

ANÁLISE DA HOMOGENEIDADE DE AMOSTRAS BIOCIMENTADAS ATRAVÉS DE MICROTOMOGRÁFIA A RAIO-X

ANALYSIS OF HOMOGENEITY OF BIOCEMENTATION SAMPLES THROUGH X-RAY MICROTOMOGRAPHY

Ânderson Dalbosco Gehlen¹, Maciel Donato²

¹ Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, BR 285, Bairro São José, 99001-970 - Passo Fundo – RS – Brasil. E-mail: 136605@upf.br

² Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, BR 285, Bairro São José, 99001-970 - Passo Fundo – RS – Brasil. E-mail: mdonato@upf.br

RESUMO

A busca por métodos sustentáveis de reforços em solos, proporcionou um estudo sobre a técnica de biocimentação, em solo arenoso. De acordo com estudos recentes sobre a biocimentação, há muito a ser estudado sobre a homogeneidade (MONTROYA et al., 2012), e em alguns estudos como o de (CHENG E CORD-RUWISCH, 2012) relatam a ocorrência de cimentação a certas profundidades, no entanto não apresentam dados da distribuição porosa na estrutura. Através destas considerações, esta pesquisa buscou analisar a homogeneidade de solo biocimentado, com areia de Osório/RS, construindo parâmetros para retratar a biocimentação no microtomógrafo a raio-x, modelo InspeXio SMX-90CT, da marca Shimadzu. Por ser um equipamento de análise não destrutiva, tornando sua análise de maior interesse para pesquisas que pretendem contribuir com estudo da técnica biocimentante. Obtendo com estas varreduras a distribuição da homogeneidade na estrutura biocimentada. Comparando os volumes de vazios com os laudos obtidos no microtomógrafo a raio-x, do solo composto por areia de Osório/RS, sem adição de agentes bioestimulante.

Palavras-chave: Microtomografia a raio-x. Biocimentação. Areia de Osório/RS.

ABSTRACT

The search for sustainable methods of reinforcement in soils, provided a study on a technique of biocementation, in sandy soil. According to recent studies on biocementation, there is much to be studied about homogeneity (MONTROYA et al., 2012), and in some studies such as of (CHENG E CORD-RUWISCH, 2012) report the occurrence of cementation at certain depths, but do not present data of the porous distribution in the structure. Through these considerations, this research sought to analyze the homogeneity of soil biocementation, with sand of Osório/RS, constructing parameters to portray biocementation in the x-ray microtomography, model InspeXio SMX-90CT, of brand Shimadzu. Because it is a non-destructive analysis equipment, making its analysis of greater interest for researchers that intend to contribute with study of the biocementation technique. Obtaining with these scans the distribution of homogeneity in the biocemented structure. Comparing the void volumes with the reports obtained in the microtomograph the x-ray of the soil composed of Osório/RS sand, without addition of biostimulating agents.

Keywords: X-ray microtomography. Biocementation. Areia de Osório/RS.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil encontra-se em um patamar de evolução constante, principalmente quando pensamos na evolução de técnicas de reforço em solo. O aprimoramento do solo pode ser realizado em distintas forma, desde que possibilite atribuir propriedade para suportar infraestruturas novas ou reabilitadas.

Os métodos convencionais incluem em densificar o solo com energia mecânica ou injeção de um agente de ligação, como cimento, epóxi ou silicatos (KAROL, 2003), não esquecendo da técnica de reforço com materiais sintéticos que requerem uma grande quantidade de energia na sua produção e aplicação (DEJONG et al., 2010). No entanto, surgiram novas técnicas, técnicas alternativas baseadas na bioquímica, que apresentam grandes benefícios no ganho de resistência, além de fornecer uma solução mais natural e sustentável (MITCHELL E SANTAMARINA, 2005; IVANOV E CHU, 2008; DEJONG et al., 2013).

A alternativa, é um procedimento de bioestimulação, que ainda esta em fase de estudos, precisando de uma maior compreensão em sua distribuição estrutural de poros (MONTROYA, 2012). Para análises internas em materiais existem demasiados métodos, no entanto, há um que esta sendo constantemente aplicada em distintas áreas. É o método Computadorizado de Microtomografia a raio-x, ela fornece análises precisas do material em estudo, além de ser uma análise não destrutiva. Proporcionado navegar internamente na amostra, através de visualizações tridimensionais, além de fornece quantificações de volume e área (FERNANDES et al, 2012).

2. EQUIPAMENTO E MATERIAIS

2.1. Microtomógrafo a raio-x

A microtomografia a raio-x é uma técnica computadorizada, de análise não destrutiva que emite uma fonte de radiação ionizante sobre a amostra. A técnica consiste em uma atenuação angular dos raios ou do objeto em análise. A transmissão dos raios se dá de um ponto fixo o qual direcionará a amostra que sofrerá a rotação (SANTOS, 2015), conforme a (figura 1).

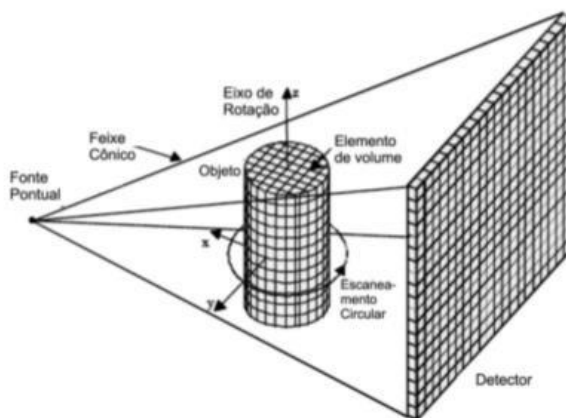


Figura 1 – Funcionamento do microtomógrafo (MACHADO, 2012).

A técnica é conhecida internacionalmente como microCT, por ter a mesma lógica do princípio físico do CT, sua análise representa a produção de seções transversais de um material em uma projeção de um plano (MACHADO, 2012).

Os raios emitidos sofrem atenuações, e ao passar pela amostra em análise sofrem uma variação de intensidade, os mesmos acabam reduzindo. A atenuação dos raios emitidos pelo microtomógrafo depende diretamente da fonte de energia, e sua redução em contato com a amostra em análise identifica diretamente a densidade do material. A variação de intensidade é captada e medida pelo detector atrás da amostra, o qual é responsável pela reconstrução de estrutura em estudo em imagens 2D e 3D (BOERCKEL et al., 2014). A (figura 2) representa o processo de aquisição de dados e reconstrução reproduzida pelo microtomógrafo a raio-x.

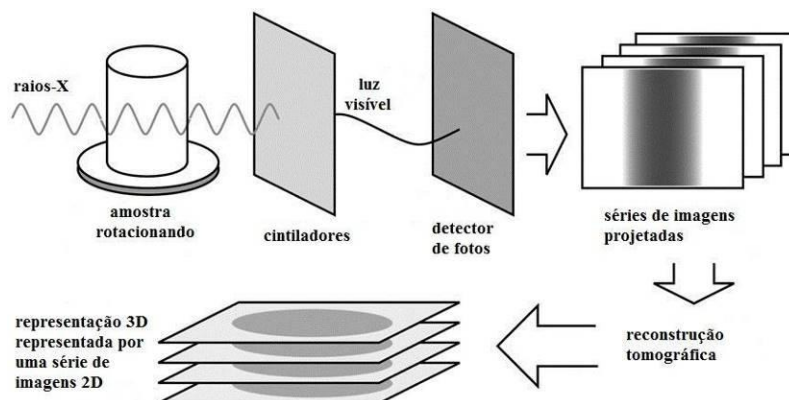


Figura 2 – Aquisição de dados e reconstrução (LANDIS e KEANE, 2010).

O equipamento apresenta como dispositivos em seu interior: tubos acoplados de raio-x com pontos fixos, colimador (objetivo de suavizar e distribuir o feixe de raio-x em geometrias cônicas fechadas ou abertas), filtro de radiação, detector FPD e uma bancada rotatória para suporte da amostra (SHIMADZU, 2014). A (figura 3) representa o funcionamento do equipamento em estudo.

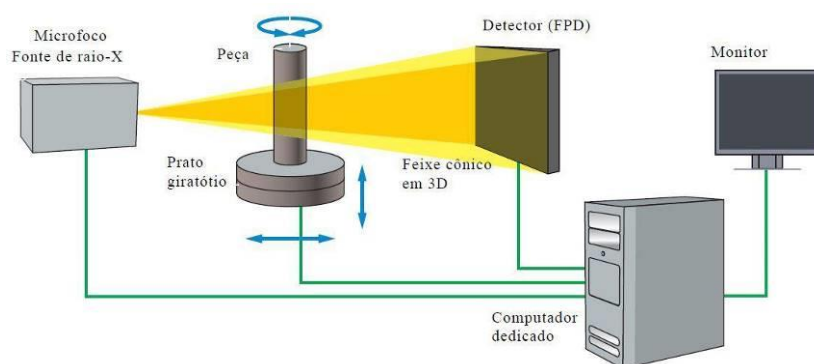


Figura 3 – Esquema do funcionamento do equipamento em estudo (SHIMADZU®, 2014).

O microtomógrafo Shimadzu SMX-90CT, apresenta algumas especificações que são possíveis de ser observada na (tabela 1).

Tabela 1 – Especificações do equipamento (SHIMADZU®, 2014).

Saída máxima de raio-X	110 μ A a 90 kV (10 W)
Método de escaneamento	offset de feixe cônico
Requisitos do ambiente	
Temperatura	10 á 30 °c
Humidade	< 80%
Amostras	
Tamanho máximo	$\varnothing$ = 160 mm e H = 100 mm
Peso máximo	4 kg incluindo o suporte

2.2. Biocimentação

A biocimentação realizada pelo homem é uma atividade que acontece situacionalmente na natureza, que está sendo aprimorada em laboratório, demonstrando dados positivos em aumento de capacidade de carga em areias, por resistir a falhas quando submetidas a cargas estáticas ou dinâmicas. Na natureza, a cimentação ocorre devido a deposição química, decorrente da água que percola nos vazios do solo transportando subprodutos do intemperismo.

A cimentação artificial inclui principalmente a precipitação de calcita ou carbonato de cálcio no interior dos solos, os quais são responsáveis por melhorar as propriedades do solo. Isto ocorre quando o metabolismo microbiano catalisa reações químicas com alguns substratos. A ação biológica-química dessas reações provoca a precipitação de calcita, que serve como ligante entre as partículas de solo, tornando-as mais rígidas e mais resistentes (RITA, 2014).

O processo de biocimentação é conhecido internacionalmente como MICP (Microbially Induced Carbonate Precipitation). A precipitação de carbonato de cálcio para a formação de calcita ocorre em quatro fases distintas, são elas: a inserção de cálcio no solo, posteriormente inicia a alteração do pH movida pela ação biológica das bactérias, a concentração de dióxido de carbono e finalmente a concentração de micro-organismos (MUÑETÓN, 2013).

Estudos comprovam que ao finalizar a técnica de tratamento do solo, as propriedades de permeabilidade são alteradas, tornando-o menos permeável e conseqüentemente mais resistente. Com esta comprovação a biocimentação poderá ser utilizada em distintas áreas de aplicação como: controlar a ruptura hidráulica em barragens de terra, auxiliar no reforço em solos que receberão fundações superficiais e controlar possíveis falhas geológicas reduzindo a erosão (VAN PASSEN, 2010).

STABNIKOV (2011), comprovou que a biocimentação altera a permeabilidade no solo, ao realizar um estudo com areia, onde adicionou ao solo 0,6 g de cálcio por cm^2 , comprovando uma redução de 10^{-4} m/s para 10^{-7} m/s, devido a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3).

CHENG E CORD-RUWISCH (2012), ao analisar a biocimentação em solo arenoso, obteve com a cimentação biológica, homogeneidade até a profundidade de um metro.

Existem muitos estudos apresentados sobre a biocimentação, contudo ainda se tem muito a apreender, principalmente quando pensamos em utiliza-lo nas aplicações de engenharia, pois há poucas informações quando falamos em heterogeneidade e a estrutura e distribuição dos poros de solos biocimentados (MONTTOYA, 2012).

2.3. Areia de Osório, RS

A areia da cidade de Osório do Rio Grande do Sul, apresenta uma propriedade única, a granulometria é uniforme e sua composição é formada por grãos finos. A composição granulométrica pode ser observada na (figura 4).

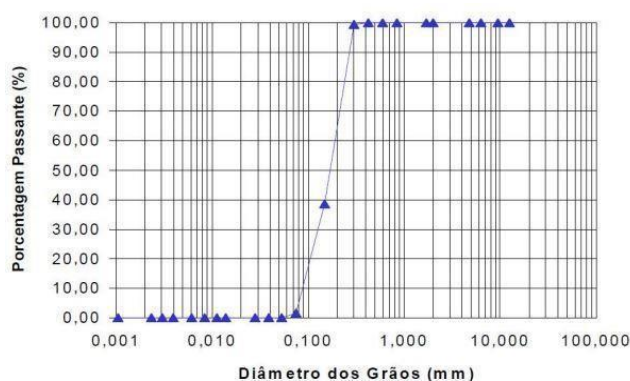


Figura 4 – Curva granulométrica da areia de Osório, RS (CRUZ, 2008).

A areia de Osório se demonstrou de interesse a pesquisa por tratar-se de um solo bibliograficamente difundido. Os índices físicos da areia de Osório podem ser observados conforme a (tabela 2).

Tabela 2 – Índices físicos da areia de Osório (FONINI, 2008).

Índices Físicos	Areia de Osório
Densidade real dos grãos (γ_s)	26,3 kN/m ³
Coeficiente de uniformidade (Cu)	2,1
Coeficiente de curvatura (Cc)	1
Diâmetro efetivo (D10)	0,09 mm
Índice de vazios (e máximo)	0,9
Índice de vazios (e mínimo)	0,6

2.4. Bioestimulação

A técnica adotada para a obtenção da biocimentação foi a bioestimulação, esta técnica só é possível a partir da injeção de nutrientes que proporcionam a aceleração metabólica das bactérias nativas, forçando a precipitação de carbonato de cálcio para a formação de calcita, injetadas sob ação da gravidade.

A composição nutritiva adotada para este trabalho, é a solução elaborada por (GARBIN, 2016). A solução foi escolhida mediante a um estudo realizado por (DALLAGNOL, 2018), o qual comparou a solução de (GARBIN, 2016) com outras três soluções de autores. Esta solução criada por (GARBIN, 2016), demonstrou ser mais eficiente que as demais, através de uma maior atividade de uréase, princípio ativo que é determinante para a produção de calcita. A (tabela 3) demonstra a solução de bioestimulação adotada.

Tabela 3 – Solução de Bioestimulação (GARBIN, 2016).

Reagente	Concentração (g/L)
Peptona	2
Extrato de Levedura	1
Cloreto de Amônia	10
Bicarbonato de Sódio	2,12
Ureia	30
Cloreto de Cálcio	56

A formação de calcita, ocorre em maior escala quando o PH no interior da amostra atinge valores mais altos, ou seja, quando o PH é neutro e tem tendência a partir para um PH alcalino. Para obter de forma mais acentuada a redução do número de poros, com o preenchimento por calcita, no microtomógrafo a raio-x, utilizou-se a concentração de duas vezes o número de vazios, onde em estudos como de (REZENDE, 2018) obteve valores de PH 8,48 na 12ª injeção.

As dosagens apresentaram ciclos de 48 horas e no máximo uma vez por semana ciclo de 72 horas. Todas as soluções foram verificadas antes de inserir no CP o PH de entrada, registrado pelo Phmetro, o qual era calibrado a cada verificação.

Para comprovar a ocorrência da bioestimulação, foram verificados o PH da solução passante até que a mesma não fosse mais possível, pela alternância de permeabilidade da amostra a cada injeção. Nos ensaios foram controladas as soluções passantes que percolou na amostra, observando os volumes e sua alternâncias durante as dez injeções.

3. MÉTODOS

3.1. Técnicas de controle e construção dos corpos de prova

A metodologia aplicada neste trabalho de conclusão de curso, de Engenharia Civil, se dá através de estudos da homogeneidade em solo biocimentado. Esta análise consiste basicamente na medição de um parâmetro importante para os estudos de reforços, com técnicas bioquímicas.

Foram construídos dois corpos de prova, conforme a (figura 5), um que recebeu a técnica bioquímica e outro que não recebeu a técnica, com tubos de PVC com 5 cm de diâmetro interno e 20 cm de altura, com partição vertical, e foram passados desmoldante para facilitar o desmolde. Antes de iniciar o ciclo de alimentação foram injetados 5 ciclos de água destilada, respeitando os intervalos de 48 horas nos dias da semana e nos finais de semana 72 horas, com a dosagem de duas vezes o índice de vazios, certificando que a solução química do desmoldante não ocasiona se uma seleção biológica indesejada.

Após a compactação das camadas o corpo de prova que não recebeu a biocimentação foi reajustado para a altura de 10 cm, altura limitante do equipamento de microtomografia. Cada CP apresenta uma utilidade, sendo eles: um para aplicação de biocimentação e outro com solo natural, o qual tem o objetivo de obter o parâmetro de alteração de solo biocimentado para suas características naturais através das análises no microtomógrafo a raio-x.



Figura 5 – Corpos de prova.

A inserção do solo dentro dos moldes foi da seguinte forma: foram calculados para uma densidade relativa de 50% e umidade inicial de 10%. A moldagem deu-se em uma distribuição de três camadas de solo composto de areia de Osório, a união de cada camada foi preparada escarificado o solo para uma melhor consolidação entre as camadas, conforme a (tabela 4).

Tabela 4 – Dados de moldagem do CP.

CARACTERÍSTICAS DE MOLDAGEM			
Peso específico aparente seco (g/cm ³)	1,536	emin	0,6
Peso específico real dos grãos	2,65	emax	0,85
umidade de moldagem (%)	10	Dr	0,5
Índice de vazios	0,725	solo seco	435,003
Diâmetro (cm)	5,2	água	43,5
Altura (cm)	10	total	478,503
Volume total (cm ³)	212,372	camada	119,626
Volume da camada (cm ³)	70,791	volume da 1° camada	89,258
massa de solo seco por camada (g)	108,751	volume da 2° camada	178,515
Peso específico úmido (g/cm ³)	1,536	volume da 3° camada	267,773
Umidade higroscópica (%)	0	Porosidade (%)	42,029
Massa de solo úmido por camada (g)	108,751	Volume de vazios (ml)	89,258
Massa de água por camada (g)	10,875	Volume de solução (ml)	178,515

Para a realização da construção do corpo de prova biocimentado, foram adotadas técnicas de controle, com a finalidade de obter de forma eficiente uma estrutura intacta para a análise no microtomógrafo a raio-x.

No topo do solo foi adicionado papel filtro, com a finalidade de evitar obstruções com a inserção da alimentação, reduzindo a possibilidade de construção de veios na percolação do líquido, o qual comprometeria a integridade do topo da amostra que apresentaria evidentemente nas imagens obtidas no microtomógrafo a raio-x. Antes da realizar cada injeção foi trocado o papel filtro, evitando também com que o topo da amostra torna-se impermeável antes do término das dez aplicações, conforme a (figura 6).



Figura 6 – Filtro a ser inserido no topo do CP.

Aplicou-se geotêxtil na base do molde, com a finalidade de conter a estrutura indeformada do solo, além de evitar com que o solo fosse transportado junto com a percolação da solução (REZENDE, 2018).

O corpo de prova foi acoplado em cima de uma tampa de PVC, a mesma foi modificada com furos, cujo objetivo é apenas dar espaço entre o solo biocimentado e o compartimento de coleta da solução passante. O compartimento de coleta da solução é um becker, que tem o objetivo de conter a solução para posterior avaliação do PH da solução que passou pelo processo de produção de calcita no interior da amostra, e também obter um controle volumétrico da solução passante.

O molde do CP biocimentado permaneceu temporariamente com uma altura maior que a capacidade do equipamento em estudo, com objetivo de conter a alimentação química até a percolação completa no solo, durante os 10 ciclos de injeção. Para a análise no microtomógrafo o CP foi readequado ajustando para altura limite da capsula do equipamento, que comporta moldes de no máximo 10 cm de altura. Conforme a (tabela 1) demonstrada anteriormente com as especificações da SHIMADZU.

3.2. Técnica de bioestimulação

A bioestimulação foi preparada no laboratório de Engenharia Ambiental da Universidade de Passo Fundo, e todas as técnicas foram realizadas em ambiente climatizado com temperatura média de 20°C.

O procedimento de dosagem, foi construído com uma programação que não se ultrapassa o intervalo de 72 horas entre as injeções, os quais estes ciclos maiores foram manuseados para acontecer aos finais de semana. As injeções aconteceram nos períodos semanais com ciclos de 48 horas, dispondo para dosagem as segundas, quartas e sextas-feiras, até completar o ciclo de dez dosagens.

A dosagem foi preparada para uma relação de duas vezes o volume de vazios, totalizando uma preparação controlada a ser inserida no solo de aproximadamente 178 ml. Para melhor controle e manipulação dos reagentes, foram ajustadas as soluções para um volume de 250 ml, valor este

adotado para uma melhor calibração dentro de um balão volumétrico. Com esta alteração a quantidade de material separado para cada solução recebeu um aumento percentual, o valor de cada reagente está presente na (tabela 5).

Tabela 5 – Formula para bioestimulação.

Reagentes	Solução de 250 ml
	Concentração (g/L)
Peptona	0,5 g
Extrato de Levedura	0,25 g
Cloreto de Amônio	2,5 g
Bicarbonato de Sódio	0,53 g
Ureia	7,5 g
Cloreto de Calcio	14 g

A preparação para a solução respeitou o limite de duas casas decimais para a balança de precisão, que apresenta valores na unidade de gramas. Ao preparar a solução foram avaliados o PH de entrada da solução. Com o mesmo, é possível validar se a solução está com as percentagens corretas de cada reagente, apresentando PH aproximado de $7,20 \pm 0,05$. O (gráfico 1) representa esquematicamente todas as dez dosagens e seus valores de PH de entrada da solução.

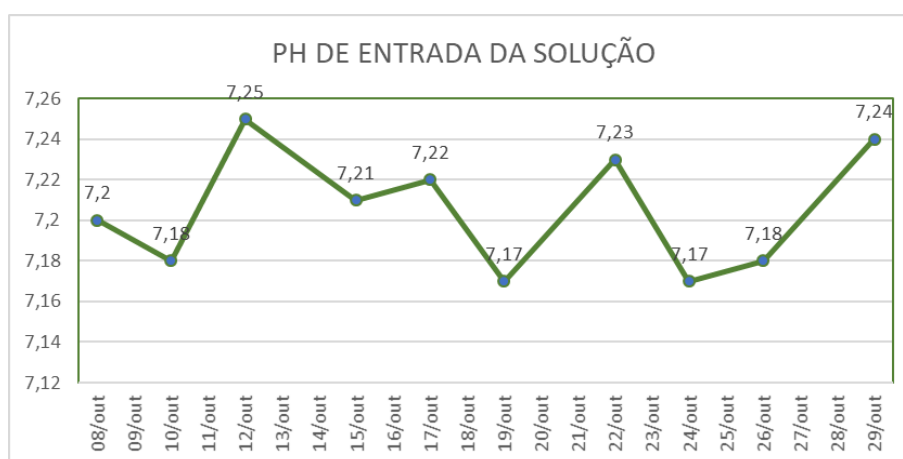


Gráfico 1 – Esquema representativo do PH de entrada da solução para cada dosagem.

As soluções bioestimuladoras em contato com o solo e suas bactérias nativas, em um ambiente climatizado, reproduziram um habitat mais estável para a produção de calcita, o qual em sua segunda dosagem demonstrou uma evolução do PH, obtendo o valor de 8,31, um ambiente alcalino adequado para a precipitação de CaCO_3 (DEJONG et al., 2010).

A bioestimulação nesse experimento apresentou o maior pico de PH da solução passante nas dosagens que aconteceram nos dias 15 e 22 de outubro, onde a solução teve um intervalo de 72 horas para a coleta de informações, podendo este intervalo maior produzir algumas precipitações de calcita a mais que as dosagens com 48 horas. O valor encontrado de PH foi de 8,53. Já nas dosagens com intervalos de 48 horas o valor do PH maior foi de 8,46, este valor é referente a quarta dosagem.

O experimento na sua sétima dosagem começou a demonstrar uma variação acentuada de permeabilidade, passando apenas 27,8% da solução. Na sua oitava, nona e decima dosagem o solo tornou-se impermeável, não passando a solução. O (gráfico 2) representa os valores de PH de saída para as dosagens e o (gráfico 3) representa a variação de permeabilidade do solo em mL.

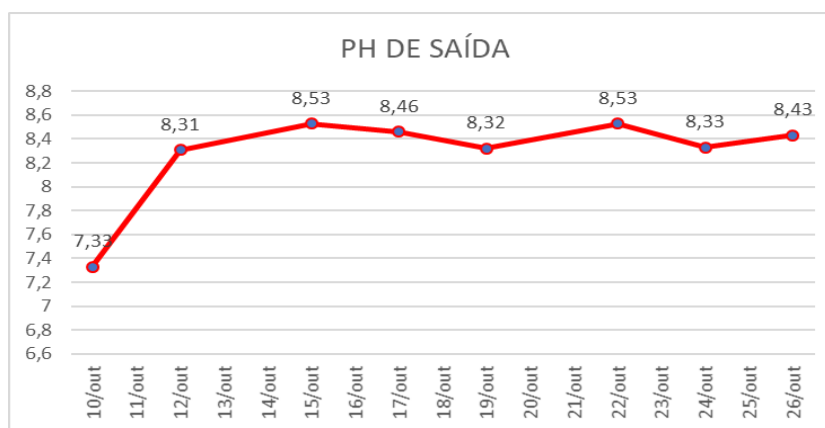


Gráfico 2 – Valores de PH de saída.

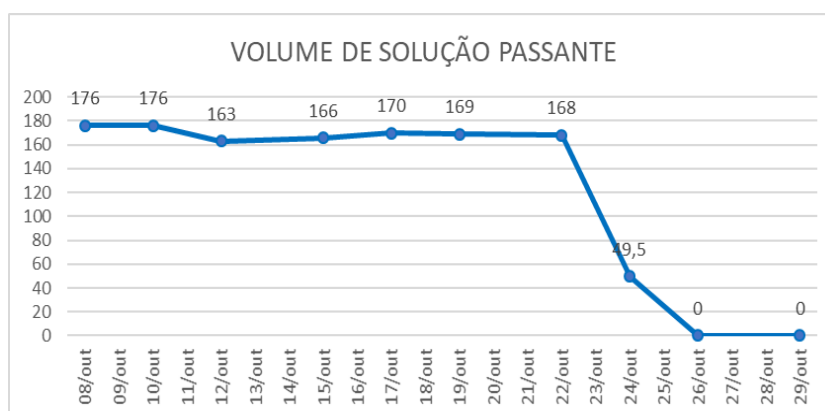


Gráfico 3 – Variação de permeabilidade do solo em ml.

3.3. Preparação do microtomógrafo a raio-x

Por meio do microtomógrafo a raio-x, equipamento este situado no Centro Tecnológico de Soledade, local onde aconteceram os estudos dos corpos de prova, foram realizados pela primeira vez, uma análise em solos biocimentados. Cabe ressaltar que o presente equipamento foi adquirido para análise de pedras preciosas e peças da indústria metalúrgica, com uso para varredura em materiais com maior densidade e menor porosidade, apresentando configuração padrão para estes materiais em seu manual de fabricação, sendo o presente estudo de maior complexidade ao ser mapeado.

3.4. Parâmetros do microtomógrafo a raio-x

O microtomógrafo estudado da marca Shimadzu, modelo SMX-90CT, é um equipamento de bancada, que fornece imagens com alta resolução, permitindo análises precisas no interior da amostra em estudo, promovendo uma nova alternativa de estudo para as técnicas de biocimentação.

O parâmetro inicial a ser adotado é o “Ray” ou Raio, responsável por determinar a potência de funcionamento a ser utilizado nas análises. Cada material apresenta uma faixa determinada de potência a ser trabalhada. O microtomógrafo apresenta o valor limite de 90 KV, e ao escolher um valor de potência o equipamento se adequa para melhor corrente de análise. O limitante de corrente do equipamento é de 110 uA (SHIMADZU, 2014).

O equipamento apresenta uma gama de funcionalidades, com alguns valores adimensionais. Em seu painel de configurações, após configurar a potência de funcionamento, o equipamento apresenta sete funcionalidades. Estas configurações são responsáveis por definir a qualidade das

imagens obtidas e a quantificação de dados mais próxima do real. A combinação correta destes parâmetros é principal para melhor caracterizar o material em estudo. Os sete parâmetros responsáveis pela melhor obtenção de dados e caracterização das imagens são:

“Number of Views” – Número de visualizações: esta configuração é responsável por determinar o número de projeções a serem feitas; elas compõem a quantidade do número de visualizações realizadas em uma rotação completa da bancada com o material em análise. Alterando este valor para um número inferior fará com que a bancada gire com uma velocidade maior, reduzindo o número de projeções, e consequentemente reduzindo a qualidade da imagem;

“Average” – Média: determina o número de varredura ou imagens adquiridas. Com a alteração deste parâmetro alterará diretamente na velocidade com que a bancada rotaciona. Reduzindo este valor fará com que a bancada gire a uma velocidade maior, reduzindo o tempo de aquisição de dados, aumentando os defeitos ou ruídos. Este parâmetro é o principal fator que determina o tempo de operação do equipamento em uma análise, as recomendações do manual técnico da Shimadzu, é que a análise não ultrapasse o período de 30 minutos, para não reduzir a vida útil dos tubos de raio-x;

“Scanning Count” – Contagem de Digitalização: determina a varredura numérica que acontecerá no campo de visualização vertical, identificado como eixo Z ou FOV Z. O equipamento apresenta um limitante de 26,3 mm, altura do feixe, caso a amostra apresente um tamanho maior no campo vertical, ao completar a primeira análise, dando uma volta completa, o feixe de raio-x será ajustado para camada inferior;

“Image Size” – Tamanho da Imagem: determina quantidade de fatias ou pixels que o equipamento emite na obtenção de dados para formar uma imagem, determinando sua resolução e tamanho. O equipamento em estudo tem a opção de 512x512 pixels ou 1024x1024 pixels, optando por uma resolução maior como 1024x1024 pixels o equipamento terá um tempo mais elevado na obtenção e processamento da imagem;

“Scaling Coefficient” – Coeficiente de Escala: é um parâmetro que determina os tons de cinza, este parâmetro pode ser diretamente correlacionado com a densidade do material. A adoção correta deste valor determinará diretamente o contraste da imagem do material em estudo.

“Slice Width” – Largura da Fatia: é responsável por determinar o número médio de linhas do detector, para cada fatia de imagem. Aumentando este valor aumentará a largura da fatia, para o processo de renderização esta adoção fará com que as formas das seções acabem se tornando menos distintas, quando analisado em 3D através da janela (Inspexio MPR);

“BHC Data” – Dados BHC: é o último parâmetro a ser adotado para o início da rodada de análise. Este parâmetro é responsável pela redução do efeito de endurecimento da imagem. O endurecimento da imagem, ocorre quando ao analisar a amostra o núcleo do material apresenta uma área com tonalidade mais escura que as bordas. Este ajuste suavizará retirando esta tonalidade mais escura, fornecendo um clareamento de forma uniforme a toda área central da imagem. Para minimizar os possíveis erros, formam criadas três etapas, que tem o objetivo de melhor caracterizar o material.

3.4.1. Caracterização Inicial

A primeira etapa é a caracterização inicial, onde o equipamento analisou durante cinco varreduras uma amostra piloto composta de areia de Osório biocimentada, com solução concentrada de 1,5 vezes, dosada doze vezes.

Nestas varreduras alternou-se o valor de Ray, pretendendo adequar este valor para uma melhor coleta de dados, além de encontrar um valor adequado de funcionamento, não exigindo capacidade de operação maior do que o material em estudo necessita, visando análises que não comprometam com a vida útil do equipamento.

Após a varredura ser realizada, os dados são transmitidos para um computador auxiliar, onde por meio do software VGStudio MAX 2.2.6, é realizado o tratamento das imagens.

Inicialmente foi preciso caracterizar a área do material em estudo, excluindo algumas áreas. Estas medidas foram adotadas por estas áreas pertencerem a bancada auxiliar que suspende o material em análise. A (figura 7) representa a definição do material.

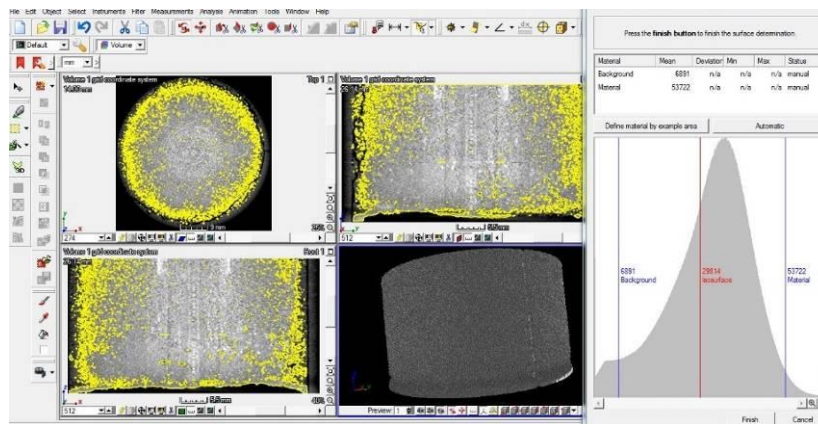


Figura 7 – Definição da área do material em análise.

Ao definir a área do material no VG-estúdio, uma nova etapa tende a classificar o que é material e o que não é material, de análise. Ao selecionando coordenadas distintas em varreduras com o mesmo elemento de estudo, demonstrou afetar o relatório final na quantidade de defeitos ou poros, por este motivo nesta seleção optou por selecionar as mesmas coordenadas, reduzindo este número de defeitos.

Estas imagens após o equipamento emitir os laudos e renderizar em 3D, foram visualizadas myVGL. Com as imagens montadas em 3D, dois responsáveis técnicos do CT-pedras atribuíram nota as imagens de 1 a 5, pontuando com valor maior as imagens que melhor caracterizaram a amostra. Com a pontuação da melhor imagem pode ser adotado a potência ideal de análise, podendo então definir os próximos parâmetros. Segue a seguir as cinco varreduras e suas respectivas avaliações nas imagens, que melhor caracterizaram visualmente, representada na (figura 8).

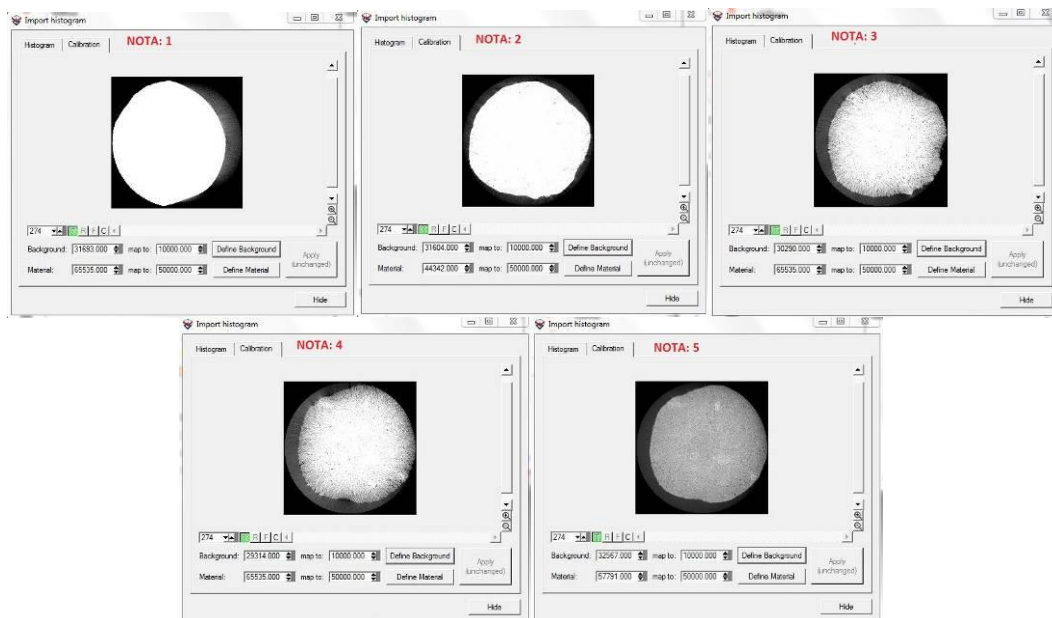


Figura 8 – Imagens reconstruídas pelo microtomógrafo.

A varredura que apresentou nota 5, na avaliação, foi a que melhor caracterizou visualmente a amostra, apresentando porosidade em todo o elemento. Demonstrou cerca de 79237 poros por faixa,

com características aproximada da geometria circular dos grãos de areia, preservando com mais propriedades as características do elemento, tornando estes dados de caracterização inicial apresentados pela imagem um padrão a ser repetido e aprimorado.

A partir deste parâmetro de suavização de imagens pela avaliação prévia pode ser construindo um valor mínimo de potência de operação. A aba Ray recebeu a partir desta etapa valores maiores que 60 KV até o limite de potência do equipamento, os quais caracterizaram a amostra. Optou-se por não trabalhar apenas com um parâmetro, pois desejou-se um melhor refinamento nas próximas etapas.

3.4.2. Análise exploratória experimental

A análise exploratória experimental, é um procedimento estatístico realizado através do software Minitab, que tem o objetivo de cruzar os dados de modo aleatório, com intuito de obter a melhor aquisição de dados e imagens. Este cruzamento de dados torna-se necessário para determinar os parâmetros adequados, já que alguns parâmetros se demonstram menos influentes.

O cruzamento de dados teve cinco valores fixos, que apresentaram baixa influência na aquisição das imagens, e três valores determinantes que demonstraram grande variação ao serem alterados. Os três valores aleatorizados foram: Ray, Scaling Coeficiente e BHC.

Os parâmetros que se apresentaram variáveis no software estatístico, são representados através de pontos numéricos (menores, centrais e maiores). A partir desta colocação é possível definir através de interpolações entre os limites (inferior, central e superior) os seus devidos valores reais, os quais foram adotados por trabalhos anteriormente realizados e devido a valores limitantes do equipamento.

A análise exploratória experimental reproduz neste experimento com o software 20 rodadas, estas rodadas serão nomeadas de refinamento dos parâmetros visuais, a qual será melhor abordada posteriormente. A (tabela 6) é uma demonstração dos parâmetros variáveis sendo inseridos e seus pontos numéricos sendo obtidos pelo software, os quais em sequência serão interpolados para obtenção dos reais valores.

Tabela 6 – Pontos numéricos do software para os parâmetros variáveis.

	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Ray	Scaling Coeficiente	BHC
1	5	1	1	1	-1	-1	1
2	8	2	1	1	1	1	1
3	13	3	-1	1	0	0	-1,68179
4	7	4	1	1	-1	1	1
5	20	5	0	1	0	0	0
6	18	6	0	1	0	0	0
7	11	7	-1	1	0	-1,681792831	0
8	16	8	0	1	0	0	0
9	9	9	-1	1	-1,68179	0	0
10	10	10	-1	1	1,681793	0	0
11	3	11	1	1	-1	1	-1
12	6	12	1	1	1	-1	1
13	15	13	0	1	0	0	0
14	1	14	1	1	-1	-1	-1
15	2	15	1	1	1	-1	-1
16	12	16	-1	1	0	1,681792831	0
17	19	17	0	1	0	0	0
18	4	18	1	1	1	1	-1
19	14	19	-1	1	0	0	1,681793
20	17	20	0	1	0	0	0

Ao ser inserido os parâmetros variáveis no software, foram gerados através de interpolação valores reais, para os valores dos pontos numéricos do software através do Excel, de modo que os valores do software fossem substituídos pelos reais. Esta transformação torna a etapa do experimento aleatório, em uma normalização do estudo. A (figura 9) representa esta interpolação.

StdOrder	Ray	Scaling Coefficient	BHC	MICRO	Equação Interpolação		
5	66	6,48	3	ok	$y=y_0+\{(y_1-y_0)*[(x-x_0)/(x_1-x_0)]\}$		
8	84	24,02	3	ok			
13	75	15,25	1	ok	Interpolação para Ray		
7	66	24,02	3	ok	<i>Ray real</i>	<i>Ray estatístico</i>	
20	75	15,25	2	ok	y0	60	-1,681792831
18	75	15,25	2	ok	y1	90	1,681792831
11	75	0,50	2	ok			
16	75	15,25	2	ok	Interpolação para Scaling Coef.		
9	60	15,25	2	ok	<i>SC real</i>	<i>SC estatístico</i>	
10	90	15,25	2	ok	y0	0,5	-1,681792831
3	66	24,02	1	ok	y1	30	1,681792831
6	84	6,48	3	ok			
15	75	15,25	2	ok	Interpolação para BHC		
1	66	6,48	1	ok	<i>BHC real</i>	<i>BHC estatístico</i>	
2	84	6,48	1	ok	y0	1	-1,681792831
12	75	30,00	2	ok	y1	3	1,681792831
19	75	15,25	2	ok			
4	84	24,02	1	ok			
14	75	15,25	3	ok	BHC's	Equivalente	
17	75	15,25	2	ok	none	1	
					acrylic	2	
					aluminium	3	

Figura 9– Interpolação e obtenção dos valores reais.

Com base nos resultados das interpolações, foram definidos alguns valores. O parâmetro Ray, tem como limite inferior o valor de 60 e superior de 90, parâmetro este compatível com a análise de caracterização inicial. Com a interpolação dos valores, encontrou-se os valores de 60, 66, 75 e 84 KV.

O parâmetro Scaling Coeficiente, tem como limite inferior o valor de 0,5 e superior de 30, com a interpolação dos valores, encontrou-se os valores de 0,5, 6,48, 15,25, 24,02 e 30,00. Já o parâmetro BHC seus valores foram 1, 2 e 3, não obtiveram variação pois o equipamento trabalha com valores inteiros de endurecimento de imagem.

Com os valores já definidos, é possível transpassar estes valores para a próxima etapa de caracterização de refinamento dos parâmetros visuais.

3.4.3. Caracterização de refinamento dos parâmetros visuais

A análise exploratória experimental construiu 20 modelos de configuração com parâmetros aleatórios para o biocimentado. Esta etapa de caracterização de refinamento dos parâmetros visuais vem a reproduzir as imagens através da varredura com o mirotomógrafo a raio-x. Após o termino do ensaio as imagens foram submetidas a uma avaliação de qualidade. A avaliação teve como objetivo atribuir valores de 1 a 5, como realizado na caracterização inicial.

Nesta rodada de refinamento final, se observou que alguns valores foram determinantes na caracterização dos tons de cinza, estes tons de cinza podem ser correlacionados diretamente com a densidade do material. Em todos os experimentos que foram considerados bons, atingiram nota superior a 3, apresentaram aproximadamente 30 mil tons de cinza. Conforme a (figura 10), que representa a melhor imagem obtida.

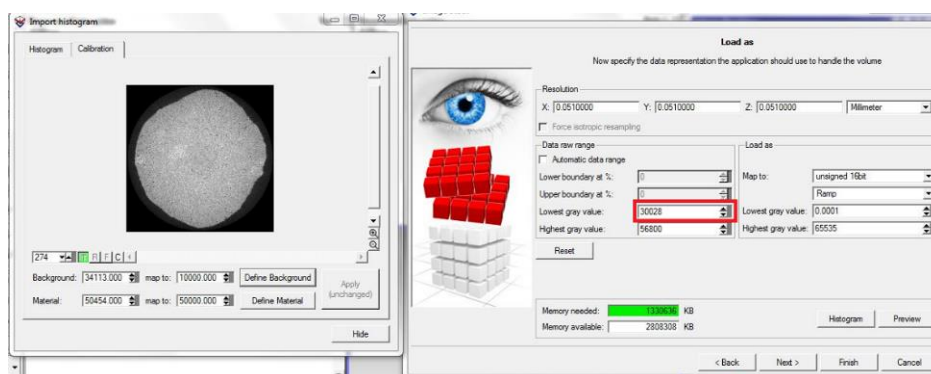


Figura 10 – Tons de cinza do parâmetro refinado.

Com a conclusão desta etapa, pode ser observado que em cada faixa coletada pelo detector o parâmetro de poros conservou um valor estimado de aproximadamente 73147 poros por faixa. A (figura 11) demonstra a imagem obtida com a configuração final.

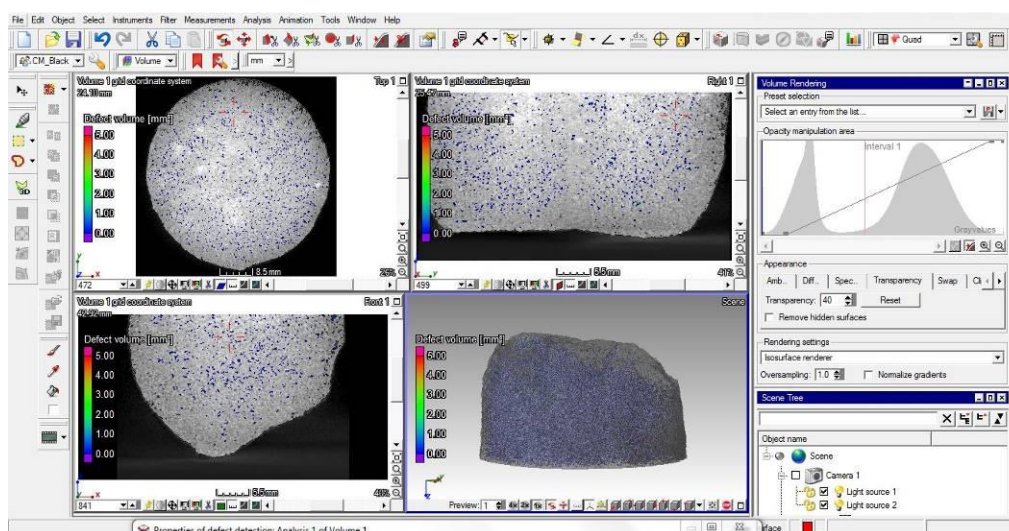


Figura 11 – Imagem com as configurações finais.

As imagens obtidas com este refinamento final, puderam retratar uma quantidade mais uniforme de poros por faixa, além de apresentarem geometrias mais uniformes que as varreduras iniciais. Os parâmetros que melhor configuraram uma análise de dados para o biocimentado obtidos, está presente na (tabela 7).

Tabela 7 – Parâmetros para o solo biocimentado.

CT Parâmetros	
Raio	80 KV
Número de Visualizações	2400
Média	6
Contagem de digitalização	1
Coeficiente de Escala	24
Largura da Fatia	1
Dados BHC	3

4. RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos parâmetros de configuração do microtomógrafo, pode ser avaliado a homogeneidade do método de biocimentação. O equipamento apresenta um limite no seu feixe a raio-x de 26,3 mm, com este limitante optou por uma análise que dividiu o corpo de prova biocimentado em camadas de topo, meio e base.

Para o CP que não recebeu a biocimentação, em seu desmolde ocorreram perdas de materiais. Para a análise no microtomógrafo foi escolhida visualmente uma única camada que melhor representasse as suas propriedades, além de ser adicionado ao seu redor uma camada de papel filme, para controle momentâneo da estrutura. Segue a (figura 12), do CP natural com seu marcador de camada.



Figura 12 - Marcador de altura do CP natural.

A composição do CP com solo natural na moldagem apresentou o volume de vazios de 42%. Nos laudos obtidos pelo microtomógrafo a raio-x obteve-se um valor de 5,32% “void volume” ou volume de vazios. Esta variação quantitativa é muito inferior ao valor real, e está diretamente correlacionada com a resolução do equipamento. Pode ser observado também, que o equipamento trabalha como uma limitação na escala milimétrica, apresentando em seu software as opções de alteração para as escalas micrômetro e nanômetro, porém alterando estas opções o equipamento não reconhece as medidas e provoca uma distorção nas imagens, não emitindo os laudos. A (figura 13) representa os dados obtidos pela varredura do CP com solo natural.

Statistics

```
Voids, Σ voxel: 20315736
Voids, Σ volume: 2694.90 mm³
Voids, Σ surface: 91686.34 mm²
Voids, Σ PX: 12702.41 mm²
Voids, Σ PY: 12761.54 mm²
Voids, Σ PZ: 16282.50 mm²
Inclusions, Σ voxel: n/a
Inclusions, Σ volume: n/a
Inclusions, Σ surface: n/a
Inclusions, Σ PX: n/a
Inclusions, Σ PY: n/a
Inclusions, Σ PZ: n/a
Material iso value: using surface determination
Material volume: 48037.56 mm³
Void volume: 2694.90 mm³ (5.31 %)
Inclusion volume: n/a (n/a)
```

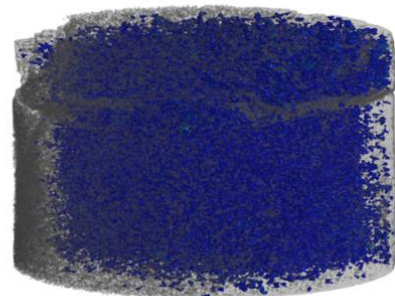
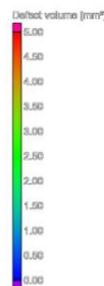


Figura 13 – Dados obtidos pela varredura no CP natural.

Antes de iniciar a varredura do CP biocimentado, foi envolvido em papel filme, como o CP natural, afim de obter uma análise que reproduza a mesma superfície a ser transpassado pelo feixe

ionizante, além de manter a amostra indeformada. O papel colocado na amostra serviu como regulador de camada. A (figura 14) demonstrando o CP biocimentado sendo ajustado para análise.



Figura 14 – CP biocimentado ajustes finais.

O solo biocimentado apresentou em suas varreduras variação na homogeneidade, como se era esperado, pelo simples fato de que ao desmoldar a amostra, no topo o solo apresentava uma resistência abrasiva superior no topo do que na base que apresentava uma estrutura mais fragilizada.

Em seu topo, após a varredura, o solo biocimentado apresentou uma concentração maior de calcita que preencheram os seus poros, tornando a superfície impermeável. O número do volume de vazios, conseqüentemente, apresentou-se menor que as camadas de meio e base. Apresentou em seu laudo o volume de vazios de 1,79%, cerca de três vezes menos o volume de vazios do solo natural, retratado pelo microtomógrafo. A (figura 15) representa os dados obtidos na varredura, referente a camada de topo do solo biocimentado.

Statistics

```
Voids,  $\Sigma$  voxel: 7412944
Voids,  $\Sigma$  volume: 983.33 mm3
Voids,  $\Sigma$  surface: 35967.47 mm2
Voids,  $\Sigma$  PX: 4930.56 mm2
Voids,  $\Sigma$  PY: 5002.65 mm2
Voids,  $\Sigma$  PZ: 6365.36 mm2
Inclusions,  $\Sigma$  voxel: n/a
Inclusions,  $\Sigma$  volume: n/a
Inclusions,  $\Sigma$  surface: n/a
Inclusions,  $\Sigma$  PX: n/a
Inclusions,  $\Sigma$  PY: n/a
Inclusions,  $\Sigma$  PZ: n/a
Material iso value: using surface determination
Material volume: 54090.80 mm3
Void volume: 983.33 mm3 (1.79 %)
Inclusion volume: n/a (n/a)
```

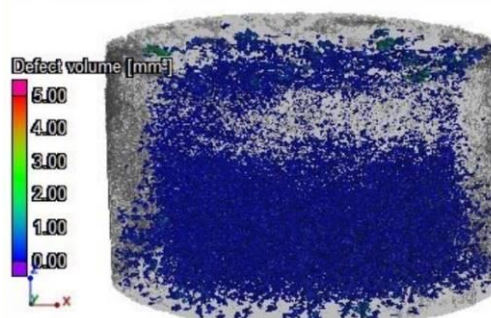


Figura 15 – Dados obtidos pela varredura na camada de topo do solo biocimentado.

O centro, após a varredura, apresentou um volume de vazios consideravelmente maior que o topo, cerca de 4,21%. Pode ser observado também um crescimento acentuado nos poros com intervalo de 0.8 a 0.4 mm³, comparados com as imagens anteriores, retratando uma menor formação de calcita. A (figura 16) retrata os dados obtidos pela varredura na camada de centro do solo biocimentado.

Statistics

Voids, Σ voxel: 17513844
 Voids, Σ volume: 2323.23 mm³
 Voids, Σ surface: 80793.72 mm²
 Voids, Σ PX: 11073.64 mm²
 Voids, Σ PY: 11092.20 mm²
 Voids, Σ PZ: 14430.69 mm²
 Inclusions, Σ voxel: n/a
 Inclusions, Σ volume: n/a
 Inclusions, Σ surface: n/a
 Inclusions, Σ PX: n/a
 Inclusions, Σ PY: n/a
 Inclusions, Σ PZ: n/a
 Material iso value: using surface determination
 Material volume: 52915.06 mm³
 Void volume: 2323.23 mm³ (4.21 %)
 Inclusion volume: n/a (n/a)

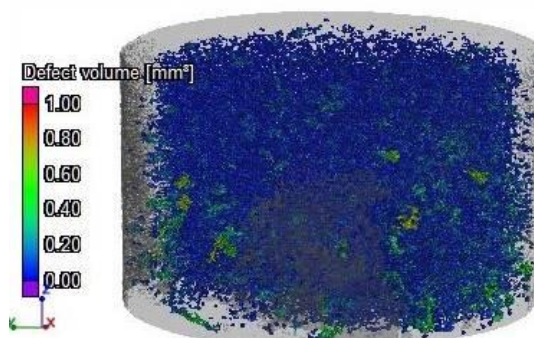


Figura 16 – Dados obtidos pela varredura na camada de centro do solo biocimentado.

A base, após a varredura, apresentou um volume de vazios consideravelmente maior que o meio, cerca de 5.70%. Este valor de volumes de vazios apresentou-se aproximadamente igual ao volume de vazios do solo natural, comprovando um decréscimo da eficácia da bioestimulação.

Os valores da varredura do CP natural e da base do solo biocimentado apresentaram-se próximos por uma inadequada confecção do CP natural, o qual deveria ser confeccionado em um molde que conserva um volume de material aproximado ao biocimentado, sem perdas, e que a espessura do molde deverá ser pequena, não comprometa com uma alteração nos parâmetros de configuração do equipamento. Por este motivo os materiais obtiveram valores aproximados. A (figura 17), representa os dados de varredura da base biocimentada.

Statistics

Voids, Σ voxel: 22673004
 Voids, Σ volume: 3007.60 mm³
 Voids, Σ surface: 91271.15 mm²
 Voids, Σ PX: 12119.25 mm²
 Voids, Σ PY: 12243.28 mm²
 Voids, Σ PZ: 16183.27 mm²
 Inclusions, Σ voxel: n/a
 Inclusions, Σ volume: n/a
 Inclusions, Σ surface: n/a
 Inclusions, Σ PX: n/a
 Inclusions, Σ PY: n/a
 Inclusions, Σ PZ: n/a
 Material iso value: using surface determination
 Material volume: 49798.02 mm³
 Void volume: 3007.60 mm³ (5.70 %)
 Inclusion volume: n/a (n/a)

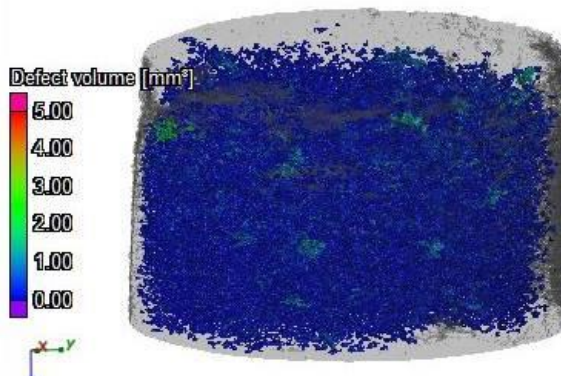


Figura 17 – Dados obtidos pela varredura na camada de base do solo biocimentado.

5. CONCLUSÃO

O microtomógrafo SMX-90CT, apresentou dados importantes sobre a homogeneidade do solo que recebe o tratamento de bioestimulação, comprovando que a técnica tem um comportamento heterogêneo, demonstrando através de laudos de volumes de vazios, que a precipitação de calcita ocorre com uma maior concentração no mesmo sentido da percolação da solução.

O equipamento, em seus laudos demonstrou uma ineficiência na leitura volumétrica do volume de poros, que compõem o elemento. Demonstrando uma falta de resolução a este tipo de material em análise, comprovando uma limitação do equipamento que opera na escala mínima de milímetros.

6. REFERÊNCIAS

BOERCKEL, Joel D.; MASON, Devon E.; McDERMOTT, Anna M.; ALSBERG, Eben. Microcomputed tomography: approaches and applications in bioengineering.

CHENG L, CORD-RUWISCH R. *In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation*. Ecol Eng. 2012.

CRUZ, R. C. *Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada*. Tese (Doutorado em Engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DALLAGNOL, BRUNA. *Estabilização e solidificação de Cromo (VI) por biocimentação*. Dissertação de mestrado. Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Passo Fundo, 2018.

DEJONG, J. D., ET AL. *Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities, and challenges*. Geotechnique. 2013.

DEJONG, J. T., MORTENSEN, B. M., MARTINEZ, B. C., AND NELSON, D. C. *Bio-mediated soil improvement*. Ecol. Eng. 2010.

FERNANDES, J.S. *et al. Determination of the Representative Elementary Volume for the study of sandstones and siltstones by X-Ray microtomography*, Mat.Res. 2012.

FONINI, Anderson. *Uso da técnica de eletrocinética para estabilização de um solo arenoso*. Dissertação de mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2008.

GARBIN, R. G. *Avaliação de biocimentação em solo arenoso*. UPF. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia e Arquitetura – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2016.

IVANOV, V., AND CHU, J. *Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ*. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2008.

KAROL, R. H. *Chemical grouting and soil stabilization*, Marcel Dekker, New York. 2003.

MACHADO, A. C., *Estudo de parâmetros microestruturais de rochas – reservatório para diferentes resoluções utilizando microtomografia computadorizada-3D*. M.Sc, Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

MITCHELL, J. K., AND SANTAMARINA, J. C. *Biological considerations in geotechnical engineering*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2005.

MONTOYA, B. M. *Bio-mediated soil improvement and the effect of cementation on the behavior, improvement, and performance of sand*. California, Tese. Programa de pósgraduação em Engenharia Civil e Ambiental. University of California. 2012.

MUÑETÓN, C.M.G. *Avaliação geotécnica de um perfil de solo tratado biotecnologicamente para fins de pavimentação*. Brasília, Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. 2013.

REZENDE, I. M. *Comportamento mecânico de um solo biocimentado*. Relatório de qualificação de mestrado. Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Passo Fundo, 2018.

RITA, R. P. Bio. *Cimentação de Solos Arenosos para Melhoramento das suas Características Hidromecânicas*. Tese (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, IST, Lisboa. 2014.

SANTOS, MARIA PIRES DOS. *A Transdisciplinabilidade da Microtomografia Computadorizada*. 2015. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.

SHIMADZU DO BRASIL COMERCIO LTDA. *Manual de instruções e operações básicas. InspeXio - SMX-90CT*. 2014.

STABNIKOV, V., NAEMI, M., IVANOV, V., & CHU, J. *Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement*. Cement and Concrete Research, 2011.

VAN PAASSEN, L.A.; GHOSE, R.; VAN DER LINDEN, T.J.M; VAN DER STAR, W.R.L. AND VAN LOOSDRECHT, M.C.M. *Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-scale Biogrout Experiment*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2010.