

GERAÇÃO DE ESPÉCIME VIRTUAL DE CONCRETO CONSIDERANDO-O MATERIAL HETEROGÊNEO

Ígor José Mendes Lemes¹ & Amilton Rodrigues da Silva²

Resumo

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um software com a finalidade de gerar espécimes de concreto considerando-o como material heterogêneo, ou seja, composto por dois materiais distintos: agregado graúdo e pasta de cimento mais agregado miúdo. Para gerar o espécime, britas são dispostas de maneira aleatória ocupando uma fração do volume total, o restante será pasta de cimento mais areia. A quantidade, dimensão e forma das britas são definidas através dos parâmetros de entrada de caracterização do agregado graúdo, traço do concreto, forma do espécime, entre outros. Estes parâmetros são definidos pelo usuário através de uma interface gráfica, criada com o objetivo de facilitar a compreensão e manuseio do software. No método de disposição das britas no espécime é feita uma discretização tridimensional o que possibilita a geração de uma malha estruturada de elementos finitos identificando as coordenadas dos nós, as conectividades e o tipo de material dos elementos.

Palavras-chave: Concreto heterogêneo. Índice de forma. Discretização tridimensional. Agregado graúdo.

GENERATION OF VIRTUAL CONCRETE SPECIMEN CONSIDERING IT AS HETEROGENEOUS MATERIAL

Abstract

This paper presents the development of a software for the purpose of generate concrete specimens considering it as heterogeneous material, i.e., composed of two different materials: coarse aggregate and cement paste more fine aggregate. To generate the specimen, gravel are arranged randomly occupying a fraction of the total volume, the remainder will be cement paste more sand. The amount, size and shape of gravel are set through the input parameters of characterization coarse aggregate, concrete mixture, shape of the specimen, among others. These parameters are defined by the user through a graphical interface, created with the objective of to facilitate the understanding and handling of software. On the method of disposal of gravel in the specimen is made three-dimensional discretization which allows generation of a structured finite element mesh identifying the coordinates of the nodes, the connectivity and the type of the elements.

Keywords: Heterogeneous concrete. Shape analysis. Three-dimensional discretization. Coarse aggregate.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil em todo mundo. Mesmo em construções que empregam outros tipos de materiais, como, por exemplo, edifícios em estruturas metálicas, a sua presença é garantida no preenchimento das lajes e fundações. O concreto é composto basicamente por cimento, agregados e água, podendo conter aditivos para melhorar seu desempenho.

¹ Bolsista de iniciação científica. Graduando em Engenharia Civil da UFSJ - Campus Alto Paraopeba, CAP.

² Professor Adjunto da Área de Estruturas do DTECH-CAP-UFSJ, amilton@ufs.edu.br

Ao seccionar uma amostra de concreto percebe-se, pela diferença de tonalidade, a presença de dois materiais distintos, o agregado graúdo e uma pasta de cimento mais agregado miúdo conforme ilustrado na Figura 1.1 (Carol et. al., 2001). Verifica-se experimentalmente que estes materiais apresentam propriedades mecânicas distintas, caracterizando-os como dois materiais diferentes.

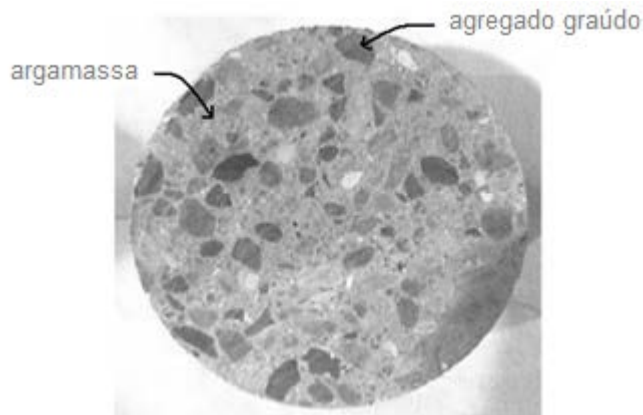


Figura 1.1 – Foto de um corte em um espécime de concreto (Carol et. al., 2001).

A Figura 1.2 ilustra o processo de formação de fissuras em um espécime de concreto sujeito à compressão axial (Carol et. al., 2001). A análise é feita em uma seção transversal de um espécime de concreto considerando-o como um material heterogêneo. Os autores definem a seção transversal do elemento de concreto definindo uma malha de agregado, por exemplo, seis por seis, com uma distribuição mais ou menos regular e adotando como geometria destes agregados um trabalho prévio realizado por Stankowski (1990). Verifica-se da Figura 1.2 que com o aumento das fissuras elas formam uma linha de ruptura com um ângulo aproximado de 45° , o que é esperado já que o concreto sob compressão axial rompe no plano de cisalhamento máximo, que acontece a 45° . Outra observação da Figura 1.2 é que as fissuras são formadas na interface entre o agregado graúdo e a argamassa e na argamassa. Essas particularidades mostram a heterogeneidade do concreto e motivam uma discretização deste em dois materiais distintos quando se deseja uma análise mais detalhadas.

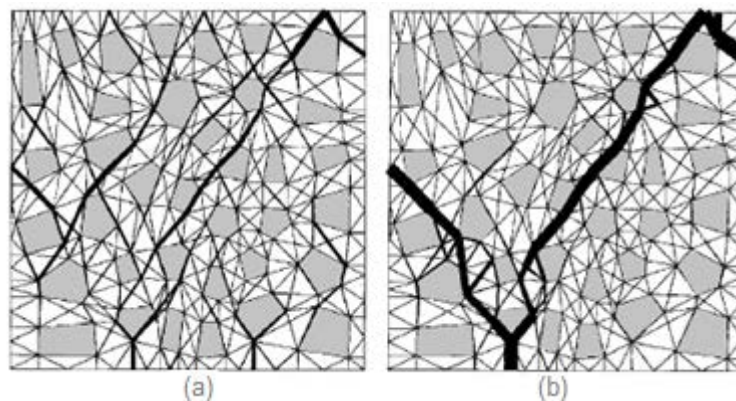


Figura 1.2 – Processo de formação de fissuras em um espécime de concreto sujeito à compressão axial (Carol et. al., 2001).

A determinação da resistência mecânica de um concreto, definido por um traço qualquer (relação entre os materiais que compõem o concreto) é obtida em laboratório através de ensaios mecânicos realizados em espécimes confeccionados com o concreto a ser analisado, como, por exemplo, o ensaio de compressão simples que determina a resistência máxima do concreto à compressão (NBR 5739, 1980). Conhecendo as propriedades físicas dos materiais que compõem o concreto, assim como a superfície de falha da argamassa e da interface entre argamassa e agregado graúdo, pode-se simular o ensaio descrito acima através de análises numéricas em espécimes de

concreto gerados virtualmente. Carol et. al. (2001) avalia numericamente em seu trabalho um espécime de concreto considerando-o como um material heterogêneo. O autor utiliza o método dos elementos finitos e através de análise plana em seções transversais de concreto define uma curva tensão-deformação para o concreto.

O objetivo desse trabalho é desenvolver um *software* que gera virtualmente um espécime de concreto considerando-o como material heterogêneo formado pelo agregado graúdo e a pasta de cimento mais o agregado miúdo. Na geração virtual do espécime de concreto deve-se fornecer ao *software* parâmetros relativos à caracterização do agregado graúdo (Petrucci, 1998), à forma do espécime a ser gerado e ao traço do concreto.

A principal saída de dados do programa é o espécime de concreto, que consiste nos agregados graúdos, com quantidade e forma definidos através dos parâmetros de entrada, distribuídos de forma aleatória dentro do volume do espécime. Em geral, é utilizado o método dos elementos finitos para simulações numéricas do comportamento de um material sujeito a um estado de tensão devido a carregamentos externos. Dessa forma, considerando que o espécime de concreto gerado será submetido a uma análise numérica de seu estado tensional, o método que será desenvolvido para distribuição do agregado graúdo dentro do espécime utilizará de uma discretização tridimensional deste, o que permite, como saída de dados do programa, a definição de uma malha de elementos finitos tridimensional identificando os diferentes materiais que compõe o concreto. No caso de análise numérica plana, o programa permitirá a obtenção de cortes planos no espécime gerado.

2 METODOLOGIA

Como metodologia para a geração de um espécime virtual de concreto considerando-o como material heterogêneo admite-se a sequência: definição e discretização da forma do espécime; definição da forma do agregado graúdo; determinação da quantidade de agregado graúdo e de sua forma e dimensões; disposição dos agregados graúdos dentro do volume do espécime.

2.1 Forma e discretização do espécime

O programa desenvolvido nesse trabalho permite a geração de um espécime na forma de um paralelepípedo ou cilindro. Definida a forma do espécime o método utilizado para disposição dos agregados graúdos no volume do espécime admite uma discretização tridimensional deste. Esta discretização tem a finalidade, além de locação dos agregados graúdos, de geração de uma malha estruturada tridimensional de elementos finitos identificando as coordenadas dos nós, as conectividades dos elementos, e a identificação do material de cada elemento de discretização do espécime (agregado graúdo ou argamassa). Estes dados são gerados pelo programa e fornecido ao usuário em forma de um arquivo de texto. Este arquivo servirá como base de um arquivo de entrada de dados para uma posterior análise numérica do comportamento mecânico do espécime.

2.2 Brita padrão

A brita padrão é o agregado graúdo que possui as dimensões da faixa granulométrica de maior diâmetro dentre as obtidas no ensaio de granulometria para a confecção do espécime. O programa trabalha com três formas diferentes de brita padrão: elipsóide (seixo rolado), poliedro e octaedro (pedras britadas), mostrados na Figura 2.1a, 2.1b e 2.1c, respectivamente. As coordenadas dos vértices do poliedro e octaedro são definidas em função dos parâmetros de entrada identificados pelas variáveis: a (espessura), b (largura) e c (comprimento). Para o elipsóide são necessárias

apenas as variáveis a e b para sua caracterização. Através destas variáveis é possível determinar o volume da brita e o seu índice de forma, como descrito a seguir.

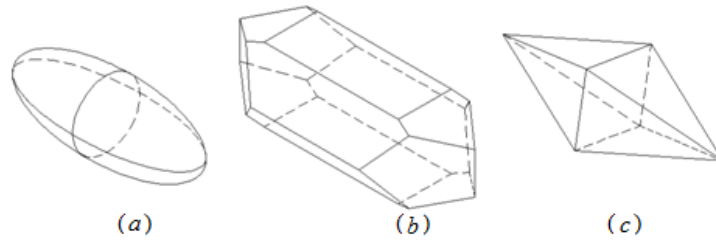


Figura 2.1 – Formas para a brita padrão.

(i) Volume:

Para as formas da brita padrão definidas pelo elipsóide e o octaedro existem expressões matemáticas que fornecem o volume em função dos parâmetros de entrada destas (Figura 2.2). As Eq. (2.1) e (2.2) abaixo fornecem, respectivamente, o volume do elipsóide e do octaedro em função das variáveis a , b e c .

$$V = \frac{4}{3} \pi . b . a^2 \quad (2.1)$$

$$V = \frac{a . b . c}{6} \quad (2.2)$$

O poliedro da Figura 2.1b foi obtido a partir de cortes planos em um paralelepípedo. Definidas as coordenadas dos vértices da brita padrão em função das variáveis a , b e c , como mostra a Figura 2.3, pode-se determinar uma expressão para o volume da brita. Na determinação da Eq. (2.3) para o volume do poliedro foi usada as equações dos planos que compõem a forma do agregado e integração tripla.

$$V = 0,578552 . a . b . c \quad (2.3)$$

(ii) Índice de forma

A forma do agregado pode ser avaliada em ensaios através da NBR 7809 (2006) usando o índice de forma (if) para os grãos dos agregados, que corresponde à relação entre o volume do grão (V) e o volume da menor esfera circunscrita a ele, como mostrado na Eq. (2.4).

$$if = 6 \frac{V}{\pi . L^3} \quad (2.4)$$

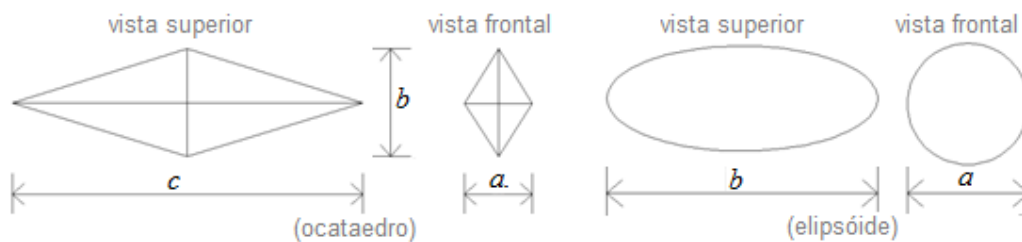


Figura 2.2 – Dimensões da brita padrão em formato de octaedro e elipsóide.

De acordo com a expressão acima para o índice de forma da brita, e os volumes dos diferentes tipos de brita, dados pelas Eq. (2.1) a (2.3), pode-se determinar as Eq. (2.5) a (2.7) para os índices de forma do poliedro, octaedro e o elipsóide, respectivamente.

$$if = 1,10495 \cdot c \cdot b \cdot a (0,25a^2 + c^2)^{-\frac{3}{2}} \quad (2.5)$$

$$if = 0,3183 \cdot a \cdot b \cdot c^{-2} \quad (2.6)$$

$$if = \frac{a^2}{b^2} \quad (2.7)$$

Valores máximos para os índices de forma do poliedro e do octaedro são obtidos reduzindo a maior dimensão (c) até que esta seja igual ao diâmetro característico (b) e aumentando a menor dimensão (a) até o mesmo valor. Dessa forma tem-se: $if_{máx} = 0,7906$ para o poliedro e $if_{máx} = 0,3183$ para o octaedro. Para o elipsóide, o valor máximo é obtido quando seu comprimento b é reduzido até o valor da largura a , transformando-o em uma esfera, ou seja, $if_{máx} = 1$.

2.3 Quantidade e dimensões das britas

A quantidade de britas a serem dispostas no espécime é definida com base no traço do concreto e no volume do espécime, como mostrado na Eq. (2.8).

$$qb = cim \times vol \times cb \times bm \quad (2.8)$$

Na Equação (2.8): cim é a quantidade de cimento (kg) em $1m^3$ de concreto; vol é volume do espécime; cb é a relação em massa de cimento e brita; bm é o número de brita em $1kg$ de agregado graúdo. O resultado desta equação provavelmente não será um valor inteiro. O número de brita, nbr , é o valor inteiro mais próximo do valor de qb . Este número total de britas é dividido entre as diferentes faixas granulométricas do agregado graúdo e tem suas dimensões, para cada faixa, alteradas pelo diâmetro da faixa granulométrica, pelo índice de forma e pela relação do número de britas pela massa contida em uma amostra, chamada nesse trabalho de relação brita-massa (ver seção 2.3.2).

2.3.1 Alteração das dimensões devido à faixa granulométrica

As dimensões da brita padrão e os dados referentes à análise granulométrica são parâmetros de entrada do programa. Cada nó (vértice) da brita apresenta coordenadas cartesianas tridimensionais em um sistema local, onde sua origem coincide com o centro do agregado. Como estes dados referem-se à brita de maior diâmetro da análise granulométrica, para obter os valores das britas nas demais faixas faz-se a relação entre o diâmetro característico da faixa que apresenta porcentagem retida e o diâmetro da brita padrão, como mostrado na Eq. (2.9).

$$x_{i,j}^l = \frac{b_f}{b} \cdot x_{i,j} \quad (2.9)$$

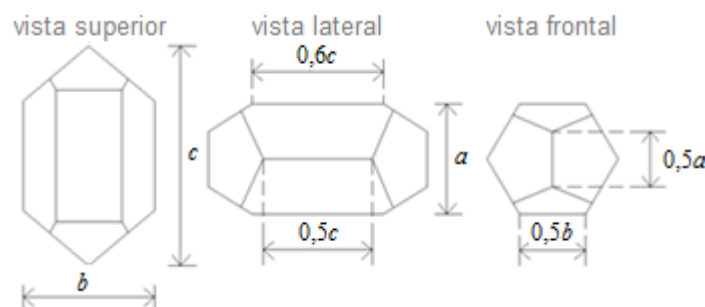


Figura 2.3 – Dimensões da brita padrão em formato de poliedro vistas superior, lateral e frontal.

Na Equação (2.9): $x_{i,j}^l$ são as coordenadas dos vértices da brita no sistema local de referência; i é um índice variando de 1 até $nvert$ (número total de vértices da brita); j é o índice que representa os eixos coordenados x , y e z ; l é a faixa granulométrica analisada; b_f é o diâmetro da faixa analisada; b é o diâmetro característico da brita padrão; $x_{i,j}$ são as coordenadas dos vértices da brita padrão no sistema de referência local.

2.3.2 Alteração das dimensões devido à relação brita-massa

A relação entre o número de britas presentes em 1 kg de agregado (bm) e a densidade da brita utilizada na confecção do espécime são dados de entrada do programa. O valor de bm pode ser obtido retirando-se do agregado graúdo uma amostra representativa, contando o número de agregados nela presente e pesando-a. bm será a relação entre estas duas grandezas. O programa determina a massa unitária de cada brita locada, multiplicando seu volume pela densidade. Dessa forma, obtém-se a relação massa-brita para as dimensões de entrada. Este valor obtido é comparado com o valor bm de entrada, caso o erro relativo seja maior do que uma tolerância estabelecida, as dimensões da brita são alteradas, através da Eq. (2.10), e o cálculo é refeito até que o erro seja menor do que a tolerância.

$$x_{i,j} = \alpha x_j \quad (2.10)$$

Na Equação (2.10): $x_{i,j}$ são as coordenadas da brita em questão referentes ao diâmetro i ; j é o índice que representa os eixos coordenados x , y e z ; α é o coeficiente que depende da necessidade de aumentar ou diminuir a relação brita-massa; x_j são as coordenadas dos nós da brita analisada.

O procedimento descrito acima é iterativo e o valor de α é encurralado até que a condição de parada seja satisfeita. Nota-se nesse procedimento que o programa altera as dimensões da brita em contrapartida da relação brita-massa, mesmo ambos sendo dados de entrada do programa. Isto acontece porque a relação brita-massa é um dado mais representativo já que as dimensões têm uma variabilidade, como, por exemplo, o diâmetro de cada faixa granulométrica varia dentro do intervalo dos diâmetros das peneiras.

2.3.3 Alteração das dimensões devido ao índice de forma

Outro parâmetro de entrada que influencia nas dimensões da brita é o índice de forma. Como mostrado na seção 2.2 as Eq. (2.5) a (2.7) definem o if para cada uma das britas em função das suas dimensões. Assim sendo, para cada faixa granulométrica o programa calcula este parâmetro e em seguida compara com o valor de entrada, caso o erro relativo entre os valores exceda uma tolerância estabelecida é realizado um dos procedimentos abaixo ou uma combinação entre eles.

(i) *Procedimento 1 - Aumentar o índice de forma aumentando o volume da brita:*

Nesse procedimento a menor dimensão deverá ser ampliada até que o erro relativo seja menor que a tolerância. Caso isto não seja possível este procedimento é finalizado quando a dimensão alterada igualar o diâmetro característico do agregado em questão, ou seja, $y = b$ como mostra a Figura 2.4a. Nesta etapa, a alteração ocorre apenas na direção da menor dimensão. A Figura 2.4a ilustra esta alteração em uma brita de formato genérico.

$$x_{i,j} = \alpha .x_j \quad (2.11)$$

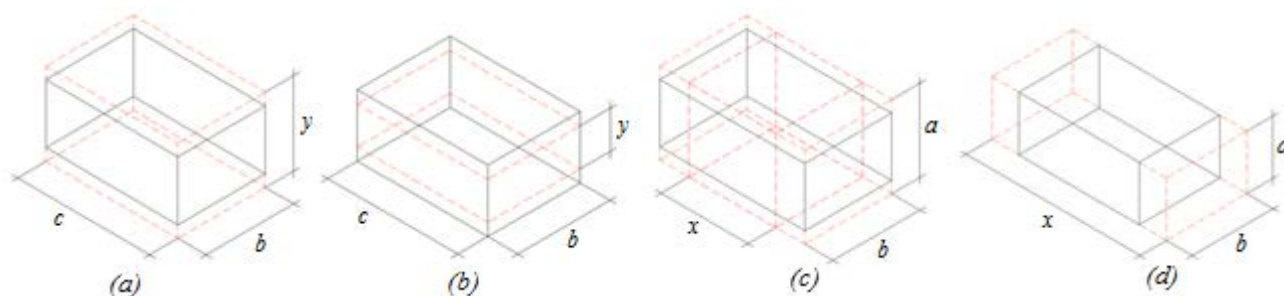


Figura 2.4 – Variação da dimensão da brita padrão: (a) Ampliação da menor dimensão; (b) Redução da menor dimensão; (c) Redução da maior dimensão; (d) Ampliação da maior dimensão.

Na equação 2.11: j é a direção da menor dimensão da brita; α é o coeficiente maior que 1 e menor que a relação entre o diâmetro da brita e a menor direção; $x_{i,j}$ são as coordenadas dos nós da brita referente ao diâmetro i ; x_j são as coordenadas dos nós da brita padrão.

(ii) *Procedimento 2 – Diminuir o índice de forma diminuindo o volume da brita:*

Nesse procedimento a menor dimensão será reduzida de maneira a se atingir o valor desejado do índice de forma. Como no procedimento anterior, nessa etapa, as coordenadas do agregado padrão serão reduzidas somente na direção da menor dimensão. A Figura 2.4b ilustra este procedimento em uma brita de formato genérico. Para este caso, utiliza-se, também, a Eq. (2.11), ressaltando que agora o coeficiente α é um coeficiente menor que 1.

(iii) *Procedimento 3 – Aumentar o índice de forma reduzindo o volume da brita:*

Nesse procedimento a maior dimensão deverá ser reduzida até que o erro relativo seja menor que a tolerância. Caso isto não seja possível este procedimento é finalizado quando a dimensão alterada igualar o diâmetro característico do agregado em questão, ou seja, $x = b$ como mostra a Figura 2.4c. Nesta etapa, a alteração ocorre apenas na direção da maior dimensão. A Figura 2.4c ilustra esta alteração em uma brita de formato genérico. Para este caso, utiliza-se também a Eq. (2.11), diferindo j que passa a ser a direção da maior dimensão da brita e α que é um coeficiente menor que 1 e maior que a relação entre o diâmetro da brita e a maior direção desta.

Quando o procedimento 1 for realizado e não atingir o valor do índice de forma desejado deve-se usar em seguida o procedimento 3. Com isso, após ter ampliado a menor dimensão até igualar ao diâmetro da brita, reduz-se a maior dimensão até o valor desejado do índice de forma, essa redução é limitada por b , quando se terá o valor máximo para o índice de forma da brita analisada.

(iv) *Procedimento 4 – Reduzir o índice de forma aumentando o volume da brita:*

A maior dimensão será ampliada de forma a se obter o valor desejado do índice de forma. Como no procedimento 3, as coordenadas do agregado padrão serão ampliadas somente na direção da maior dimensão. A Figura 2.4d ilustra este procedimento em uma brita de formato genérico. Para este caso, utiliza-se, também, a Eq. (2.11), ressaltando que agora o coeficiente α é um coeficiente maior que 1 e j é a direção da maior dimensão da brita.

2.3.4 Sequência de passos na alteração das dimensões

Nos itens anteriores dessa seção são descritos os fatores utilizados pelo programa para que a quantidade, dimensões e forma das britas do espécime a ser gerado virtualmente sejam o mais

próximo possível do real. Para que o processo de adequação entre os dados calculados e os de entrada seja otimizado, deve-se estabelecer a sequência de passos descrita nos parágrafos seguintes.

A alteração das dimensões a e c da brita é feita com certa liberdade, podendo a dimensão a ser reduzida e c ampliada o quanto for necessário para que o índice de forma e a relação brita-massa seja o mais próximo possível dos valores de entrada. O limite superior para a dimensão a e inferior para a dimensão c é o valor do diâmetro da faixa granulométrica analisada, ou seja, a dimensão b . Como pode ser observado nos itens anteriores dessa seção pode ser necessária a alteração da dimensão b para que as condições de índice de forma e a relação brita-massa sejam atendidas. No entanto, essa alteração deve ser feita com atenção voltada à análise granulométrica, evitando que alteração extrapole os limites definidos pelos diâmetros das peneiras superior e inferior da faixa granulométrica analisada, e altere um dado de entrada (porcentagem retida nas peneiras), tornando a simulação mais distante da realidade.

O primeiro passo é a alteração das dimensões a e c da brita analisada para se ter a relação bm (brita-massa) calculada igual à relação bm de entrada, sem alterar o valor do diâmetro característico (dimensão b). Verificada a necessidade de aumentar ou diminuir a relação bm o programa defini qual das dimensões, a ou c , deve ser modificada para se ter a alteração de bm desejada. A escolha da dimensão é feita comparando o valor do índice de forma da brita com o valor de entrada, por exemplo, se for necessário aumentar bm e diminuir o índice de forma deve-se diminuir a dimensão a . Nesta etapa, o objetivo principal é uniformizar a relação bm calculada em relação ao valor de entrada, tentando melhorar o índice calculado em relação ao valor de entrada.

No segundo passo as dimensões serão alteradas com o objetivo de uniformizar o valor do índice de forma calculado com o valor de entrada. Novamente, apenas as dimensões a e c sofrerão alterações. Assim a relação bm é novamente modificada e conseqüentemente divergirá do dado de entrada. Como no primeiro passo, o índice de forma e a relação bm são consideradas simultaneamente, isto é feito para que no final do processo, a relação brita-massa não mude consideravelmente. Estas alterações são detalhadas nos procedimentos descritos no item 2.3.3 dessa seção.

Como último passo, deve-se corrigir novamente o valor calculado de bm , mas sem alterar o índice de forma. Para que isto seja possível, todas as dimensões da brita devem ser alteradas pelo mesmo fator de ampliação ou redução, dependendo do caso. Deve-se atentar ao fato de que nessa etapa a dimensão b é alterada, o que poderia diferenciar os dados calculados dos dados de entrada em relação à análise granulométrica, como dito anteriormente. Para que isto seja evitado, as etapas anteriores foram organizadas para não permitir que o fator de alteração fosse suficiente para modificar a dimensão b a ponto que ela extrapole os limites da sua faixa granulométrica.

2.4 Disposição das britas no espécime

Após a determinação da quantidade de britas e alterar as suas dimensões, e conseqüentemente suas coordenadas locais, deixando-as compatíveis com os dados de entrada, deve-se dispô-las dentro do espécime. Na confecção de um espécime real, não se tem controle da posição e da forma com que a brita estará disposta no mesmo, ou seja, deve-se dispô-la e rotacioná-la de maneira aleatória. Assim, no algoritmo de locação de cada brita é definida a cada passo uma matriz de rotação com ângulos de rotações aleatórios que alteram as coordenadas locais da brita sem alterar a sua forma.

Como dito na seção 2.1, é feita uma discretização tridimensional do espécime para a disposição aleatória das britas dentro deste. Um vetor é criado e cada posição deste estará referenciando um elemento da discretização. O vetor irá variar de 1 até $numel$, onde $numel$ é o número total de elementos gerados pela discretização do espécime. As posições deste vetor, que identifica cada elemento de discretização, serão preenchidas a cada passo do algoritmo de disposição das

britas pelos seguintes valores: valor 0 se o elemento estiver dentro de uma brita já inserida; valor 1 para o caso do elemento não pertencer a uma brita já inserida mas estiver em uma posição próxima suficiente do contorno do espécime ou das britas já dispostas, de maneira que o posicionamento da brita nesse elemento extrapolará o limite do espécime ou invadirá o espaço de outra brita; valor 2 que indica que o elemento está disponível para inserir a nova brita. O valor 1 é justificado devido a disposição da brita ser feita através de seu centro (coordenada 0,0,0 no sistema local). Dessa forma, tem-se que se a distância deste ponto até a face mais próxima da brita for maior que as dimensões do elemento da discretização do espécime, os elementos do contorno de uma brita que já foi inserida e os elementos das faces do espécime não poderão ser sorteados para a disposição de uma nova brita.

O algoritmo de disposição das britas no espécime sorteia a cada passo a posição de um elemento que tenha o valor 2. Dessa posição o programa verifica quais elementos serão envolvidos pela brita inserida. Se nenhum desses elementos tiver o valor 0 isto implica em sucesso da disposição da brita e o algoritmo passa para o próximo passo, caso contrário ele sorteia um novo elemento com o valor 2. A cada passo os elementos com valor 0 e 1 aumentam e os elementos com valor 2 diminuem, tornando o processo um pouco mais lento.

Com a disposição das britas é necessário obter as coordenadas dos seus nós no sistema referente ao espécime, identificado como sistema de referência global. Como já citado, as britas são transladadas pelos seus centros para o centro do elemento, que possui coordenadas no sistema global, dessa forma basta somar as coordenadas locais do agregado rotacionado com as coordenadas do centro do elemento, obtendo as coordenadas globais para cada brita.

3 EXEMPLOS E RESULTADOS

Esse trabalho tem como principal objetivo gerar virtualmente espécimes de concreto considerando-o como material heterogêneo. A partir de dados de entrada que caracteriza o concreto, descrito na metodologia, é definido um espécime de concreto na forma de um paralelepípedo ou cilindro diferenciando o agregado graúdo da argamassa. Nas seções anteriores são discutidos todos os processos para obtenção da quantidade, forma e posição do agregado graúdo dentro do volume do espécime a ser gerado. O programa desenvolvido nesse trabalho fornece imagens tridimensionais do espécime gerado assim como imagens bidimensionais de seções transversais do espécime com posições de corte definidas pelo usuário.

Além dos parâmetros de saída referentes à imagem do espécime gerado descritos no parágrafo anterior, o programa desenvolvido nesse trabalho fornece uma malha de elementos finitos tridimensional ou bidimensional. No caso da discretização tridimensional do espécime a forma do elemento finito é um paralelepípedo com oito nós, já a discretização bidimensional da seção transversal é definida por um elemento retangular de quatro nós. A discretização é gerada de forma estruturada a partir dos parâmetros de entrada do número de divisões nas direções x , y e z do espécime a ser gerado. Os arquivos de saída para as malhas de elementos finitos fornecem o número de nós da discretização e suas coordenadas, também fornece o número de elementos e os nós aos quais eles estão conectados e o tipo de material de cada elemento, ou seja, brita ou a argamassa.

No desenvolvimento do programa foi usado uma metodologia que emprega uma estrutura básica de POO (Programação Orientada para Objetos), consistindo em uma hierarquia de classes responsáveis por cada faceta do sistema a ser desenvolvido. A partir desta definição pode-se determinar os métodos de cada classe e desenvolver o código utilizando a linguagem de programação C++ (Silva Filho, 2010), que tem um nível de padronização que permite utilização em diversas plataformas e compiladores (MS-Windows, Linux, vários sistemas operacionais do tipo UNIX), assegurando sua portabilidade. Para a implementação do código computacional e da interface gráfica foi utilizado o *software* Visual Studio Express 2010 (disponível em <http://www.microsoft.com/visualstudio/en-us/products/2010-editions/express>). A Figura 3.1 ilustra a

interface gráfica desenvolvida para facilitar a entrada de dados necessária para a geração do espécime virtual e a visualização dos dados de saída do programa implementado nesse trabalho.

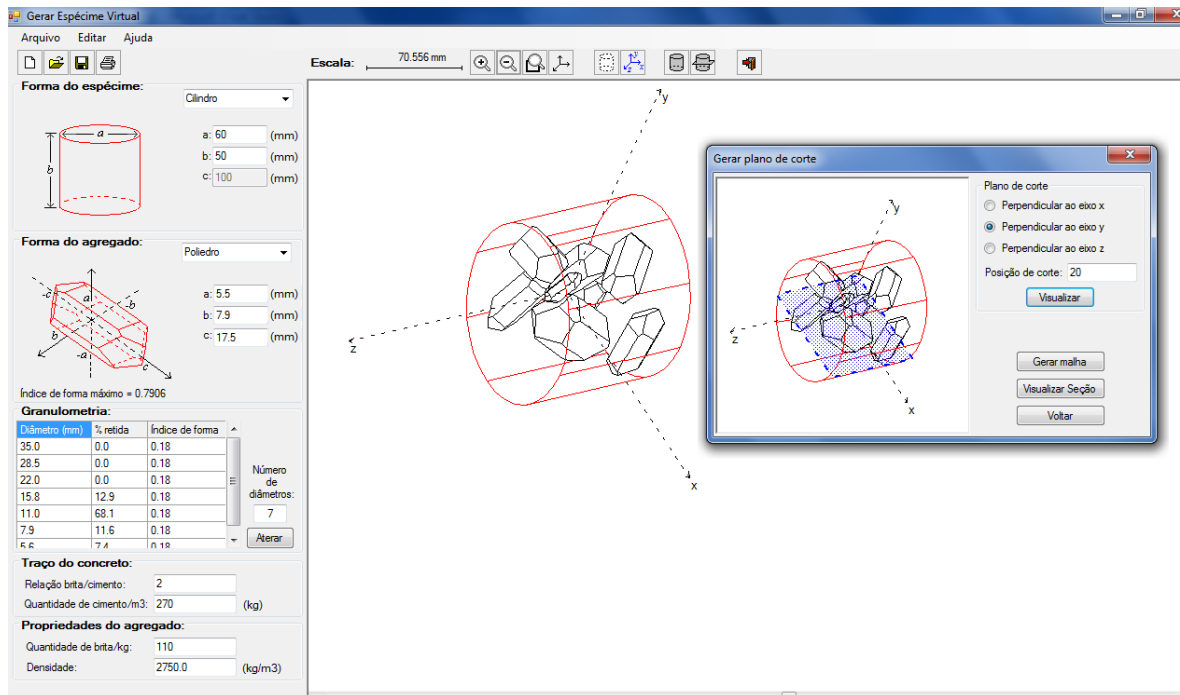


Figura 3.1 - Interface gráfica do programa.

3.1 Exemplo 1

Nesse exemplo tem-se o objetivo de verificar o posicionamento e a configuração rotacional aleatórios dos agregados graúdos, dentro do volume do espécime gerado, sem que estes extrapolem os limites do espécime e ocupem o mesmo lugar. Dessa forma foram usados parâmetros de entrada que gerem um espécime com um número pequeno de agregados graúdos.

A Figura 3.2 abaixo ilustra, para diferentes posições do sistema de referência, o espécime cilíndrico de diâmetro 40mm e altura de 800mm. Na geração virtual desse espécime foi adotado para o concreto o traço em peso de 1 : 6,2 : 2,5 : 0,65. A quantidade de cimento considerada para esse exemplo foi de 240 kg para um metro cúbico de concreto, também foi considerada a relação de 110 agregados graúdos para um kg de amostra do mesmo. Para a forma do agregado graúdo foi considerado o poliedro descrito na metodologia. Na verificação do índice de forma e da relação brita-massa foi utilizada a densidade de 2750kg/m^3 para o agregado graúdo.

A Tabela 3.1 abaixo mostra a granulometria do agregado graúdo e o índice de forma por faixa da análise granulométrica usada na geração do espécime mostrado na Figura 3.2. O diâmetro usado para cada faixa granulométrica foi definido pegando o valor médio dos diâmetros das peneiras que correspondem à faixa analisada.

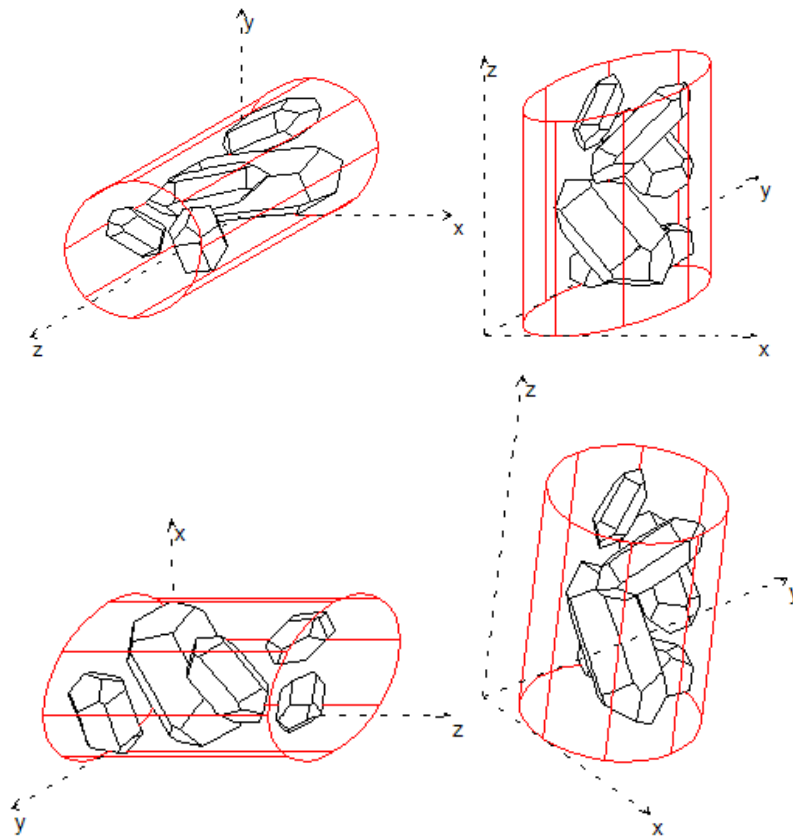


Figura 3.2 – Espécime cilíndrico com 5 britas.

Tabela 3.1 - Análise granulométrica e índice de forma do agregado graúdo

Peneira(mm)	%Retida	Diâmetro usado	Índice de forma
32	--	--	--
25	--	--	--
19	--	--	0,18
12,5	12,9	15,8	0,18
9,5	68,1	11,0	0,18
6,3	11,6	7,9	0,18
4,8	7,4	5,6	0,18
....			
Fundo	0		0,18
$D_{max}(mm)$		12,5	

3.2 Exemplo 2

A Figura 3.3 abaixo mostra um espécime na forma de um paralelepípedo de dimensões 50 x 50 x 50 mm gerado a partir de uma brita padrão na forma de um poliedro com $a = 11mm$, $b = 14.8mm$ e $c = 35mm$ (ver seção 2.2). Na geração virtual desse espécime foi adotado para o concreto o traço em peso de 1 : 5,2 : 2,7 : 0,65. A quantidade de cimento considerada para esse exemplo foi de 260 kg para um metro cúbico de concreto, também foi considerada a relação de 140 agregados graúdos para um kg de amostra do mesmo. Na verificação do índice de forma e da relação número brita-massa deste agregado foi utilizada a densidade de $2750kg/m^3$ para o agregado graúdo.

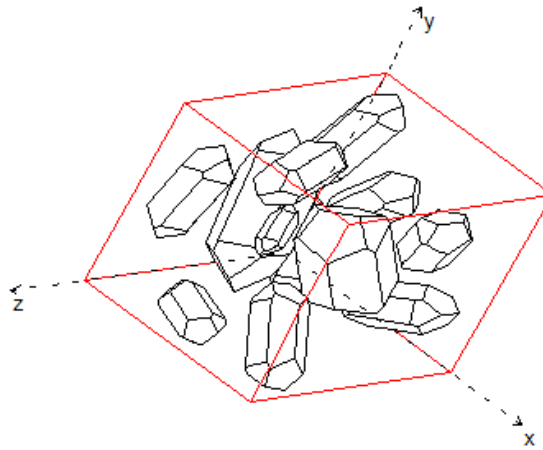


Figura 3.3 – Agregado graúdo dentro do volume do espécime.

A quantidade de agregado graúdo disposto dentro do espécime mostrado na Figura 3.3 é obtida conforme descrito na seção 2.3 desse trabalho, ou seja:

$$q_{agr} = cim \times vol \times cb \times bm = 260 \frac{kg}{m^3} \times 0,000125m^3 \times 2,7 \times 140 \frac{britas}{kg} = 12,2britas \quad (3.1)$$

A quantidade de agregado graúdo deve ser distribuída entre as diferentes faixas da análise granulométrica de acordo com as suas porcentagens. A Tabela 3.2 abaixo mostra para cada faixa granulométrica, o diâmetro característico usado, a porcentagem da análise granulométrica, o índice de forma do agregado, a quantidade de agregado graúdo, e as dimensões do agregado padrão corrigidas de acordo com o diâmetro da faixa granulométrica, o índice de forma, a relação brita-massa do agregado, e a densidade do agregado.

Tabela 3.2 – Quantidade e dimensões da brita por faixa granulométrica

Peneira (mm)	%Retida	Diâmetro usado	Índice de forma	Quantidade de brita	<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>c</i> (mm)
32	--	--	--	--	--	--	--
25	--	--	--	--	--	--	--
19	--	--	--	--	--	--	--
12,5	12,9	15,8	0,18	2	15.485	16.096	37.884
9,5	68,1	11,0	0,18	8	9.433	11.206	24.823
6,3	11,6	7,9	0,18	1	7.742	8.048	18.942
4,8	7,4	5,6	0,18	1	5.488	5.705	13.427
....			---	--	--	--	--
Fundo	0		---	--	--	--	--
D _{max}		12,5mm	--	--	--	--	--

De forma aleatória os agregados com quantidade e dimensões definidos na Tabela 3.2 são distribuídos dentro do volume do espécime. A Tabela 3.3 a seguir mostra as coordenadas da posição de cada agregado no espécime e também a matriz de rotação com termos aleatórios definida para cada agregado.

As coordenadas dos vértices da brita padrão são definidos em um sistema de referência local com a origem no centro da brita. No método de locação das britas dentro do volume do espécime, as coordenadas primeiramente são rotacionadas para um novo sistema de referência local, através da matriz de rotação definida de forma aleatória mostrada na Tabela 3.3, e posteriormente são transladadas para o sistema de referência global usando a posição de sorteio aleatória mostrada na mesma tabela.

3.3 Exemplo 3

Uma das motivações de gerar um espécime virtual de concreto considerando-o como material heterogêneo é poder identificar em uma discretização do espécime os materiais com comportamentos mecânicos distintos, no caso do concreto o agregado graúdo e a argamassa. Na literatura a discretização do contínuo para uma análise mecânica numérica deste é chamada de malha de elementos finitos. Podem ser utilizadas várias formas para o elemento finito de discretização do contínuo. Nesse exemplo foi utilizado um elemento na forma de um paralelepípedo com oito nós para discretização tridimensional, e um elemento retangular com quatro nós para discretização bidimensional.

Tabela 3.3 – Distribuição aleatória do agregado graúdo

Agregado	Posição dentro do espécime			Matriz de rotação
	x (mm)	y (mm)	z (mm)	
1	14.50	26.50	30.50	$Rot = \begin{bmatrix} -0.51777 & 0.68178 & -0.51679 \\ 0.22546 & 0.69146 & 0.68633 \\ 0.82528 & 0.23885 & -0.51173 \end{bmatrix}$
2	36.50	27.50	28.50	$Rot = \begin{bmatrix} 0.07535 & 0.82555 & 0.55927 \\ 0.83673 & 0.25274 & -0.48581 \\ -0.54241 & 0.50456 & -0.67172 \end{bmatrix}$
3	23.5	31.5	13.5	$Rot = \begin{bmatrix} -0.58586 & -0.80973 & -0.03305 \\ -0.70105 & 0.52685 & -0.48057 \\ 0.40655 & -0.25838 & -0.87633 \end{bmatrix}$
4	13.5	11.5	12.5	$Rot = \begin{bmatrix} -0.52478 & 0.75404 & -0.39500 \\ -0.31587 & -0.60340 & -0.73221 \\ -0.79046 & -0.25948 & 0.55483 \end{bmatrix}$
5	40.5	32.5	12.5	$Rot = \begin{bmatrix} 0.44280 & 0.78734 & 0.42896 \\ -0.39317 & -0.25946 & 0.88209 \\ 0.80581 & -0.55925 & 0.19467 \end{bmatrix}$
6	40.5	10.5	40.5	$Rot = \begin{bmatrix} 0.66256 & -0.69938 & 0.26810 \\ 0.19238 & -0.18703 & -0.96333 \\ 0.72388 & 0.68984 & 0.01062 \end{bmatrix}$
7	37.5	11.5	8.5	$Rot = \begin{bmatrix} -0.90300 & -0.42226 & 0.07921 \\ 0.04220 & 0.09631 & 0.99445 \\ -0.42755 & 0.90134 & -0.06915 \end{bmatrix}$
8	7.5	29.5	44.5	$Rot = \begin{bmatrix} -0.17099 & -0.98277 & 0.07010 \\ 0.87959 & -0.12020 & 0.46029 \\ -0.44393 & 0.14036 & 0.88499 \end{bmatrix}$
9	6.5	37.5	7.5	$Rot = \begin{bmatrix} -0.15489 & -0.92332 & 0.35139 \\ 0.92187 & -0.00721 & 0.38741 \\ -0.35518 & 0.38395 & 0.85230 \end{bmatrix}$
10	22.5	43.5	36.5	$Rot = \begin{bmatrix} -0.36978 & 0.04905 & -0.92782 \\ -0.68044 & -0.69426 & 0.23448 \\ -0.63265 & 0.71804 & 0.29010 \end{bmatrix}$
11	22,5	5,5	44.5	$Rot = \begin{bmatrix} -0.95864 & 0.09026 & -0.26992 \\ 0.20008 & 0.88820 & -0.41358 \\ 0.20242 & -0.45049 & -0.86953 \end{bmatrix}$
12	27.5	31.5	40.5	$Rot = \begin{bmatrix} 0.49005 & -0.53358 & 0.68930 \\ 0.35746 & 0.84422 & 0.39937 \\ -0.79502 & 0.05068 & 0.60445 \end{bmatrix}$

A Figura 3.4 a seguir mostra um espécime cilíndrico de dimensões 100 x 160 mm. Na geração virtual desse espécime foi adotado para o concreto o traço em peso de 1 : 4,8 : 2,7 : 0,65. A quantidade de cimento considerada para esse exemplo foi de 270 kg para um metro cúbico de concreto, também foi considerada a relação de 90 agregados graúdos para um kg de amostra do mesmo. Na verificação do índice de forma e da relação número de agregado graúdo por peso de amostra deste agregado foi utilizada a densidade de 2750kg/m^3 para o agregado graúdo.

A Figura 3.5 a seguir mostra uma seção transversal obtida do espécime cilíndrico mostrado na Figura 3.4. As figuras mostram as interseções dos agregados graúdos com o plano de corte e também a malha de elementos finitos gerada sobre este plano.

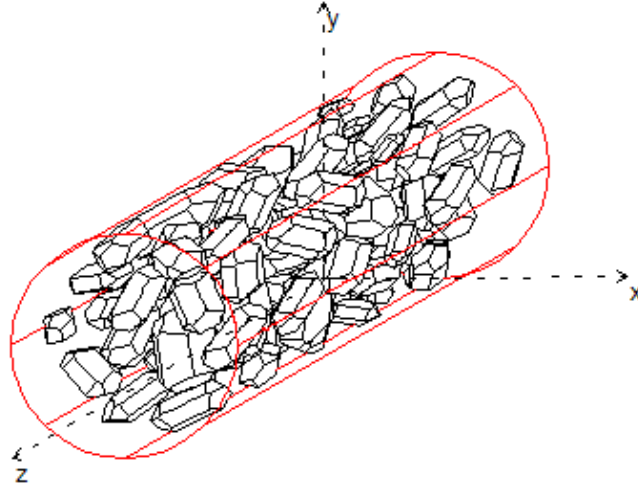


Figura 3.4 – Espécime cilíndrico de 100 x 160 mm com 83 britas

Na Figura 3.5 o plano de corte foi feito perpendicularmente a altura do cilindro (eixo z) a uma distância de 70mm desta. Na malha de elementos finitos mostrada na Figura 3.5 os diferentes materiais são identificados por diferentes tonalidades.

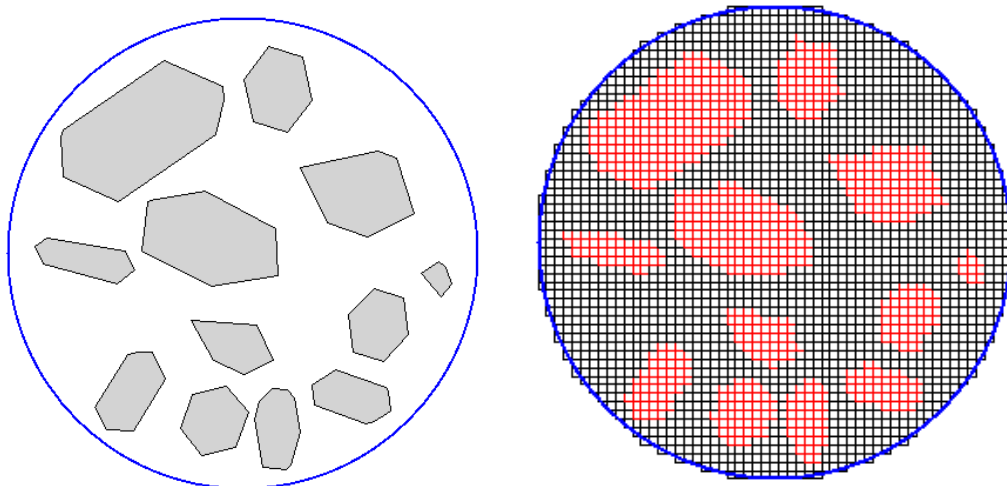


Figura 3.5 – Plano de corte a 70mm da base do cilindro.

O programa desenvolvido nesse trabalho gera, além de imagens do espécime e seções deste, arquivos de saída de discretização do espécime. Esses arquivos servirão como base de um arquivo de entrada de um programa de análise do comportamento mecânico do espécime de concreto usando um processo numérico baseado no método dos elementos finitos. Nesse método o contínuo é discretizado em elementos na forma de poliedros (discretização tridimensional) ou polígonos (discretização

bidimensional) os quais são definidos pelos seus vértices, chamados na literatura de nós. Dessa forma, o arquivo de saída fornece o número de nós e suas coordenadas, o número de elementos e os nós aos quais estão conectados. Também é identificado para cada elemento o tipo de material.

4 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresenta um método para geração virtual de espécime de concreto considerando-o como material heterogêneo. O fato do agregado graúdo e a argamassa apresentarem propriedades mecânicas distintas, e fissuras em elementos de concreto surgirem apenas na argamassa e entre a argamassa e o agregado graúdo, motivam a consideração do concreto como material heterogêneo formado pelo agregado graúdo e a argamassa.

O programa desenvolvido nesse trabalho permite a geração de um espécime na forma de um paralelepípedo ou cilindro. A partir de dados que caracteriza o concreto e o agregado graúdo o programa determina a quantidade e forma das britas que serão dispostas dentro do volume do espécime. O método de disposição das britas dentro do espécime é feito totalmente de forma aleatório, ou seja, tanto a definição da posição de ocupação da brita no espaço limitado pelo espécime, quanto a definição de uma possível rotação qualquer em relação ao seu centro são obtidas de forma aleatórias.

Na seção 3 são mostrados alguns exemplos de espécimes de concreto gerados pelo programa desenvolvido nesse trabalho. Nesta seção são apresentados os dados de entrada utilizados para geração virtual dos espécimes e imagens tridimensional e bidimensional de seções transversais dos espécimes obtidos. Também são mostradas imagens das malhas de elementos finitos geradas sobre as seções de cortes no espécime. A partir desses resultados pode-se concluir que o método desenvolvido nesse trabalho para geração virtual de um espécime de concreto considerando-o como material heterogêneo se porta de forma satisfatória.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a UFSJ (Universidade Federal de São João Del Rei) e o CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

Carol, I., López, C. M., Roa, O. Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements. **I. J. for Numerical Methods in Engineering**, v. 52, n. 3, p. 193-215. Set., 2001. ISSN: 0029-598.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados graúdo – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2006.

Petrucci, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**, 13ª ed. São Paulo: Editora Globo, 1998. 307p.

Ribeiro, C. C., Pinto, J. D. S., Starling, T. **Materiais de construção civil**, 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 102p. ISBN: 8570412967.

Silva Filho, A. M. **Introdução à programação orientada a objeto com C++**. 1ª ed. São Paulo: Editora Campus/Elsevier, 2010. 312p. ISBN 9788535237023.

Stankowski, T. **Numerical simulation of progressive failure in particle composites**. Doctoral Thesis, Department of CEAE, University of Colorado, Boulder, CO, U.S.A., 1990.