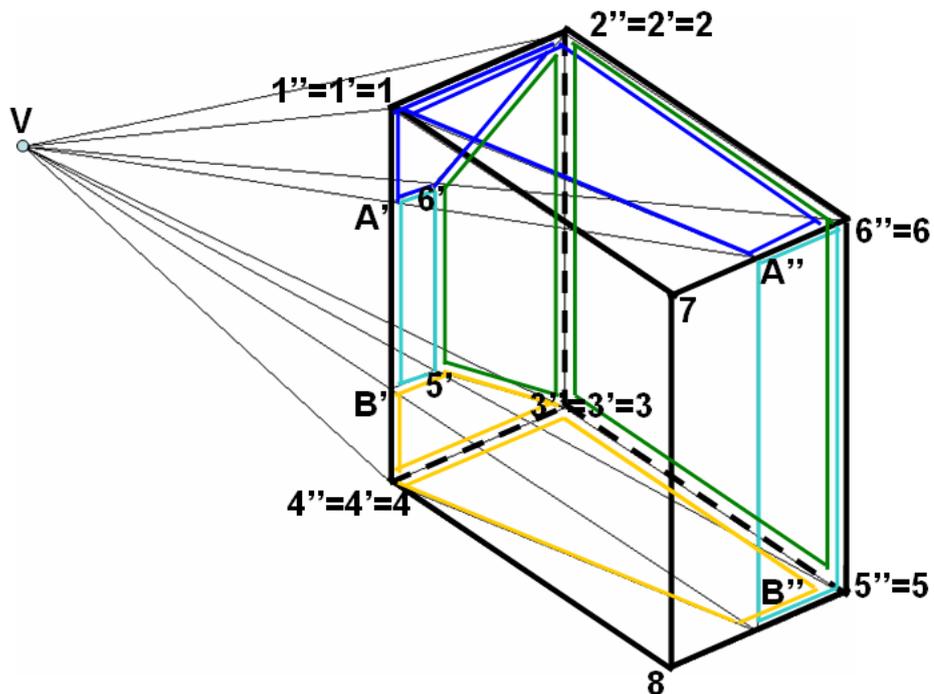


(b)

Figura 8- Transmissão de Feixes. (a) Feixe de incidência (feixe original). (b) Faces da célula vizinha.



(a)



(b)

Figura 9-Transmissão de Feixes. (a) Projeção das faces vizinhas sobre o plano e projeção. (b) Polígonos de interseção e base dos feixes resultantes.

Assim, tem-se que a transmissão de um feixe pode criar novos feixes na célula vizinha que compartilha a face que contém a base do feixe original. Os feixes resultantes possuem o mesmo vértice “V” do feixe original e bases localizadas sobre as demais faces da célula vizinha. Entretanto, somente as partes dos feixes resultantes da transmissão contidas na célula vizinha são consideradas. Esta afirmação pode ser visualizada na Figura 10 (a), que mostra a incidência do feixe original sobre a célula vizinha e nas Figuras 10 (b) a 10 (e), que mostram os quatro feixes resultantes. A Figura 10 (f) mostra, simultaneamente, o feixe original e os feixes resultantes.

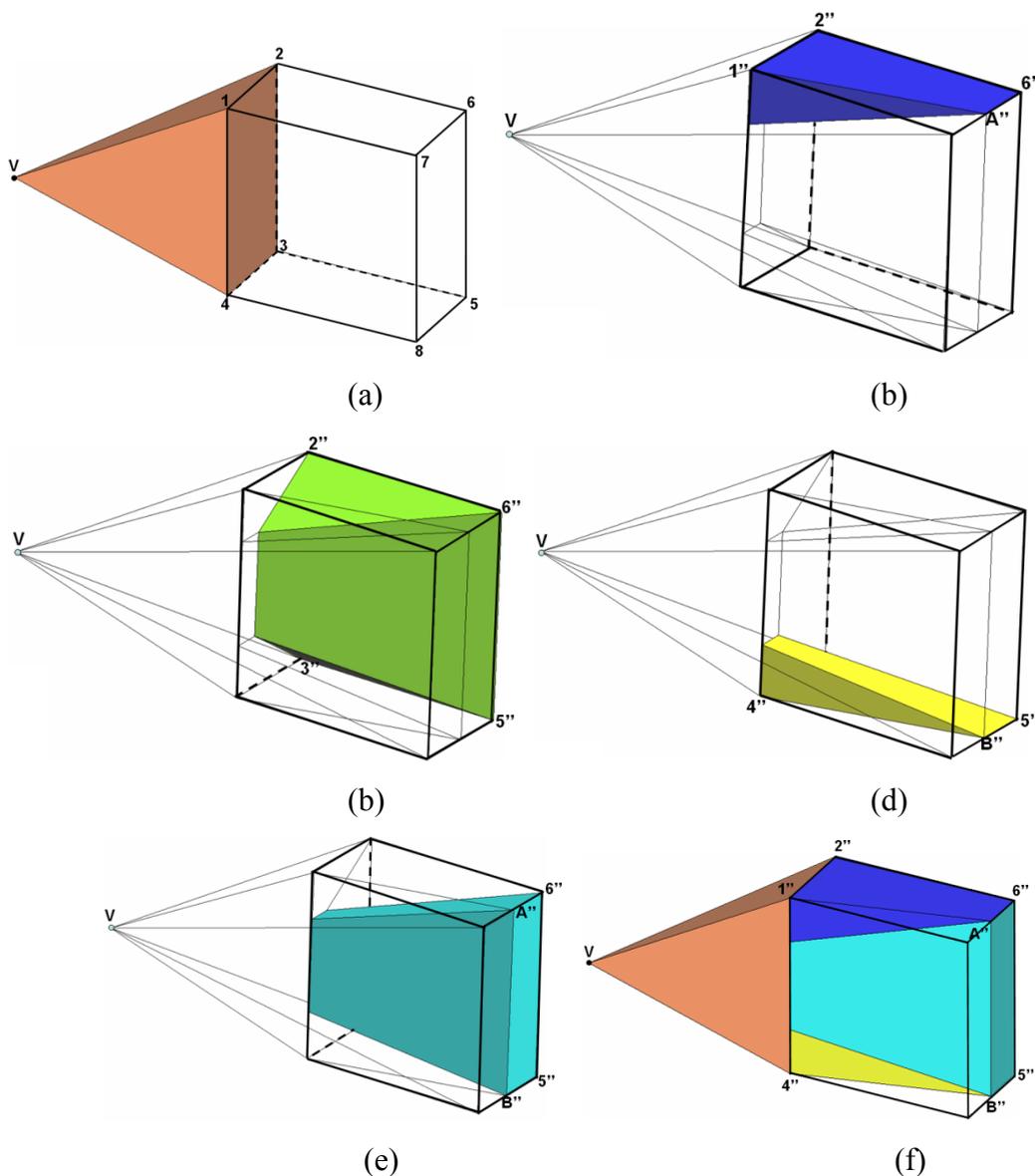


Figura 10 – Algoritmo de transmissão de feixes na célula vizinha. (a) Feixe inicial incidindo sobre célula vizinha. (b)-(e) Feixes transmitidos na célula vizinha. (f) Feixe inicial e feixes transmitidos .

### 2.4.3 Algoritmo de Reflexão de um Feixe

Considerando o feixe original mostrado na Figura 11, os feixes resultantes da reflexão são obtidos por intermédio dos seguintes passos:

- 1) A imagem do vértice do feixe original em relação à sua base é obtida. Na Figura 11, os dois feixes são visualizados: original e um temporário, obtido a partir da aplicação do procedimento ao primeiro.
- 2) Deve-se agora aplicar os passos 1, 2, 3 e 4 da seção 2.4.2 ao feixe temporário, para que possamos obter os feixes resultantes da reflexão do feixe original.

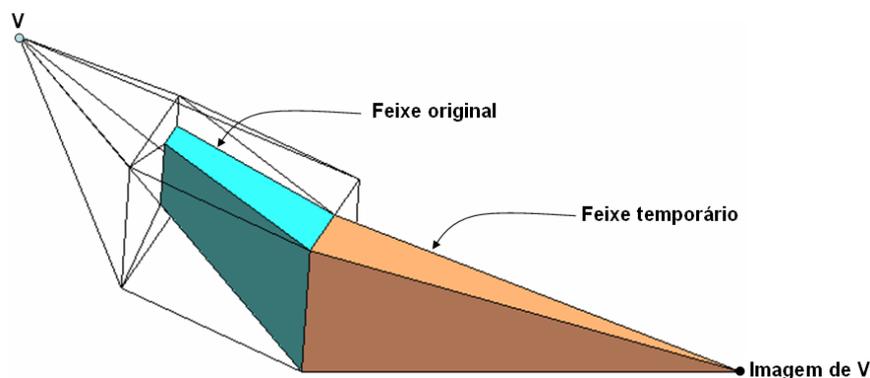


Figura 11- Feixe original e feixe temporário.

Portanto, a reflexão de um feixe em uma face da célula em que se encontra pode originar novos feixes, na mesma célula. Os feixes resultantes da reflexão possuem vértice comum, imagem daquele do feixe original em relação à face de reflexão (que contém sua base). As bases dos feixes resultantes da reflexão estão localizadas sobre as demais faces da célula, diferentes daquela responsável pela reflexão.

A Figura 12 apresenta um cenário utilizado no módulo do programa que implementa o algoritmo de transmissão e reflexão de feixes. A Figura 13 ilustra a emissão de feixes de transmissão e reflexão no cenário apresentado na Figura 12.

O transmissor está localizado no vértice do feixe original observado na Figura 13 (a), em uma das células do ambiente. A Figura 13 (b) ilustra o feixe de transmissão resultante obtido com base sobre uma das paredes laterais da célula. Feixes refletidos com base sobre face lateral, solo e teto obtidos do feixe temporário (imagem do feixe gerado na Figura 13 (b)) são ilustrados nas Figuras 13 (c), 13 (d) e 13 (e), respectivamente. A Figura 13 (f) ilustra quatrocentos feixes transmitidos e refletidos obtidos. Os polígonos vermelhos representam as bases dos feixes e os segmentos de retas azuis conectam a base de cada feixe ao seu vértice.

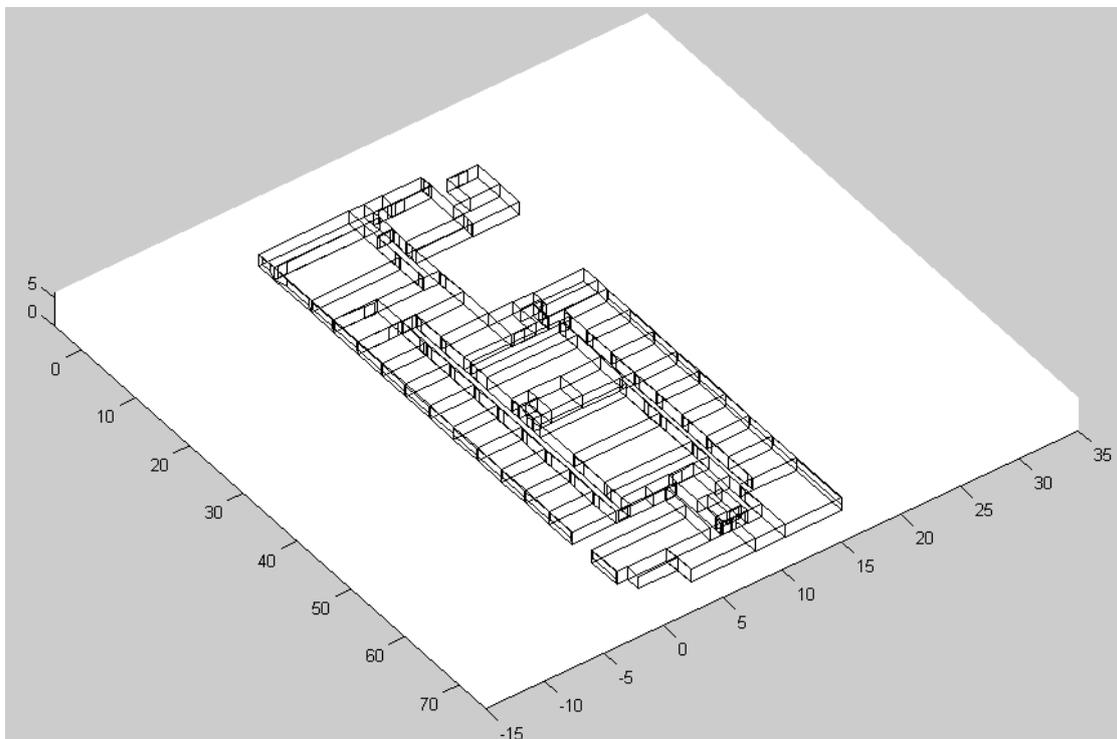


Figura 12-Ambiente de emissão dos feixes.

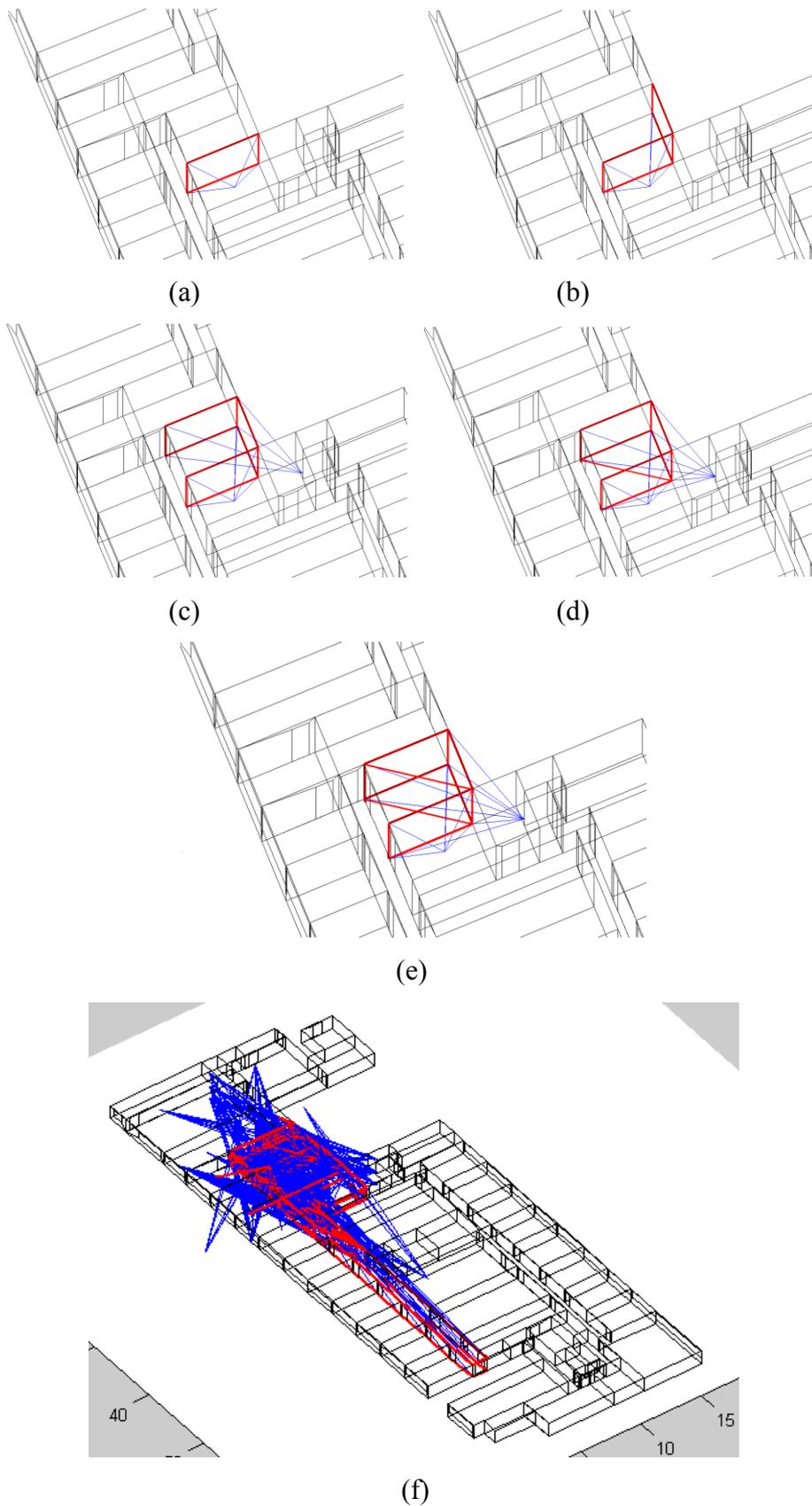


Figura 13- Feixes de transmissão e reflexão. (a) Um feixe original. (b) Dois feixes. (c) Três feixes. (d) Quatro feixes. (e) Cinco feixes. (f) Quatrocentos feixes.

#### 2.4.4 O Feixe de Difração

Para cada feixe incidente sobre uma aresta da célula formada pela interseção de faces não coplanares ou sobre arestas comuns a faces que possuem diferentes parâmetros constitutivos do meio, existirá sempre um feixe de difração. A Figura 14 mostra um feixe (na cor azul) incidindo sobre uma aresta. Uma parte do feixe é transmitida, originando dois feixes de transmissão (nas cores laranja e azul) e outra parte do feixe é refletida (na cor roxa). Um feixe de difração será criado no interior dos dois cones de Keller que têm os vértices A e B e eixo comum definido pela reta que une os dois pontos, conforme ilustrado na Figura 15, onde o feixe de incidência está na cor azul e o de difração na cor cinza, sendo a aresta apresentada na cor vermelha tracejada.

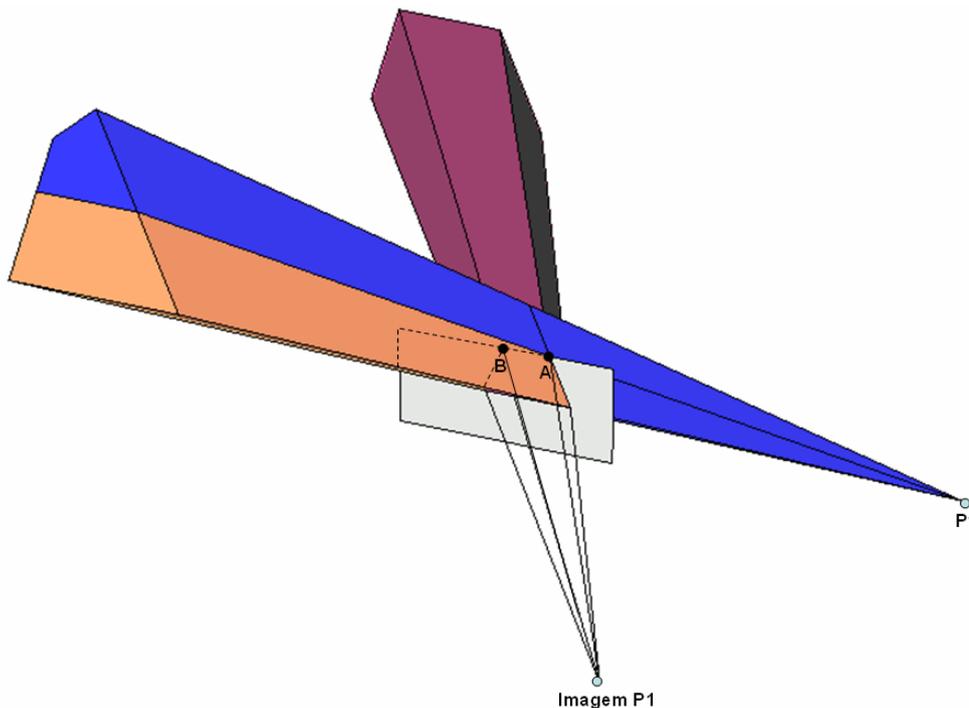


Figura 14- Emissão de feixe sobre aresta.

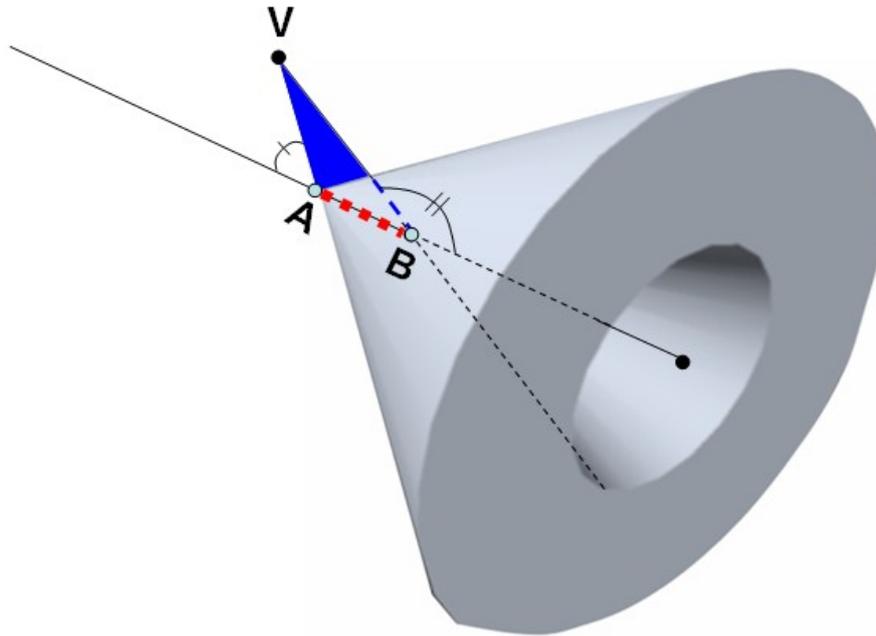


Figura 15- Feixe de difração de Keller.

Um feixe incidente que atinge uma aresta pode originar dois tipos de feixe de difração, dependendo do ângulo de incidência do feixe sobre a aresta.

Na primeira situação, quando o plano ortogonal ao segmento de reta AB que contém o vértice do feixe interceptar a reta suporte do segmento em ponto externo ao mesmo, teremos um feixe de Keller limitado ao semi-espço oposto ao que contém o vértice, como mostrado na Figura 15.

Na segunda situação, quando o plano ortogonal ao segmento de reta AB que contém o vértice do feixe interceptar a reta suporte do segmento em ponto interno ao mesmo, tem-se um feixe de Keller irradiando em todas as direções, com exceção das situadas nos interiores de dois cones de eixo comum, vértice A e B e situados em semi-espços opostos. A Figura 16 (a) mostra a incidência de um feixe 2D (em azul) sobre aresta (cor vermelha) e o feixe de difração resultante (cor cinza). A Figura 16 (b) mostra o feixe de difração 3D.

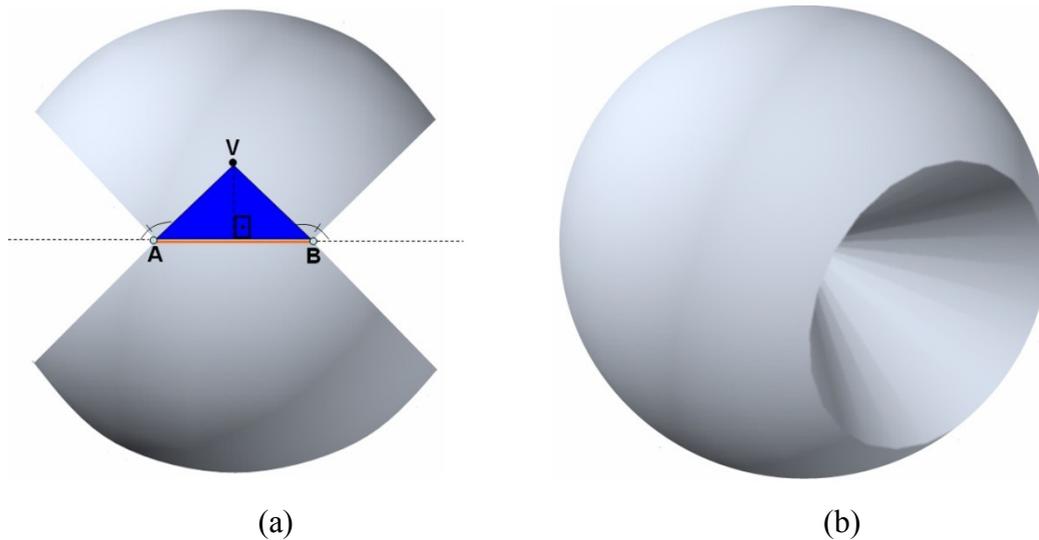


Figura 16- Feixe de difração. (a) Irradiação em 2D. (b) Irradiação em 3D.

#### 2.4.5 Representação do Feixe de Difração

Para que haja a diminuição de tempo de processamento, evitando cálculos complexos relacionados a interações de feixes de difração com o ambiente, esta tese propõe uma representação própria para os mesmos. Para tanto, considera-se a difração somente em arestas verticais (arestas perpendiculares a planos paralelos que contém o teto e solo do ambiente, respectivamente), como mostrado na Figura 17. A difração em arestas horizontais (arestas paralelas aos planos que contém o teto e solo do ambiente, respectivamente) não é considerada.

Seja um feixe que incide sobre uma aresta representada pelo segmento de reta  $E_1E_2$ , atingindo-a apenas no segmento de reta  $V_1V_2$ . Tem-se sempre um feixe difratado delimitado pelo teto ou solo do ambiente. A Figura 18 apresenta um feixe de difração de Keller com vértices  $V_1$  e  $V_2$ .

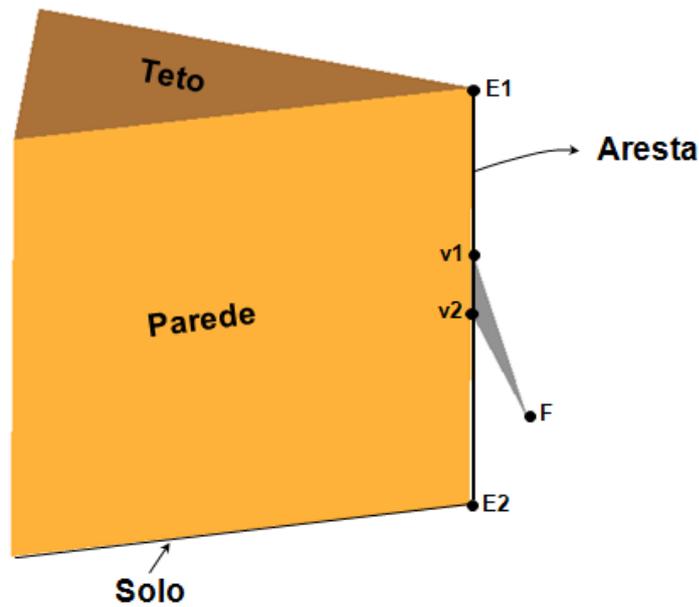


Figura 17- Feixe de incidência que atinge a aresta do ambiente no segmento de reta  $V_1V_2$ .

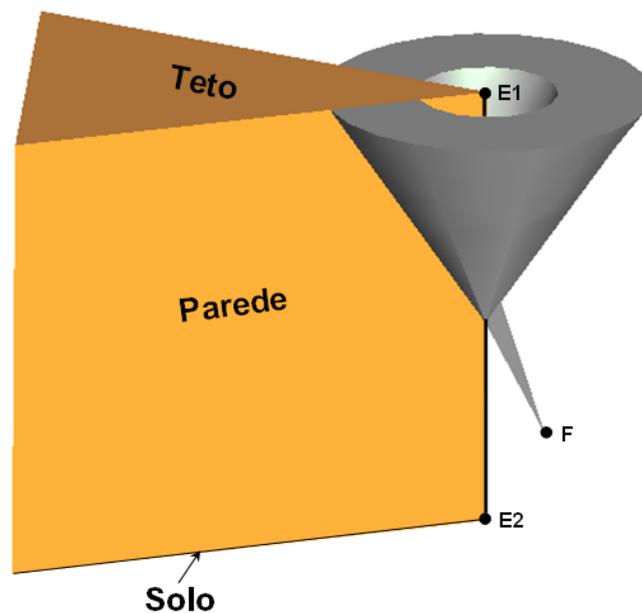


Figura 18- Feixe de difração de Keller originado pelos vértices que delimitam o segmento de reta  $V_1V_2$  mostrado na Figura 17.

Nesta tese, com objetivo de evitar a construção de feixes difratados como o mostrado na Figura 18, assim como a de feixes resultantes da interação deste feixe com o ambiente, o feixe difratado será superestimado. Ao invés de um feixe de incidência que atinge os pontos  $V_1$  e  $V_2$ , será suposto um feixe que incide sobre

os pontos  $E_1$  e  $E_2$  que definem as extremidades da aresta, localizadas no teto e no solo, respectivamente. Desta forma, o feixe difratado será definido em todo o espaço, com as exceções dos cones azuis definidos acima e abaixo do solo, como mostrado na Figura 19.

Quando um feixe incide sobre uma aresta vertical de um objeto contido no interior de uma célula, o procedimento utilizado para representar o feixe difratado nesta aresta é similar ao procedimento explicado no parágrafo anterior. Isto é, ao invés de se considerar um feixe difratado especificado pela aresta real formada pelos pontos  $V_1$  e  $V_2$ , será suposto um feixe superestimado definido pela aresta virtual delimitada pelos pontos  $E_1$  e  $E_2$  resultantes das interseções do prolongamento da aresta real com o teto e o solo, respectivamente.

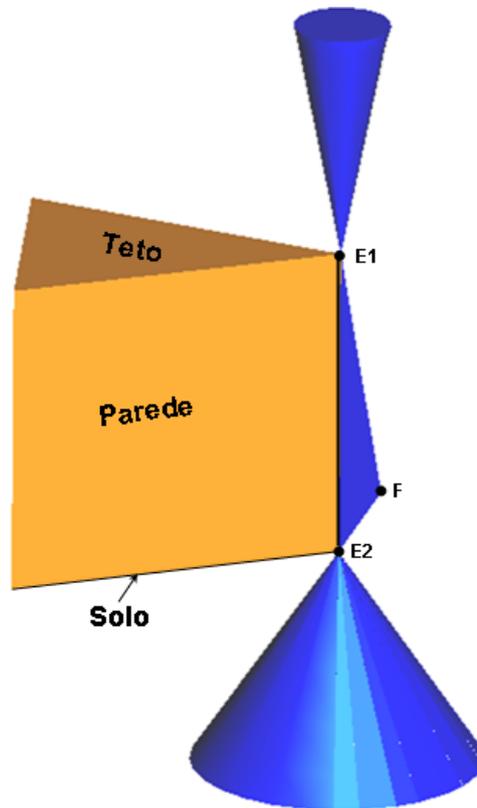


Figura 19- Volume geométrico dado por cones onde o feixe de difração (oriundo do feixe de incidência suposto) não se propaga. O feixe difratado se propaga em todo espaço geométrico com exceção dos interiores dos cones e da Figura geométrica de coloração laranja.

Os feixes difratados situados no exterior da região de interesse (abaixo do solo e acima do teto) não são determinados. Isto é, serão considerados somente os feixes difratados situados no interior do ambiente (acima do solo e abaixo do teto), o que possibilita a utilização de uma subdivisão baseada na própria estrutura das células que constituem o ambiente. O feixe difratado será definido pelo vértice  $F$  do feixe incidente, pela aresta  $E_1E_2$  e por base dada por uma das faces daquela célula que contém a aresta (desde que o plano suporte da face não contenha a aresta). As Figura 20 (a) e 20 (b) mostram visões 2D e 3D de um exemplo de feixes difratados gerados em um ambiente com duas células vizinhas (A e B) à aresta  $E_1E_2$  do prisma de base triangular laranja. A face comum às células A e B não pode ser usada para gerar um feixe difratado. A Figura 20 (c) e (d) mostram os feixes difratados gerados (coloração verde) com vértices  $E_1$  e  $E_2$  e bases sobre as faces planas convexas que delimitam a célula A. A Figura 20 (e) mostra os feixes difratados de coloração verde e vermelha gerados nas células A e B, respectivamente.

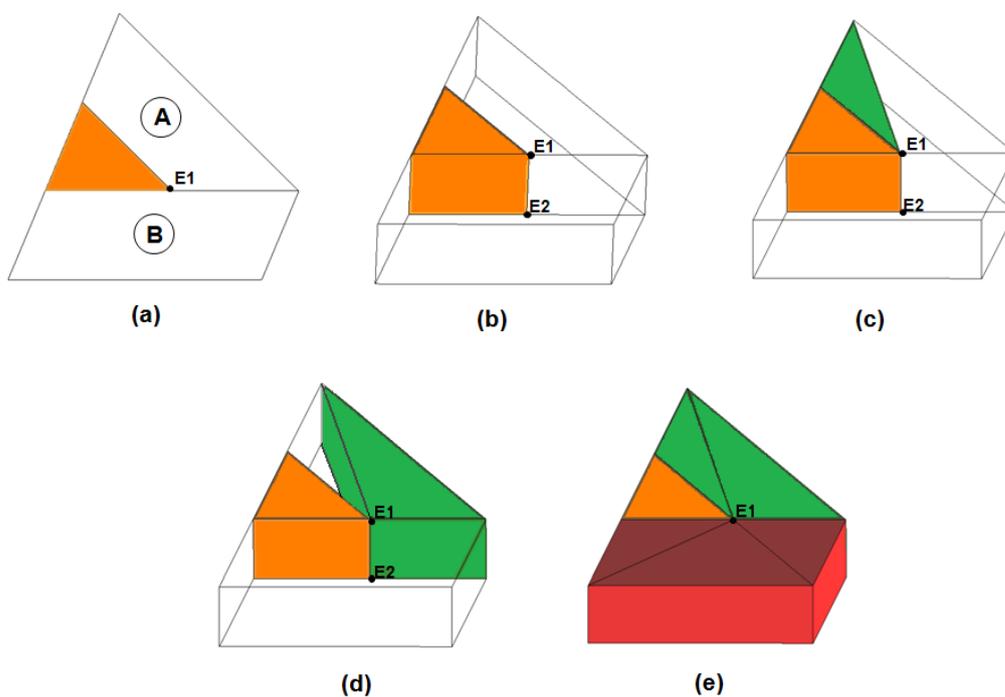


Figura 20- Feixes difratados gerados pela aresta  $E_1E_2$  do prisma de base triangular laranja em um ambiente com duas células vizinhas (A e B). (a) ambiente 2D. (b) ambiente 3D. (c), (d), feixes gerados na célula A. (e) feixes gerados nas células A e B.

Os feixes de difração que se propagam em direção ao solo e ao teto possuem formatos geométricos complexos, possuindo bases não convexas, resultantes da interseção dos cones mostrados na Figura 19, e as faces da célula que representam o solo ou o teto, respectivamente. No entanto, como o método de traçado de feixes proposto supõe feixes que possuem bases convexas, estes feixes serão também superestimados em relação a suas bases, representadas pelas faces da célula que definem o teto ou o solo.

É importante salientar que a superestimação das bases dos feixes difratados e do feixe de incidência que atinge a aresta será descartada durante o processo de obtenção dos percursos de propagação apresentado na seção 2.5.2, desde que seja armazenada a informação original dos pontos  $V_1$  e  $V_2$  que atingem a aresta (ver Figura 17). Esta aproximação é utilizada somente com o objetivo de facilitar a representação dos feixes difratados, assim como para facilitar os cálculos necessários para a obtenção dos raios internos a estes feixes que partem do transmissor e atingem o receptor, não ocasionando erros de duplicação ou perda de raios de difração na recepção.

#### **2.4.6 Feixe de Difração de Primeira Ordem**

Um feixe é considerado de difração de primeira ordem quando o mesmo é um feixe difratado por uma única aresta. Nesta tese, qualquer feixe difratado de primeira ordem será representado unicamente pelos seus vértices  $E_1$  e  $E_2$ , pela posição  $F$  do transmissor e pela base do feixe (face plana convexa de uma célula), como mostrado na Figura 21. Com estas informações relativas ao feixe de difração, é possível fazer sua transmissão e reflexão no ambiente.

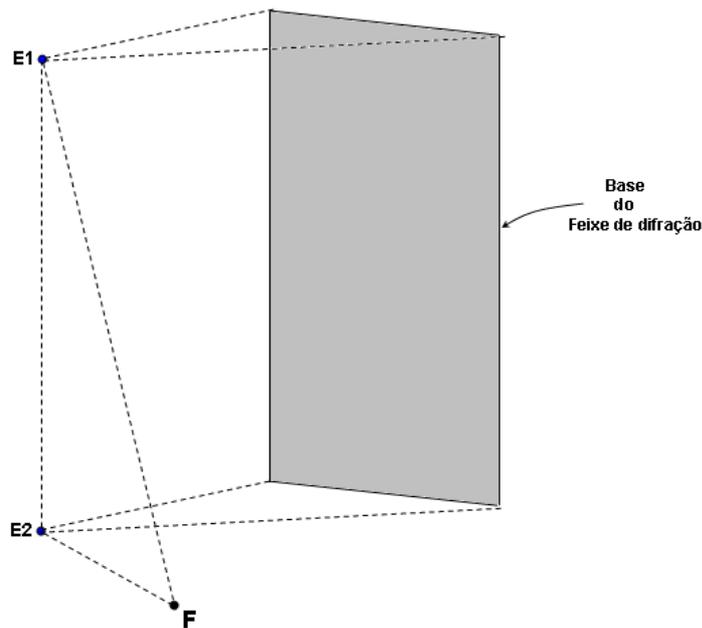


Figura 21- Feixe de difração de primeira ordem.

Pode-se dizer que qualquer ponto de observação  $P_o$  é atingido por um feixe difratado se o ponto de observação estiver contido no feixe e existir um ponto de difração  $T_1$  sobre a aresta  $E_1E_2$  tal que os segmentos  $T_1F$  e  $T_1P_o$  definam ângulos iguais com a aresta, como mostrado na Figura 22.

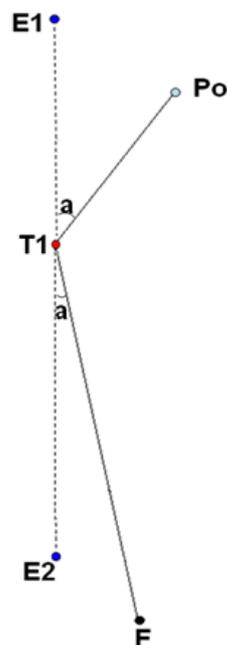


Figura 22- Raio definido pelo segmento de reta que sai de  $F$  e atinge o ponto  $T_1$  (contido no feixe de incidência) e pelo segmento de reta que sai de  $T_1$  até o ponto  $P_o$  (contido no feixe difratado).

O procedimento implementado para determinar se um ponto é atingido ou não por um feixe difratado de primeira ordem, baseado na condição citada no parágrafo anterior, demonstrada com o auxílio da Figura 23, utiliza os seguintes passos:

- 1) Determinar uma circunferência  $C_1$  oriunda da rotação do ponto F em torno do eixo que contém os pontos  $E_1$  e  $E_2$ .
- 2) Determinar a projeção  $P_o'$  do ponto  $P_o$  sobre o plano que contém a circunferência  $C_1$ . Criar um segmento de reta que saia de  $P_o'$ , obrigatoriamente corte a aresta  $e$ , em seguida, atinja a circunferência  $C_1$ . A interseção do segmento de reta com a circunferência determina o ponto  $P_1$ .
- 3) Criar um segmento de reta entre os pontos  $P_1$  e  $P_o$ . O ponto de interseção  $T_1$  entre o segmento de reta e a aresta representa o ponto de difração.
- 4) Se o ponto de interseção  $T_1$  estiver compreendido entre os vértices  $E_1$  e  $E_2$  da aresta, o ponto de observação é atingido por um feixe de difração de primeira ordem.

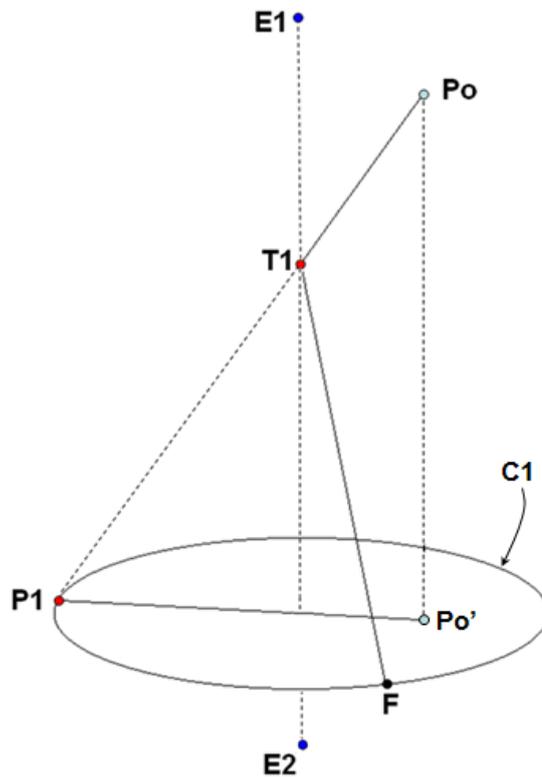


Figura 23- Construção que verifica se ponto de observação  $P_o$  está contido ou não em um feixe de difração de primeira ordem definido pela fonte  $F$  e pela aresta  $E_1E_2$ .

#### 2.4.7

#### Algoritmo de Transmissão e Reflexão dos Feixes de Difração de Primeira Ordem

Um feixe de difração de primeira ordem representado pelos vértices  $E_1$  e  $E_2$ , posição da fonte  $F$  e base dada pelo polígono 1234 incide sobre uma célula vizinha (ver Figura 24). Considerando que este feixe irá gerar outros, chamar-se-á o feixe incidente de feixe de difração original de primeira ordem e os originados de feixes de difração transmitidos ou refletidos de primeira ordem.

Para determinar os feixes de difração transmitidos de primeira ordem, os seguintes passos devem ser realizados:

- 1) Identificar as demais faces da célula vizinha. A Figura 24, ilustra estas faces (dadas pelos polígonos 1485, 2376, 7856, 1562 e 4873).

- 2) Cada vértice das faces da célula vizinha será considerado um ponto de observação, a ele sendo aplicado o procedimento da seção 2.4.6, para determinar se é atingido ou não por um feixe difratado de primeira ordem. Por exemplo, este procedimento determina os pontos  $P_1$  e  $P_2$  na circunferência oriunda da rotação do ponto F (Figura 25).
  
- 3) Projetar as demais faces da célula vizinha no plano de projeção (plano que contém a base do feixe incidente sobre a célula). Para isso, cria-se um segmento de reta entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$  (por exemplo) e os vértices correspondentes da célula vizinha. Os pontos resultantes das interseções dos segmentos de reta com o plano de projeção dão origem a novos polígonos, chamados polígonos projetados. Por exemplo, os polígonos 1485, 2376, 7856, 1562 e 4873 originaram os polígonos projetados  $1'4'8'5'$ ,  $2'3'7'6'$ ,  $7'8'5'6'$ ,  $1'5'6'2'$  e  $4'8'7'3'$ , respectivamente, como ilustrado na Figura 25.
  
- 4) Determinar se existem interseções entre a base do feixe de difração e os polígonos projetados. Caso existam, os novos feixes difratados de transmissão serão definidos pelos vértices  $E_1$  e  $E_2$ , posição da fonte F e bases dadas pelos polígonos que representam as faces da célula vizinha. Por exemplo, existem interseções entre os polígonos projetados  $1'4'8'5'$ ,  $2'3'7'6'$ ,  $7'8'5'6'$ ,  $1'5'6'2'$  e  $4'8'7'3'$  e o polígono 1234 da base do feixe. Desta forma, serão criados novos feixes difratados de transmissão com bases dadas pelas faces 1485, 2376, 7856, 1562 e 4873, respectivamente, como mostrado na Figura 26.

O feixe de transmissão resultante é, novamente, um feixe superestimado, pois possui base dada pelo exato polígono que representa a face da célula vizinha, diferente daquela do processo de transmissão mostrado na seção 2.4.2.

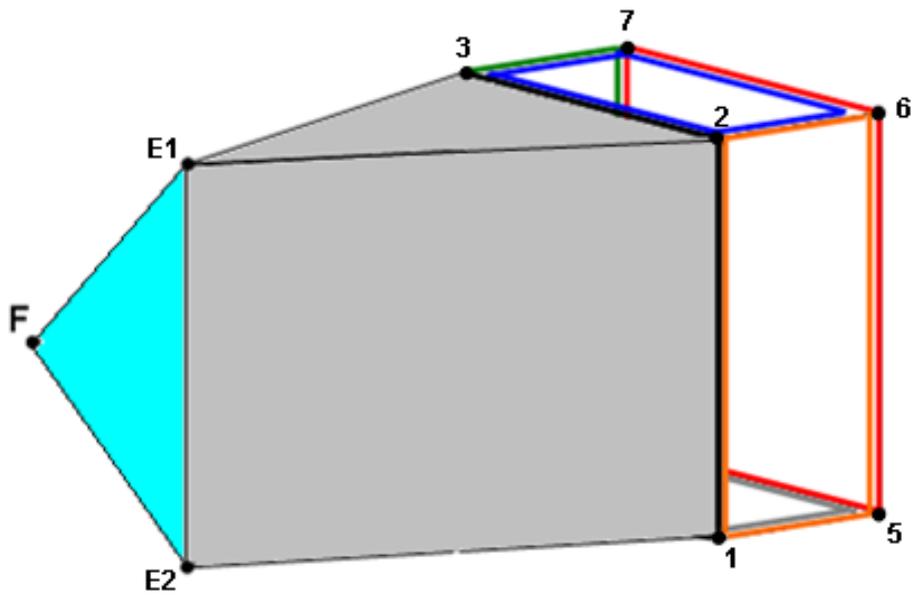


Figura 24- Feixe de difração de primeira ordem que incide sobre célula vizinha.

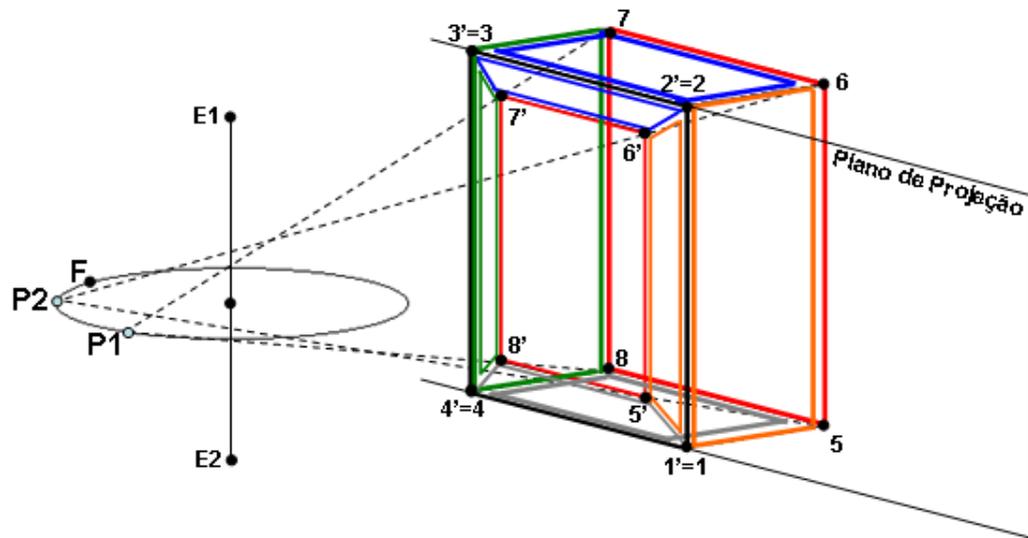


Figura 25- Projeções das faces da célula vizinha sobre o plano que contém a base do feixe de difração de primeira ordem.

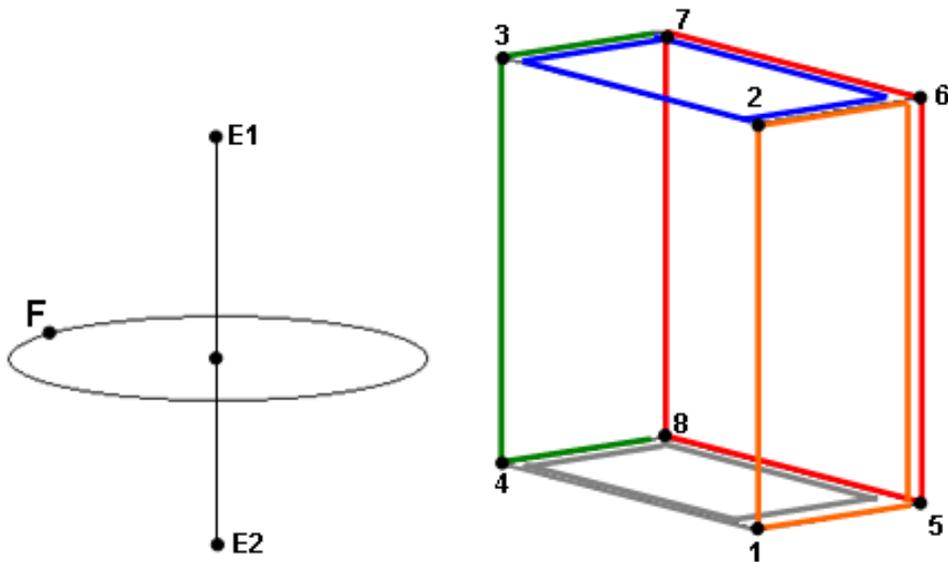


Figura 26- Fonte F, vértices  $E_1$  e  $E_2$ , e bases que definem os novos feixes de difração transmitidos de primeira ordem para a célula vizinha.

Os feixes de difração refletidos de primeira ordem são obtidos através da incidência de um novo feixe de difração, chamado de temporário, sobre a célula que contém o feixe de difração original de primeira ordem. O feixe temporário é obtido pela imagem dos vértices  $E_1$  e  $E_2$ , da posição da fonte F do feixe original em relação à sua base, como mostrado na Figura 27. Os mesmos quatro passos mostrados no início desta seção são utilizados, considerando o feixe de difração temporário para obtenção de novos feixes. Estes feixes, chamados de feixes de difração refletidos de primeira ordem, são definidos pelos vértices  $E_1'$  e  $E_2'$  (imagem dos vértices  $E_1$  e  $E_2$ ), posição  $F'$  da imagem da fonte F e bases dadas pelas faces da célula que contém o feixe de difração original.

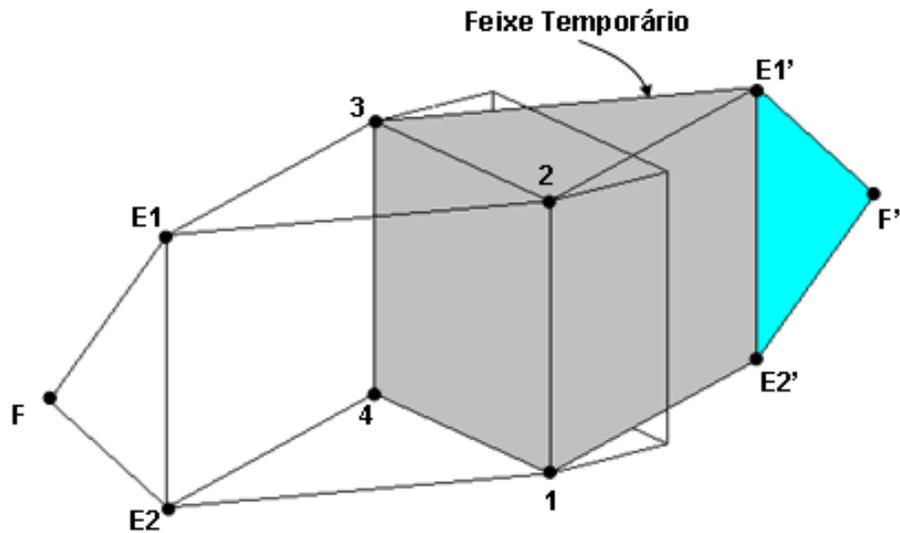


Figura 27- Feixe temporário utilizado para obtenção dos feixes de difração refletidos de primeira ordem

#### 2.4.8 Feixes de Difração de Segunda Ordem

Para obtenção do feixe de difração de segunda ordem, é necessário que um feixe de primeira ordem atinja uma segunda aresta, como mostrado na Figura 28. Um feixe de difração de segunda ordem pode ser representado unicamente pelos seus vértices  $E_1$  e  $E_2$  da primeira aresta, pelos vértices  $E_3$  e  $E_4$  da segunda aresta, pela posição  $F$  do transmissor e pela base do feixe originado na segunda aresta (dada pela face plana convexa de uma célula). A partir destas informações, é possível a obtenção de feixes de difração transmitidos e refletidos de segunda ordem.

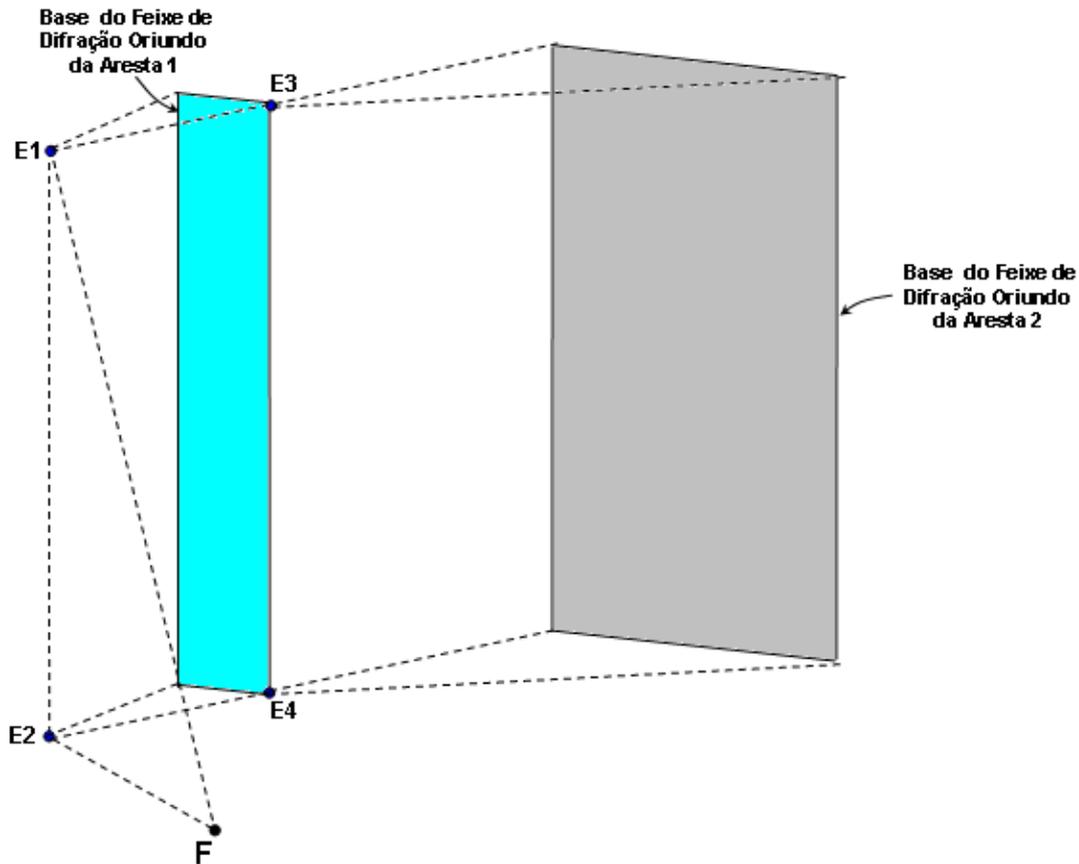


Figura 28- Obtenção do feixe de difração de segunda ordem.

Para determinar se um ponto está contido ou não em um feixe difratado de segunda ordem, foi utilizado o processo descrito com auxílio da Figura 29, que consiste dos seguintes passos:

- 1) Determinar as circunferências  $C_1$ , oriunda da rotação do ponto F em torno do eixo que contém os vértices  $E_1$  e  $E_2$ , e  $C_2$ , oriunda da rotação do ponto de observação  $P_0$  em torno do eixo que contém os vértices  $E_3$  e  $E_4$ .
- 2) Determinar o ponto auxiliar  $P_A'$ , representado pela interseção da aresta  $E_3E_4$  e o plano que contém a circunferência  $C_1$ . Determinar o ponto auxiliar  $P_A''$ , representado pela interseção da aresta  $E_1E_2$  e o plano que contém a circunferência  $C_2$ .

- 3) Traçar a reta que contém o ponto  $P_A'$  e o centro do círculo  $C_1$ . Determinar a interseção  $P_1$  da reta com a circunferência (sendo adotada a solução que mantém o centro do círculo  $C_1$  no interior do segmento de reta  $P_A'P_1$ ).
- 4) Aplicar o passo 3) ao ponto  $P_A''$  e ao centro do círculo  $C_2$ , de modo a determinar o ponto  $P_2$ .
- 5) Criar a reta que contém os pontos  $P_1$  e  $P_2$ . Os pontos de interseção  $T_1$  e  $T_2$  entre a reta e as arestas  $E_1E_2$  e  $E_3E_4$ , respectivamente, representam os pontos de difração do raio que parte do transmissor e atinge o ponto de observação.
- 6) O ponto de observação estará contido no feixe de difração de segunda ordem se os dois pontos de interseção  $T_1$  e  $T_2$  estiverem situados nos interiores das arestas  $E_1E_2$  e  $E_3E_4$ , respectivamente.

É importante ressaltar que, nesta tese, com o objetivo de simplificar o modelo de traçado de feixes são considerados somente feixes de difração de segunda ordem que ocorram logo após uma difração de primeira ordem. Ou seja, não serão considerados feixes de transmissão ou reflexão entre os feixes difratados.

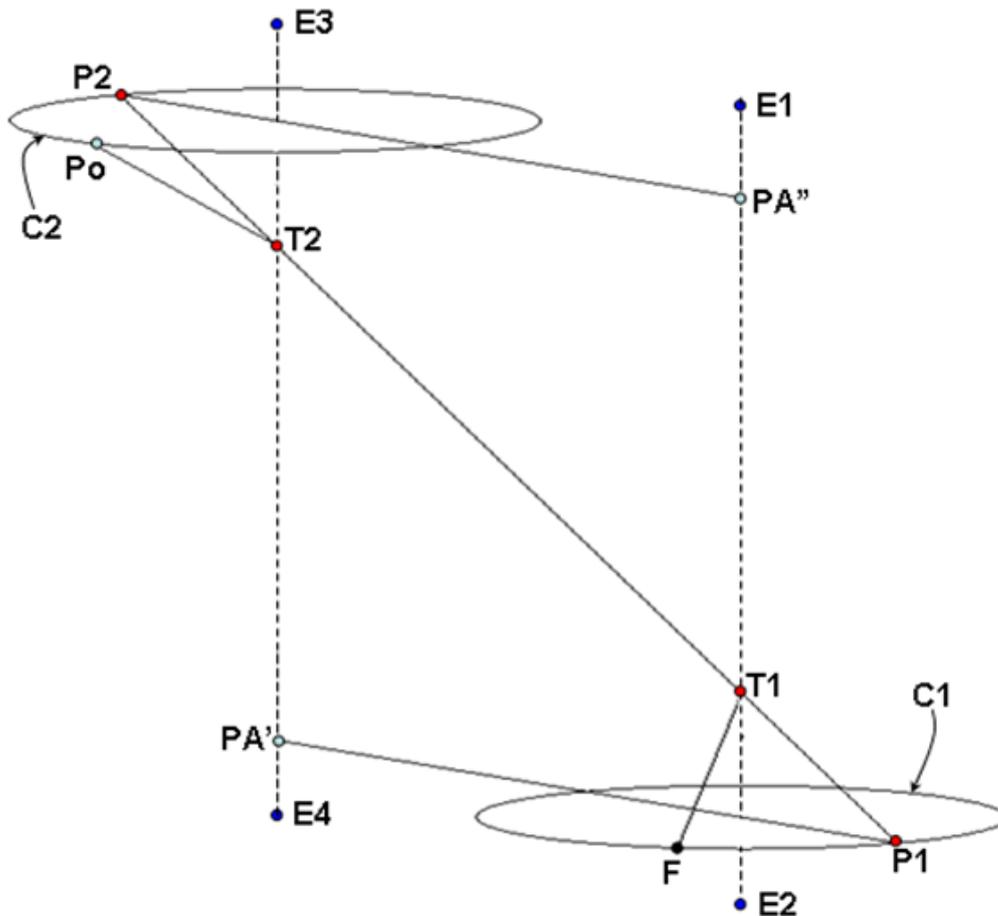


Figura 29- Circunferências  $C_1$  e  $C_2$ , pontos auxiliares  $P_1$  e  $P_2$  e pontos de difração  $T_1$  e  $T_2$  contidos nas arestas  $E_1E_2$  e  $E_3E_4$ , que verificam se um ponto de observação está contido ou não em um feixe de difração de segunda ordem.

#### 2.4.9 Algoritmo de Transmissão e Reflexão dos Feixes de Difração de Segunda Ordem

Um feixe de difração de segunda ordem representado pelos vértices  $E_1$  e  $E_2$  da primeira aresta, pelos vértices  $E_3$  e  $E_4$  da segunda aresta de difração, pela posição da fonte  $F$  e base dada pelo polígono 1234, incide sobre uma célula vizinha, conforme mostra a Figura 30. Considerando que este feixe irá gerar outros, chamar-se-á o feixe de incidência de feixe de difração original de segunda

ordem e os originados de feixes de difração transmitidos ou refletidos de segunda ordem.

Para determinar os feixes difração transmitidos de segunda ordem, os seguintes passos devem ser realizados:

- 1) Identificar as demais faces da célula vizinha. Na Figura 30, tem-se a ilustração destas faces, dadas pelos polígonos 1485, 2376, 7856, 1562 e 4873.
- 2) Aplicar os cinco primeiros passos da seção 2.4.8 a cada ponto de uma das faces da célula vizinha, tratado como ponto de observação, para determinar o ponto de interseção  $T_2$  na segunda aresta de difração. Por exemplo, o ponto 7 do polígono 7856 determina o ponto  $T_2$ , mostrado na Figura 30.
- 3) Projetar o ponto de observação no plano de projeção (plano que contém a base do feixe que incidiu sobre a célula). Para isso, basta determinar a interseção entre o segmento de reta que contém o ponto de observação e o ponto  $T_2$  e o plano de projeção. Por exemplo, para o ponto 7 do polígono 7856, tem-se o ponto projetado  $7'$ , mostrado na Figura 30.
- 4) O polígono formado pela união dos pontos projetados correspondentes à mesma face determinará o polígono projetado no plano de projeção que contém a base do feixe original. Cada face da célula vizinha terá um polígono projetado no plano de projeção.
- 5) Determinar se existem interseções entre a base do feixe de difração e os polígonos projetados. Caso existam, os novos feixes difratados de transmissão serão definidos pelos vértices da primeira ( $E_1$  e  $E_2$ ) e segunda ( $E_3$  e  $E_4$ ) aresta de difração, pela posição  $F$  da fonte e bases dadas pelos polígonos que representam as faces vizinhas.

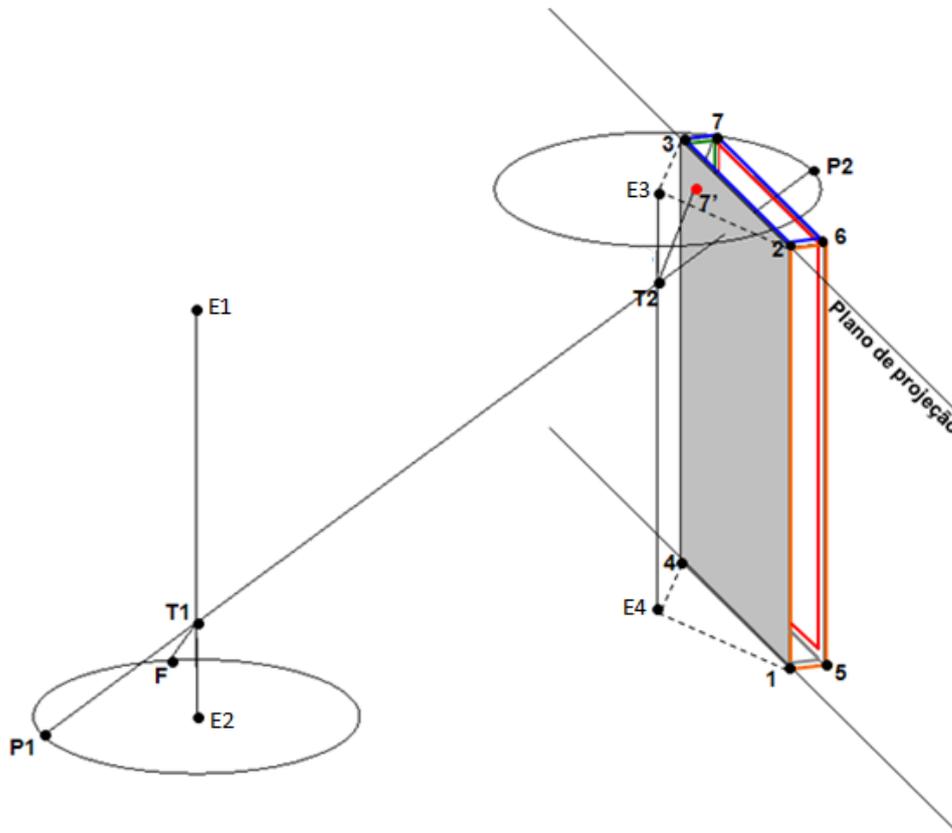


Figura 30- Feixe de difração de segunda ordem que incide sobre face de célula vizinha.

Os feixes de difração refletidos de segunda ordem são obtidos através da incidência de um novo feixe de difração temporário sobre a célula que contém o feixe de difração original de segunda ordem. O feixe temporário é representado pelas imagens dos vértices  $E_1$  e  $E_2$  da primeira aresta e dos vértices  $E_3$  e  $E_4$  da segunda aresta de difração, e da imagem da fonte  $F$ , todas em relação à base do feixe original, representada pelo polígono 1234 na Figura 30.

Os mesmos cinco passos listados nesta seção devem ser aplicados ao novo feixe de difração temporário. Os novos feixes serão chamados de feixes de difração refletidos de segunda ordem.

Os feixes de difração refletidos de segunda ordem passam a ser definidos pelas imagens dos vértices da primeira ( $E_1'$  e  $E_2'$ ) e segunda ( $E_3'$  e  $E_4'$ ) aresta de difração, pela imagem  $F'$  da posição da fonte e pelas bases coincidentes com as faces da célula que contém o feixe de difração original.

### 2.4.10 Árvore de Feixes

Para que os sucessivos feixes de transmissão, reflexão e difração que ocorrem em um ambiente sejam armazenados, foi construída uma estrutura denominada árvore de feixes (*beam tree*) [42], [45], similar à árvore de raios (*ray tree*) [56]. Esta estrutura permite que os dados sejam armazenados de forma organizada, possibilitando a localização rápida de um determinado feixe, através de um dos nós da árvore correspondente.

Para que o procedimento de obtenção de uma árvore de feixes seja explicado mais facilmente, será considerado um modelo 2D com apenas transmissões e reflexões.

Na Figura 31, observa-se o modelo do ambiente, que representa subdivisões do espaço em células poliédricas convexas (A, B, C e D), sendo cada célula limitada por segmentos de reta transparentes (indicados na cor vermelha) ou opacos (indicados na cor preta), representados por letras minúsculas (f-z, a, b, c). Caso um segmento de reta opaco seja atingido pelo feixe, ocorre uma transmissão e uma reflexão. Caso um segmento de reta transparente seja atingido por um feixe, o mesmo atravessa o segmento como se não houvesse obstrução.

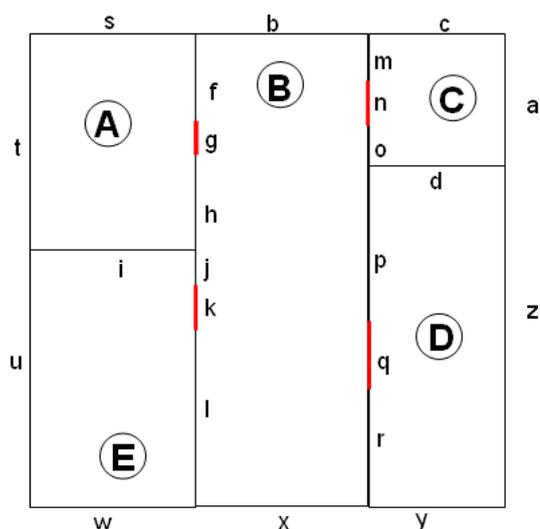


Figura 31- Ambiente de propagação subdividido em células (A, B, C, D e E).

A obtenção dos novos feixes de transmissão e reflexão é ilustrada na Figura 32. Os feixes de reflexão resultantes de incidências sobre os segmentos externos que limitam o ambiente foram desconsiderados.

Nesta Figura, a emissão dos feixes começa na célula que possui o transmissor (célula A). Os feixes iniciais são traçados para cada um dos seis segmentos da célula A (“i”, “h”, “g”, “f”, “s” e “t”). Por exemplo, observa-se um feixe inicial  $T_g$  no ambiente A, que é transmitido ao ambiente B gerando um novo feixe através do segmento “g” (denominado  $T_gT_p$ ). Por sua vez, este é subdividido em quatro feixes, um de transmissão  $T_gT_pT_z$  e outros de reflexão (denominados  $T_gT_pR_j$ ,  $T_gT_pR_k$ ,  $T_gT_pR_l$ , respectivamente), quando encontra o ambiente D no segmento “p”. Os feixes refletidos encontram os segmentos “j”, “k” e “l”. Como “j” e “l” são opacos, haverá a criação de novos dois feixes para cada segmento ( $T_gT_pR_jT_u$ ,  $T_gT_pR_lT_u$  para transmissão no ambiente E e  $T_gT_pR_jR_q$ ,  $T_gT_pR_lR_r$  para reflexão no ambiente B). Por outro lado, para o segmento transparente “k”, haverá apenas um feixe de transmissão (denominado  $T_gT_pR_kT_u$  no ambiente E). A execução do algoritmo continua sucessivamente até que todos os feixes criados encontrem os segmentos que separam o ambiente do exterior (“t”, “u”, “w”, “x”, “y”, “z”, “a”, “c”, “b” e “s”), ou que sofra um número predefinido de transmissões e reflexões que assegurem que os campos correspondentes teriam amplitudes desprezíveis.

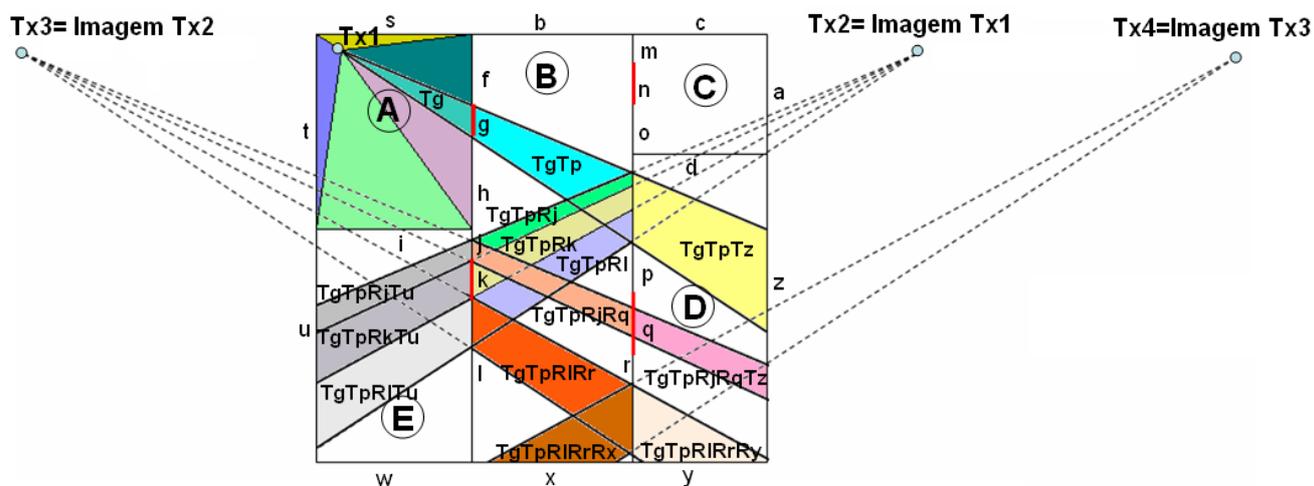


Figura 32- Emissão de feixes.

A Figura 33 mostra a árvore de feixes (*beam tree*) correspondente às transmissões e reflexões de feixes ilustradas na Figura 32. Na Figura 33, temos uma árvore com cinco níveis. Em cada nível temos um número específico de nós (feixes) que aumentam à medida que os níveis aumentam

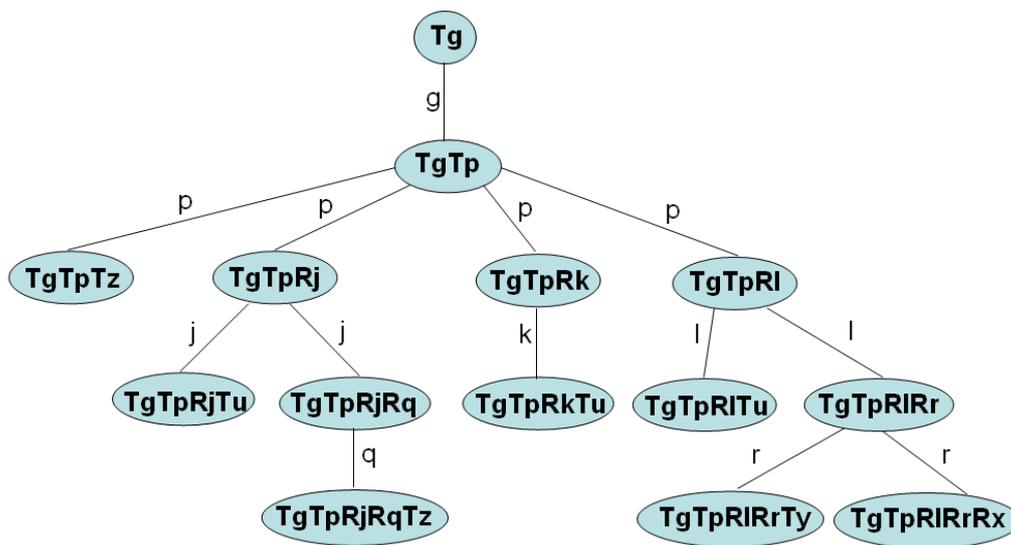


Figura 33- Árvore de feixes.

A árvore de feixes é uma estrutura de nós que armazena as seguintes informações:

- O feixe convexo que representa uma região do espaço alcançada por uma transmissão, reflexão ou difração.
- A superfície da célula recentemente atravessada (caso exista uma).
- Uma referência sobre a célula que foi atravessada pelo feixe.

A Figura 34 apresenta um algoritmo simples implementado para a obtenção de uma árvore de feixes transmitidos e refletidos. Neste algoritmo, primeiramente deve-se localizar a posição do transmissor. Para isso, é utilizada a estrutura de dados descrita na seção 2.3.

```

Subroutine Beam_Trace

Tx= Posição_transmissor
S= Subdivisão_espacial
C= Encontra_célula_inicial(Tx, S) //em função de Tx e S
Fi= Encontra_feixes_iniciais(Tx, C)
F=Fila(Fi)

Inicia-Fila(F)
n=0

Do while (F ≠ {} e n < Numfeixes)
    CV= Encontra_célula_vizinha(C)
    BF= Encontra_base_do_feixe_da_fila
    VF= Encontra_vértice_do_feixe_da_fila
    Feixe.original= Feixe(VF, BF) //Feixe de vértice VF e base BF
        Do i= 1, número_de_faces_vizinhas
            If Ocorre_transmissão

                P1= Projeta(face i, BF) // Projeta face i sobre o plano que contém a base BF
                Inter = Interseção(P1, BF) // Interseção do polígono P1 e a Base BF
                P2 = Projeta(Inter, face i) // Projeta o polígono interseção sobre o plano que
                    contém a face i
                Feixe.resultante= feixe(VF, P2)
                Insere_fila(F, Feixe.resultante)
                n= n+1

                If Ocorre_reflexão
                    Feixe.temporário = feixe(imagem(VF), P2)
                    Do k = 1, número_de_faces_vizinhas

                        P3 = Projeta(face k, P2)
                        Inter = Interseção(P3, P2)
                        P4 = Projeta(Inter, face k)
                        Feixe.resultante= feixe(imagem(VF), P4)
                        Insere_fila(F, Feixe.resultante)
                        n=n+1
                    EndDo
                EndIf
            EndIf
        EndDo
    Incrementa_fila(F) //Incrementa a fila em uma posição
EndWhile

```

Figura 34- Pseudocódigo para a emissão de feixes.

Adicionalmente, é criada uma grade tridimensional homogênea para acelerar o processo de localização do transmissor, assim como a de células do ambiente. A criação da grade tridimensional é realizada por intermédio de um pós-processamento da listagem de dados descrita na seção 2.3.

A grade tridimensional deve ser criada de acordo com o tipo de ambiente utilizado. A idéia é subdividir o espaço de tal forma que a procura do transmissor não seja feita em todo espaço, mas em uma área menor representada por um elemento da grade. O tamanho da grade foi escolhido de acordo com o número de células e objetos do ambiente. A escolha foi feita de forma que um menor número de elementos da grade cobrisse todo o ambiente. A cada elemento da grade estão associados todos os índices de células que este elemento contém, total ou parcialmente. Como a grade é homogênea, o elemento da grade que contém o transmissor pode ser identificado rapidamente. A procura da célula que contém o transmissor fica, então, restrita àquelas associadas a um elemento da grade. Obviamente, apenas uma destas células pode conter o transmissor.

Dada a posição do transmissor em um ambiente subdivido em células convexas, encontra-se a célula inicial que possui a posição do transmissor, com o auxílio da grade tridimensional. Em seguida encontram-se os feixes iniciais (ver seção 2.4.1).

A Figura 35 apresenta um corte em duas dimensões da grade sobre um plano paralelo ao teto e solo de um ambiente analisado. Nesta grade o espaço foi subdividido em doze regiões.

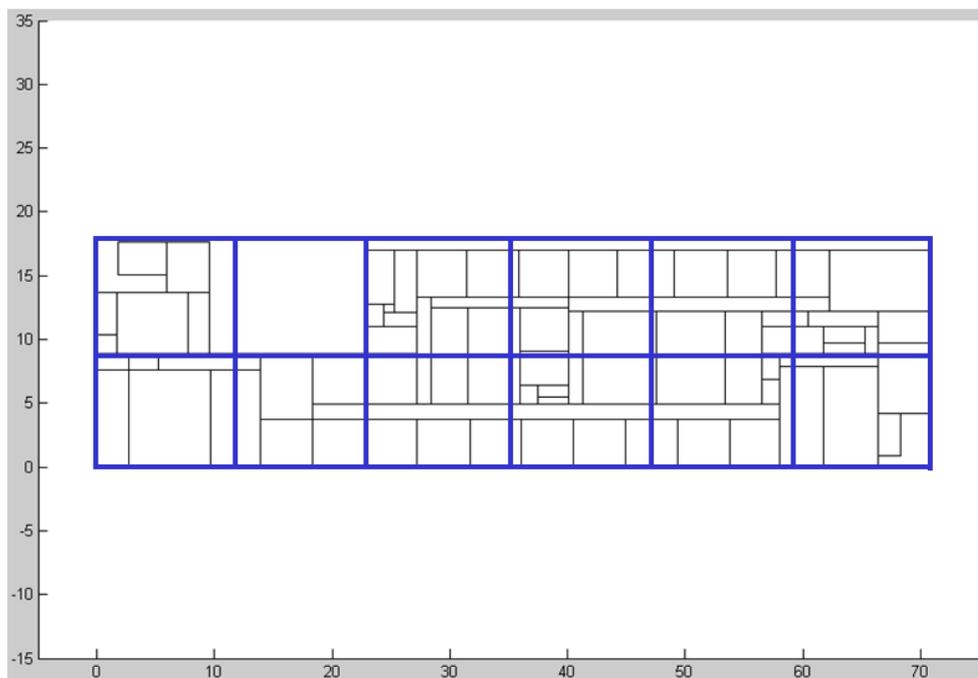


Figura 35- Corte em duas dimensões da grade sobre um plano paralelo ao teto e solo de um ambiente analisado.

Para representar a árvore de feixes neste algoritmo, deve-se considerar uma estrutura de fila [45] onde cada posição representa um nó da árvore de feixes. Inicialmente, a fila é preenchida pelos feixes iniciais (que representam os nós raízes) obtidos na célula onde o transmissor está localizado. A cada iteração do laço principal, o feixe presente no final da fila é utilizado para encontrar todos os possíveis feixes transmitidos e refletidos sobre a base da face, assim como os possíveis difratados nas arestas que compõem a base da face. À medida que cada feixe de transmissão, reflexão e difração é encontrado, os mesmos são inseridos na fila. A fila é finalmente incrementada para que o algoritmo se reinicie, encontrando novos feixes.

## **2.5. Geração dos Percursos de Propagação**

Para determinar os percursos de propagação existentes entre o transmissor e um ponto de observação selecionado, é necessário, inicialmente, identificar a célula do ambiente na qual o ponto de observação se encontra. Isto é feito por intermédio do mesmo procedimento aplicado ao transmissor descrito anteriormente. É necessário, então, verificar se o ponto de observação se encontra no interior de cada feixe contido nesta célula.

Em seguida, é aplicado, a cada feixe que contém o ponto de observação, o algoritmo que, seguindo em direção à raiz da árvore de feixes, determina o percurso de propagação correspondente entre o transmissor e o receptor.

### **2.5.1 Transmissão e Reflexão**

Este teste é realizado definindo a reta que une o ponto de observação ao vértice do feixe. Em seguida, determina-se a interseção desta reta com o plano que contém a base do feixe. O ponto de observação estará contido no feixe se a interseção for interior à base.

Este algoritmo é ilustrado nas Figuras 36 e 37. Na Figura 36, para cada feixe situado no interior da célula B, que contém o ponto de observação O, traçam-se retas que passam pelo vértice de cada feixe e pelo ponto de observação. Em seguida determinam-se os pontos de interseção situados nos planos que suportam as bases de cada feixe. Verifica-se que o ponto de interseção  $U_3$  é o único contido na base de seu respectivo feixe ( $T_g T_p R_l R_r$ ).

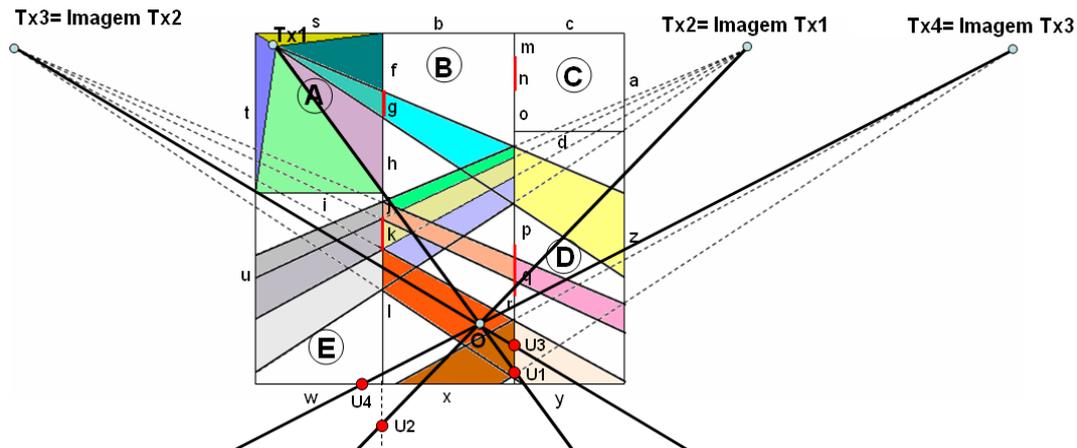


Figura 36- Percursos de propagação em um ambiente. Pontos de interseção sobre os planos que contêm as bases dos feixes contidos na célula A.

Traça-se, então, o segmento de reta que une o ponto de observação ao vértice  $Tx_3$  do feixe  $T_g T_p R_l R_r$ . Sabendo-se, através da árvore de feixes, que o feixe  $T_g T_p R_l$  originou o feixe  $T_g T_p R_l R_r$ , determina-se a interseção  $I_1$  entre a reta e o plano da base do feixe  $T_g T_p R_l$ , definindo-se o segmento de reta 1, conforme mostra a Figura 37. De maneira similar encontram-se, em sequência, os pontos de interseção  $I_2$  e  $I_3$ , atingindo-se o transmissor  $Tx$ , e definem-se os segmentos de reta 2, 3 e 4. Desta forma, é obtido um percurso de propagação completo, caracterizado pelos segmentos de reta 1, 2, 3 e 4.

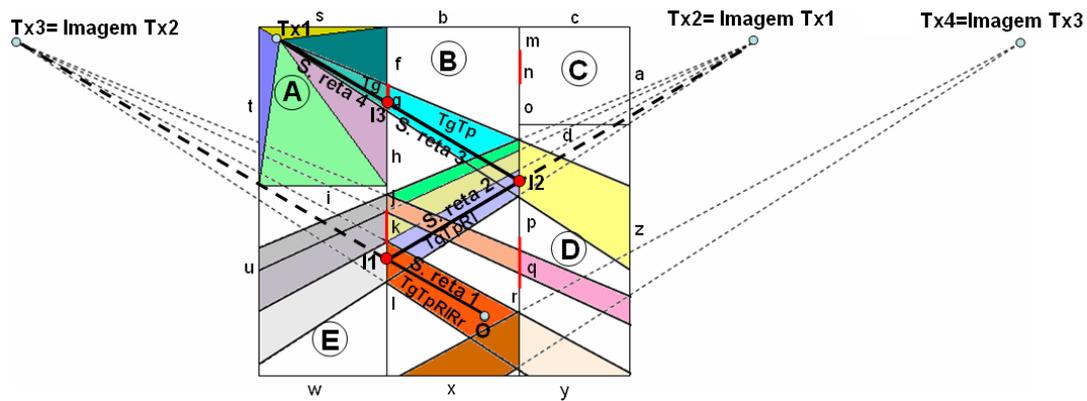


Figura 37- Percursos de propagação em um ambiente. Percurso de propagação formado pelos segmentos de reta 1, 2, 3 e 4.

### 2.5.2 Difração

Para facilitar a descrição dos procedimentos necessários para se determinar os percursos de propagação oriundos dos feixes de difração de primeira e segunda ordem existentes entre o transmissor e o ponto de observação selecionado, se fazem necessárias algumas definições. As arestas que geram os feixes de difração originais pela incidência de um feixe qualquer serão denominadas de arestas reais. Além deste tipo de arestas, existem outras, denominadas virtuais, dadas pela imagem da aresta real. Por exemplo, a aresta definida pelos vértices  $E_1$  e  $E_2$  na Figura 24 é uma aresta real, enquanto a definida pelos vértices  $E_1'$  e  $E_2'$  na Figura 27 é uma aresta virtual. Adicionalmente, os percursos existentes entre o ponto de observação e o ponto de difração na aresta real (que originou o feixe de difração) e entre este e o transmissor serão denominados de percursos 1 e 2, respectivamente. A descrição dos procedimentos necessários para o traçado dos raios difratados será realizada com o auxílio das Figuras 38 e 39.

Na Figura 38, um feixe transmitido a partir de um feixe original é considerado para se determinar os percursos de propagação. O feixe original atinge a célula vizinha que contém o ponto de observação por meio de sua base (face de cor cinza), gerando feixe de difração transmitido que possui os mesmos

vértices  $E_1$  e  $E_2$  e fonte  $F$ , mas nova base representada por uma das faces da célula que contém o ponto de observação, obtida da forma explicada na seção 2.4.7.

Deve-se, então, realizar alguns procedimentos para determinação do percurso 1. Primeiramente, determina-se o segmento de reta existente entre o ponto de observação e o ponto  $T_1$  situado na aresta definida pelos vértices do feixe. Em seguida, determina-se o ponto de interseção  $PI$  oriundo da interseção do segmento de reta com a base do feixe antecessor (dado pela face de cor cinza) ao feixe que atinge o ponto de observação. O percurso 1, representado pelo segmento de reta de cor vermelha, é traçado entre o ponto  $T_1$  e o de observação, e contém  $PI$ .

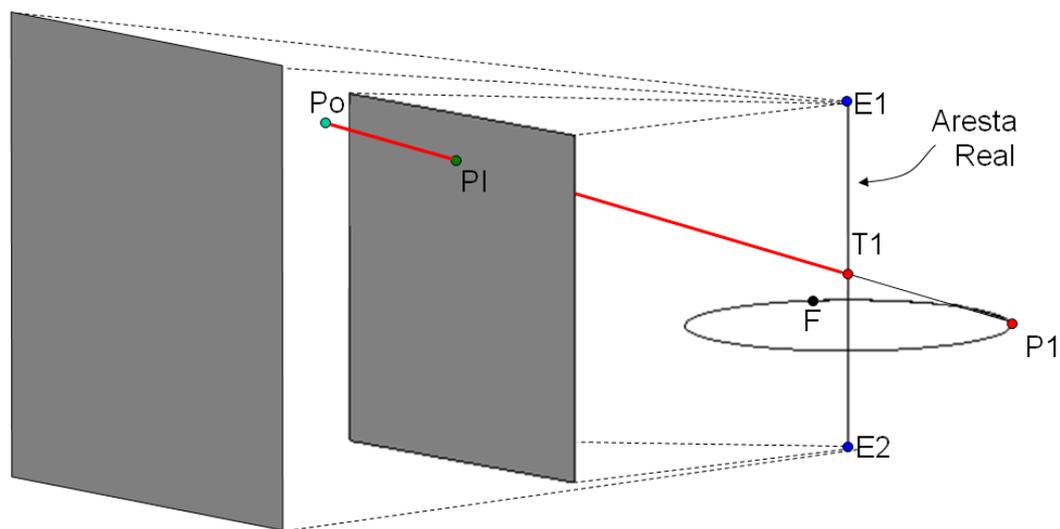


Figura 38- Obtenção do percurso 1 através de feixes de difração incidente (original) e feixe de difração transmitido de primeira ordem.

Na Figura 39, um feixe refletido a partir de um feixe original é considerado para se determinar os percursos de propagação. O feixe original, representado pelos vértices  $E_1$  e  $E_2$ , pela fonte  $F$  e pela sua base (face de cor cinza), existe na mesma célula que contém o ponto de observação. O feixe de difração refletido resultante possui os vértices imagem  $E_1'$  e  $E_2'$  e imagem da fonte  $F'$ , assim como nova base, representada por uma das faces da célula que contém o ponto de observação, obtida da forma explicada na seção 2.4.7.

Para a determinação do percurso 1 na situação ilustrada na Figura 39, caracteriza-se, primeiramente, o segmento de reta existente entre o ponto de observação e o ponto  $T_1'$  situado na aresta virtual definida pelos vértices do feixe

$E_1'$  e  $E_2'$ . Em seguida, determina-se o ponto de interseção PI oriundo da interseção do segmento de reta com a base do feixe antecessor (dado pela face de cor cinza) ao feixe que atinge o ponto de observação. O percurso 1, representado pelos segmentos de reta de cor vermelha, é traçado entre o ponto  $T_1$  e o de observação, e contém PI.

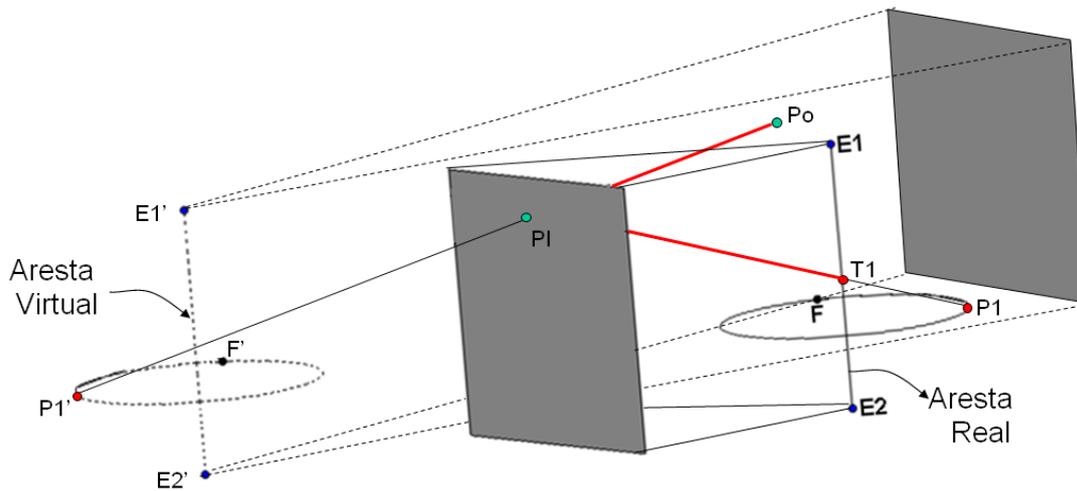


Figura 39- Obtenção do caminho 1 através de feixes de difração incidente (original) e feixe de difração refletido de primeira ordem.

Caso o feixe que contenha o ponto de observação seja resultante de múltiplas transmissões e reflexões do feixe original, determinam-se todos os pontos de interseção PI sobre as bases dos feixes antecessores, seguindo a árvore de feixes até o feixe original. Em seguida, determina-se o percurso 1, traçado entre o ponto  $T_1$  e o de observação, contendo todos os pontos PI.

O processo de obtenção dos percursos de propagação quando o feixe original é um feixe de segunda ordem será realizado com o auxílio das Figuras 40 e 41.

Na Figura 40, um feixe transmitido a partir de um feixe original é considerado para se determinar os percursos de propagação. O feixe original atinge a célula vizinha que contém o ponto de observação por meio de sua base (face de cor cinza), gerando feixe de difração transmitido que possui os mesmos vértices  $E_1$  e  $E_2$  (na aresta real 1),  $E_3$  e  $E_4$  (na aresta real 2) e a fonte F, mas nova base, representada por uma das faces da célula que contém o ponto de observação, obtida da forma explicada na seção 2.4.9.

Para a determinação do percurso 1 na Figura 40, primeiramente caracteriza-se o segmento de reta existente entre o ponto de observação e o ponto  $T_2$  na aresta real 2. Em seguida, determina-se o ponto de interseção PI oriundo da interseção do segmento de reta com a base do feixe antecessor. O percurso 1, representado pelos segmentos de reta de cor vermelha, traçados entre o ponto  $T_1$  e o de observação, contém PI e  $T_2$ .

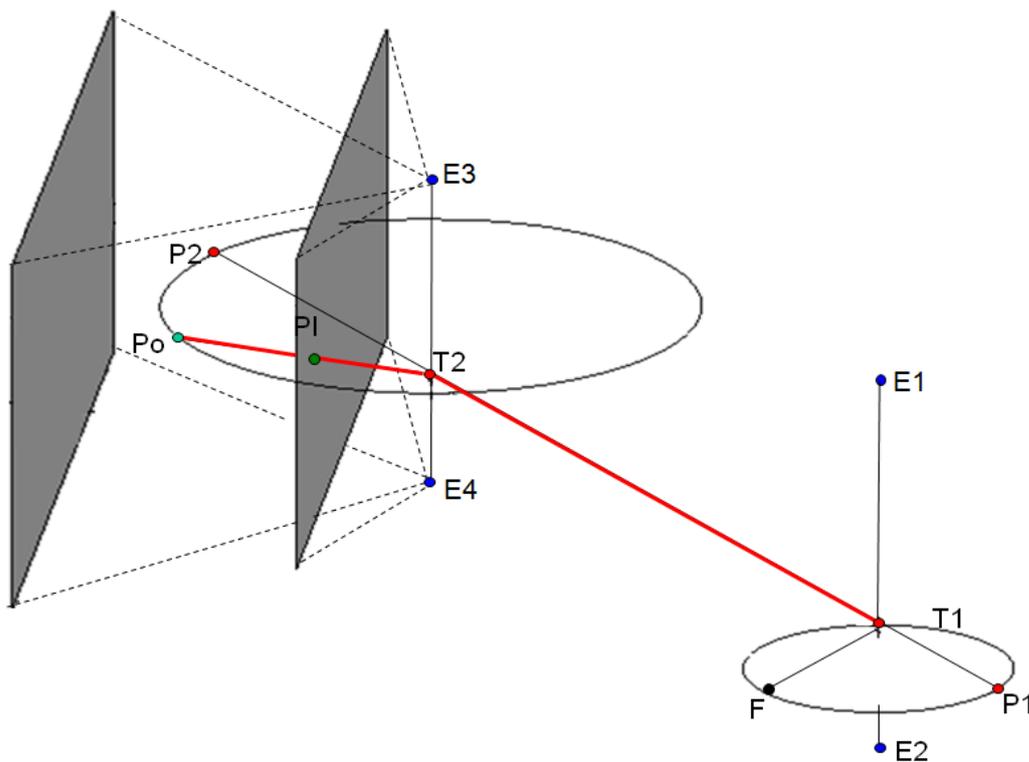


Figura 40- Obtenção do percurso 1 através de feixes de difração de segunda ordem incidente (feixe de difração original) e feixe de difração transmitido de segunda ordem.

Na Figura 41, um feixe refletido a partir de um feixe original é considerado para se determinar os percursos de propagação. O feixe original é representado pelos vértices  $E_1$  e  $E_2$  (aresta real 1),  $E_1$  e  $E_2$  (aresta real 2), pela fonte F e pela sua base (face de cor cinza), que existe na mesma célula que contém o ponto de observação. O feixe refletido possui os vértices imagem  $E_1'$  e  $E_2'$  (aresta virtual

1),  $E_3'$  e  $E_4'$  (aresta virtual 2) e imagem da fonte  $F'$ , assim como nova base, representada por uma das faces da célula que contém o ponto de observação, obtida da forma explicada na seção 2.4.9.

Para a determinação do percurso 1 na situação ilustrada na Figura 41, caracteriza-se, primeiramente, o segmento de reta existente entre o ponto de observação e o ponto  $T_2'$  situado na aresta virtual definida pelos vértices do feixe  $E_3'$  e  $E_4'$ . Em seguida, determina-se o ponto de interseção  $PI$  oriundo da interseção do segmento de reta com a base do feixe antecessor (dado pela face de cor cinza). O percurso 1, representado pelos segmentos de reta de cor vermelha, traçado entre o ponto  $T_1$  e o de observação, contém  $PI$  e  $T_2$ .

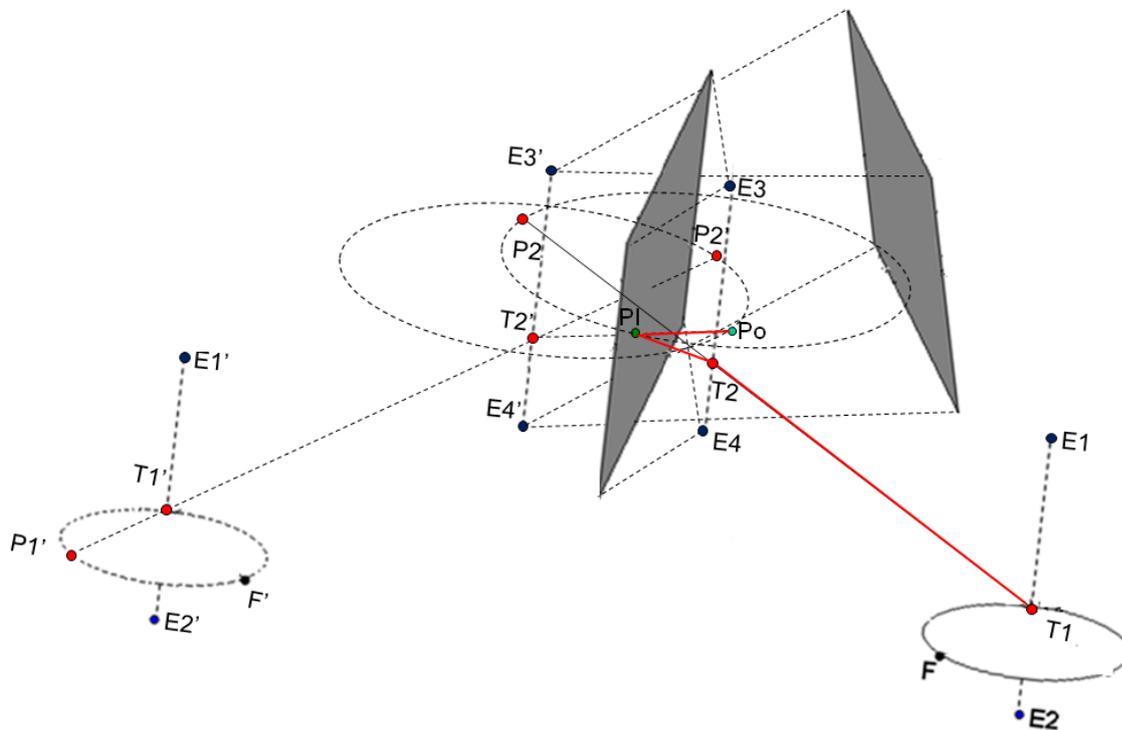


Figura 41- Obtenção do percurso 1 através de feixes de difração de segunda ordem incidente (feixe de difração original) e feixe de difração refletido de segunda ordem.

Caso o feixe que contenha o ponto de observação seja resultante de múltiplas transmissões e reflexões do feixe original (representado por um feixe de difração de segunda ordem), determinam-se todos os pontos de interseção  $PI$  sobre as bases dos feixes antecessores, seguindo a árvore de feixes até o feixe original. Em seguida, determina-se o percurso 1, traçado entre o ponto  $T_1$  (na

aresta real 1 do feixe original) e o de observação, contendo todos os pontos  $PI$  e o ponto  $T_2$  (na aresta real 2) do feixe original.

Nas situações ilustradas nas Figura 38 a 41, o percurso 2 é obtido com base no algoritmo proposto na seção 2.5.1 para feixes de transmissão e reflexão, visto que os feixes antecessores ao feixe original são feixes de transmissão ou reflexão representados por um único vértice. Na aplicação do algoritmo, o ponto  $T_1$  contido na aresta real que define os vértices do feixe original (encontrado no caminho 1) é tratado como o ponto de observação.

A união dos percursos 1 e 2 determina o percurso de propagação traçado entre o transmissor e o receptor contendo, no mínimo, um ponto de difração.

No entanto, a obtenção do percurso de propagação oriundo de um feixe original mostrada nos parágrafos anteriores não é suficiente para garantir que o percurso obtido seja válido, tendo em vista o processo de superestimação do feixe de difração discutido na seção 2.4.4.

É importante ressaltar que, na realidade, o verdadeiro feixe de incidência atinge o segmento de reta  $V_1V_2$  contido na aresta delimitada por  $E_1$  e  $E_2$  (ver Figura 17 na seção 2.4.4), gerando um feixe de difração original que não é superestimado (ver Figura 18 na seção 2.4.4).

Para situação mais simples, quando o feixe original representado por um feixe de difração de primeira ordem contém o ponto de observação, o percurso de propagação é considerado válido quando o ponto  $T_1$  está contido no segmento de reta  $V_1V_2$ .

As Figuras 42 e 43 mostram a incidência de um feixe original representado por um feixe de difração de primeira ordem sobre pontos de observação distintos. Na Figura 42, o feixe não atinge o ponto de observação, pois o ponto  $T_1$  obtido não está contido no segmento de reta  $V_1V_2$ . A Figura 43 mostra a situação onde um ponto de observação localizado em posição diferente em relação à Figura 42, possibilita a obtenção de um ponto  $T_1$  que está contido no segmento de reta  $V_1V_2$ . Logo, o percurso de propagação é considerado válido.

Para as situações mais gerais, quando o feixe que contém o ponto de observação resulta de múltiplas transmissões e reflexões do feixe original (representado tanto por um feixe de difração de primeira ordem ou de segunda ordem), devem ser armazenados todos os pontos  $V_1'$  e  $V_2'$  (em arestas virtuais) e os pontos  $V_1$  e  $V_2$  (nas arestas reais). Caso todos os pontos  $T_1'$  contidos em arestas

virtuais e os pontos  $T_1$  em arestas reais estejam delimitados entre os seus segmentos  $V_1'V_2'$  e  $V_1V_2$ , respectivamente, o percurso de propagação é considerado válido.

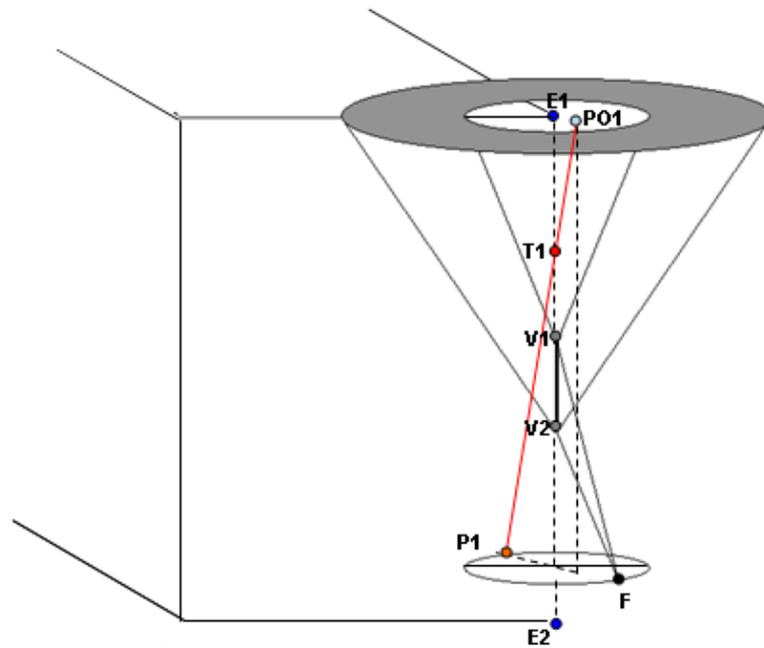


Figura 42- Ponto de observação não atingido pelo feixe de difração.

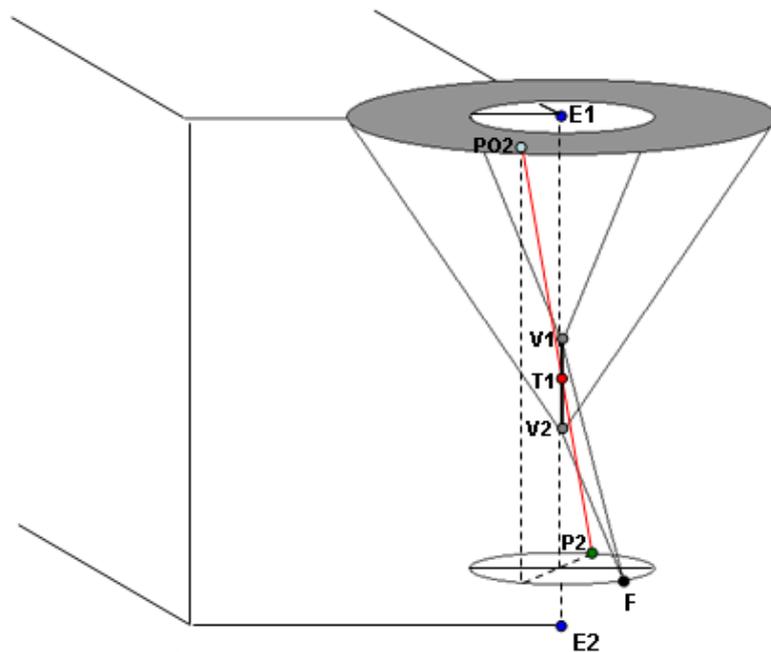


Figura 43- Ponto de observação atingido pelo feixe de difração.

A Figura 44 ilustra alguns raios obtidos através de simulações para o ambiente CETUC. Nesta Figura, os raios são traçados entre o transmissor e o receptor, os asteriscos vermelhos representam os pontos de interseção do raio com as faces que compõem as células do ambiente, os pontos de cor preta e azul representam o transmissor e o receptor, respectivamente. Na Figura 44(a), identificam-se um ponto de difração e três pontos de transmissão em paredes distintas do ambiente. Na Figura 44(b), identificam-se dois pontos de difração consecutivos, um de reflexão na parede do final de um corredor e um de reflexão na parede lateral do mesmo corredor. Na Figura 44(c), identificam-se um ponto de transmissão em uma face transparente que delimita passagem entre duas células, um ponto de reflexão na parede do final de um corredor, dois pontos de difração consecutivos e dois pontos de reflexão consecutivos em paredes laterais de outro corredor. Na Figura 44(d), 385 raios são mostrados simultaneamente.

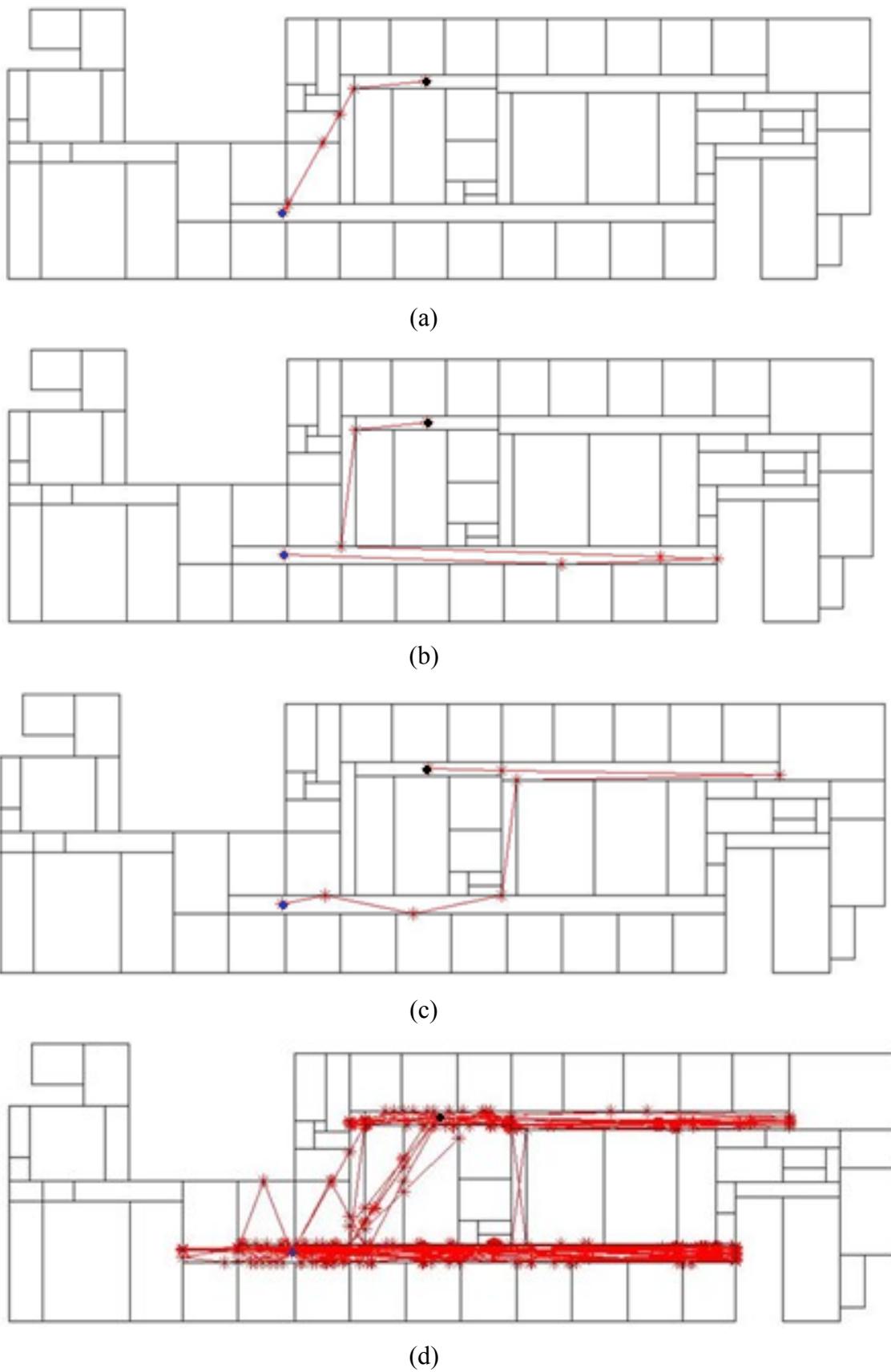


Figura 44- Raios transmitidos, refletidos e difratados. (a), (b) e (c) Um raio que apresenta, pelo menos, uma difração. (d) 385 raios.