

ANÁLISE DO RESULTADO DE UMA LOCAÇÃO DE POÇO TUBULAR PROFUNDO COM TÉCNICAS GEOFÍSICAS NO NORTE DE MINAS GERAIS

AZEVEDO, Danillo Gustavo Silva¹; FERREIRA, Diogo Fabiano².

1. Discente do curso de Engenharia de Minas das FIPMoc. 2. Docente das FIPMoc

RESUMO

É indiscutível a relevância das águas subterrâneas para o abastecimento da população, indústrias e propriedades rurais. As rochas de origem carbonática apresentam uma boa potencialidade para a acumulação de água, porém, para que se obtenha sucesso em perfurações de poços, é necessário que se avaliem, de modo mais preciso, os recursos e as ocorrências dos aquíferos cársticos em relação aos condicionantes geológicos. O objetivo geral deste trabalho é analisar o emprego da geofísica de eletrorresistividade e seus resultados na locação de um poço tubular profundo em área pré-definida. A pesquisa abrangeu trabalhos hidro-geológicos (preliminares) e de sondagem geofísica, mediante a metodologia da eletrorresistividade. Os eletrodos foram arranjados para o caminhamento elétrico, polo-polo (espaçamento de 15m e 15 níveis de investigação). A interpretação dos dados resultou na identificação das áreas potencialmente saturadas em água, caracterizadas pelos baixos valores de resistividade dentro dos caminhamentos elétricos. Identificou, também, que os poços antigos já existentes na área de estudo encontram-se fora das áreas mais baixas do terreno, onde potencialmente é melhor para a locação de um poço tubular. Por fim, a locação baseada nos resultados obtidos alcançou sucesso dentro do objetivo proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Geofísica. Eletrorresistividade. Poço tubular.

INTRODUÇÃO

É indiscutível a relevância das águas subterrâneas para o abastecimento da população, indústrias e propriedades rurais. As rochas de origem carbonática apresentam uma boa potencialidade para a acumulação de água, porém, para que se obtenha sucesso em perfurações de poços, é necessário que se avaliem, de modo mais preciso, os recursos e as ocorrências dos aquíferos cársticos em relação aos condicionantes geológicos. Técnicas geofísicas baseadas no potencial elétrico são utilizadas com sucesso na caracterização de aquíferos cársticos, com a identificação da espessura do aquífero em questão, profundidade do topo rochoso, fraturas preenchidas por água, e conseqüentemente, na decisão de locais para a perfuração de poços (GALLAS, 2000, 2003).

Este trabalho fundamenta-se na aplicação da geofísica de eletrorresistividade em um estudo hidrogeológico de prospecção de água subterrânea em área rural, compreendida entre os municípios de Engenheiro Navarro e Bocaiuva, região norte de Minas Gerais.

Considerando que o norte de Minas é uma

região que sofre com a escassez de águas superficiais, a perfuração de poços tubulares profundos tem sido uma alternativa e/ou saída empregada por particulares, prefeituras e demais órgãos públicos como forma de solucionar a demanda por água, seja para uso na agropecuária, na indústria ou para consumo humano. Tendo em vista o alto custo dos serviços de perfuração e a elevada dificuldade em se localizar a água subterrânea, dada a sua inacessibilidade a estudos diretos de baixo custo, questiona-se acerca das formas de localização empregadas para se localizar um poço tubular; da possibilidade de se empregarem métodos de prospecção geofísica; do resultado encontrado após o emprego do estudo geofísico de eletrorresistividade para essa demarcação.

Portanto, este estudo se justifica por sua grande relevância social, uma vez que irá colaborar para difundir o uso de uma técnica de estudos indiretos na prospecção de aquíferos, no norte de Minas Gerais, região conhecida pela escassez de águas superficiais em abundância e que frequentemente recorre à perfuração de poços tubulares profundos, objetivando encontrar e explorar água para os mais diversos fins.

Mesmo a perfuração de poços tubulares sendo muito dispendiosa financeiramente, e além de burocrática devido à demora na autorização ambiental, espera-se que seu resultado seja o melhor possível. Para garantir esses resultados, já de imediato, este trabalho faz-se relevante, uma vez que contribuirá, de maneira significativa, para a efetivação de um método mais eficaz para se conhecer o subsolo, possibilitando a redução nos índices de poços improdutivos.

Segundo estudos, a água armazenada no subsolo (aquíferos) corresponde a aproximadamente 97% da água doce sob a forma líquida existente no planeta (MANOEL FILHO, 1997). Esse extraordinário recurso é capaz de viabilizar o desenvolvimento das atividades humanas, podendo ser explorado por meio da captação por poços

tubulares e cisternas. Segundo avaliações da UNESCO (1992), no período de 1970 a 1995 foram perfurados, em todo o mundo, cerca de 300 milhões de poços, de vários tipos.

Apesar de os dados serem antigos com a relação à data deste estudo, e o desenvolvimento humano se dar em progressão quase que geométrica, é possível ter-se a noção de como esse tipo de procedimento é de grande valia para o desenvolvimento da população humana. No Brasil, dados do IBGE (2000) revelam que, naquela época, 55% da população já era abastecida por meio da água explorada de reservas subterrâneas. Atualmente, esse número tende a ser exponencialmente maior, a julgar pelo crescimento populacional, a deterioração e a diminuição do volume das águas superficiais em vários locais, e a busca crescente e constante por águas de melhor qualidade.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

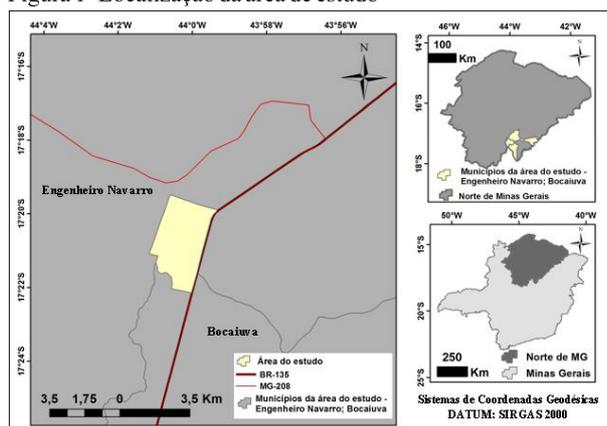
A área localiza-se em zona rural, compreendida entre os municípios de Engenheiro Navarro e Bocaiuva, na mesorregião Norte de Minas, estado de Minas Gerais. Essa região caracteriza-se por não contemplada com abundância natural de águas superficiais e pela presença constante de períodos de estiagem acentuada, levando a *deficits* hídricos históricos, durante os quais comumente é impetrado o amparo da Defesa Civil. É uma realidade recorrente, apesar do potencial hídrico subterrâneo, conforme Beato; Cândido; Paixão (2012).

O local situa-se a aproximadamente 5 e 30 km de distância das sedes urbanas de Engenheiro Navarro e Bocaiuva, respectivamente. O acesso se dá pela BR-135, rodovia federal de pavimento asfáltico. A figura 1, a seguir, mostra essas referências.

A escolha dessa área deveu-se à existência, no

local, de poços tubulares profundos, os quais possuem baixa vazão, numa dada propriedade onde a demanda por água é elevada; com isso, será possível realizar a comparação dos resultados dos métodos de locação de pontos para a perfuração de poços tubulares profundos.

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

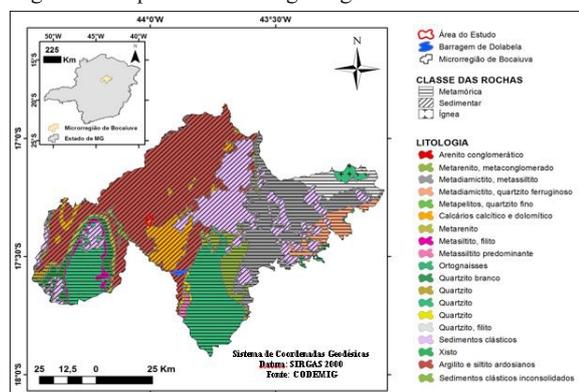
GEOLOGIA

A área de estudo deste trabalho encontra-se na Bacia do Rio São Francisco, sendo considerada a porção leste, ao analisar a mesorregião Norte de Minas, do cráton de mesmo nome (ALMEIDA, 1977). Do período mesoproterozoico, é possível observar, com ampla clareza, as formações metassedimentares do Supergrupo Espinhaço, as quais são compostas por quartzitos, filitos e metaconglomerados, estendendo-se ao longo do Conjunto de Serras do Espinhaço, partindo do centro de Minas Gerais com direção ao norte do estado. Sobreposta a esse Supergrupo, encontra-se a formação do grupo Macaúbas, composto basicamente por diamictitos e quartzitos (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM, 2010).

Na microrregião do município de Bocaiuva, como observado na figura 2, num trecho superior do terreno, está a deposição sedimentar da Província Sanfranciscana da era Neoproterozoica, denominada Grupo Bambuí, sobrepondo-se às rochas tanto do

embasamento sanfranciscano quanto as metassedimentares nas bordas leste e oeste do Rio São Francisco (IGAM, 2010) – grupo que Dardenne (1978) classifica como sendo de baixo metamorfismo. As rochas que compõem o Grupo Bambuí representam incursões paleomarinhas que depositaram intercaladamente siltitos/pelitos e calcários, dando origem às rochas carbonáticas da região, e abrigando estão os aquíferos mais comumente acessados pelos poços tubulares existentes na região. (IGAM, 2005).

Figura 2 - Mapa de síntese da geologia da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

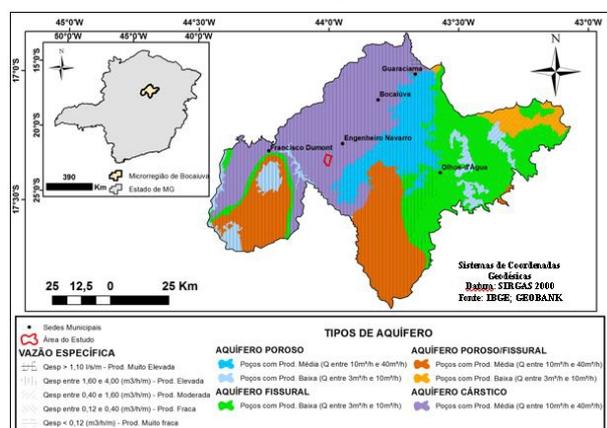
HIDROGEOLOGIA

A formação aquífera da área do estudo recebe o nome de Bambuí, e é caracterizado pelo CPRM – Serviço Geológico Brasileiro (1983), como descontínuo, podendo possuir extensão regional livre a confinada. Sua composição litológica é de margas, siltitos e calcários, tendo como característica médio grau de fraturamento das formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas.

Na micro Bocaiuva, podem-se distinguir quatro tipos de aquíferos diferentes: poroso, fissural, poroso/fissural e cárstico. O local de estudo trata-se de uma área de rochas sedimentares, como visto anteriormente, as quais compreendem um ambiente cárstico originando aquíferos com denominação homônima, onde a água se acumula em pontos de dissolução cárstica, a qual acomete

primazmente regiões como fraturas e planos de acamamento da rocha, sendo capazes de promover a formação de cavernas subterrâneas. As condições descritas são capazes de determinar, sem estabelecer regra, um potencial hidrogeológico de poços com produtividade média, com vazão de 10m³/h a 40m³/h, oferecendo uma vazão específica, considerada de elevada média, de 1,60 a 4 m³/h/m, para o local do estudo. (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2015; GIAMPÁ; GONÇALES, 2013).

Figura 3 - Mapa de síntese da hidrogeologia da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

CARACTERIZAÇÃO DO MERCADO REGIONAL DE POÇOS TUBULARES

Como já foi dito anteriormente, a região norte do estado de Minas Gerais sofre com constantes estiagens, fato que agrava a falta d'água, tendo em vista que os recursos hídricos superficiais da região não são suficientes para manter bem abastecidas as localidades que ali existem.

Ao caracterizar a região com certa escassez ou pelo menos baixa oferta de água, é preciso lembrar que o mercado referente aos serviços de perfuração de poços tubulares profundos, também é consonante com Oliveira (2003), para quem, conforme as leis de mercado, a escassez de um determinado produto ou serviço é o que lhe dá e/ou agrega valor econômico.

O mercado encontrado na região pode ser

considerado razoavelmente quanto concorrido com relação ao número de empresas que ali próximo ofertam seus serviços. Mediante levantamentos sobre o mercado, é possível chegar ao número de 13 empresas instaladas numa região com raio de 300 km de distância, partindo da sede urbana do município de Engenheiro Navarro. Dentre essas empresas, estão aquelas que ofertam o pacote de serviços completo, partindo dos estudos para determinar o melhor local para a obra, cuidando dos trâmites legais, tais como licenças e outorgas ligadas à gestão dos recursos hídricos subterrâneos; até a instalação de equipamentos para o aproveitamento do recurso hídrico. Há, também, empresas que ofertam apenas o serviço de perfuração.

METODOLOGIA TRADICIONALMENTE EMPREGADA NA REGIÃO PARA LOCAÇÃO DE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS

O método mais comumente empregado na detecção de água subterrânea é a técnica da hidroestesia, também chamada de radiestesia ou rãdomancia. A hidroestesia é compatível com a prática dos “vedores” de água, corriqueira no dia a dia dos agricultores da região Nordeste. Consiste na capacidade de detectar água, quer dizer: é uma aptidão natural de sentir a água que está localizada no subsolo (do grego “hydor” = água e “aisthesis” = sensibilidade). (GNADLINGER, 2001).

É expressivamente grande a quantidade de profissionais do meio técnico-científico que contesta e deprecia a hidroestesia. A explicação para o método encontra amparo na paranormalidade, campo que coloca a rãdomancia como uma característica sensitiva intrínseca de um pequeno número de pessoas, capazes de desenvolvê-la e aperfeiçoá-la. (COSTA, 2013).

Mesmo a hidroestesia sendo uma metodologia/aptidão muito peculiar do sertanejo, já

vem sendo difundida há certo tempo. Um exemplo disso é em Juazeiro, onde o IRPAA - Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada trabalha desde 1991 com a hidroestesia. O primeiro objetivo do IRPAA foi buscar lavradores no semiárido nordestino que possuíssem certa sensibilidade para detectar a água presente no subsolo com uma forquilha elaborada a partir de um galho de goiabeira. Só então, em outubro de 1993, os técnicos do IRPAA, junto com o Eng.º Hans Schröter, num convênio com a GTZ (Sociedade Alemã de Cooperação Técnica), organizaram o 1º Curso para Hidroestesisistas. (GNADLINGER, 2001).

CONCEITUAÇÃO SOBRE GEOFÍSICA

A geofísica possui como objetivo aplicar métodos indiretos de investigação em subsuperfície. Esses métodos oferecem uma resposta a uma dada grandeza física do meio que está sendo investigado; a averiguação, então, necessita de que existam contrastes sobre os valores das propriedades físicas que ali estão sendo investigadas. (GANDOLFO, 2007).

Kearey; Brooks; Hill (2002), traduzidos por Coelho (2009), utilizaram o conceito geral sobre a aplicação da exploração geofísica como sendo uma coleta de medidas em área geograficamente específica, para que sejam usadas na determinação das distribuições das propriedades físicas a profundidades que consigam refletir sobre a geologia de subsuperfície, de modo localizado.

Uma informação adquirida por meio de levantamentos geofísicos, mesmo que a aquisição seja produto de um trabalho com instrumentos altamente precisos e obedecendo a exigentes procedimentos de ordem física e matemática, pode ser considerada relativa. O paradoxo advém da enorme variedade e de uma alta complexidade das propriedades físicas dos alvos que se quer atingir, de acordo com Gandolfo (2007).

Por isso, Souza; Silva; Iyomasa (1998)

afirmam que "as medidas geofísicas propriamente determinadas são bastante concisas. A confusão aparece no momento da interpretação das informações".

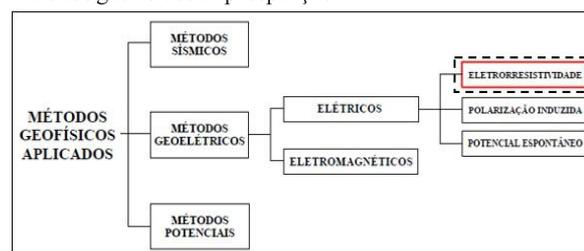
Outra afirmação importante de Gandolfo (2007) é que a geofísica obteve um substancial desenvolvimento, tendo em vista o objetivo de prospectar matérias-primas necessárias à evolução tecnológica e também social, conceito que condiz com o problema deste estudo.

De modo geral, é possível dividir os métodos de levantamento geofísicos em duas classes. A primeira é aquela que faz uso dos campos naturais do planeta, tais como: gravitacional, elétrico, magnético, eletromagnético. Mas o levantamento também pode valer-se de energia com origem artificial (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002, traduzido por COELHO, 2009). Tanto uma quanto outra classe de levantamento têm por finalidade identificar anomalias/perturbações localizadas que possam ser causadas por feições geológicas que possuam valor econômico ou não.

GEOFÍSICA DE ELETRORRESISTIVIDADE

A eletrorresistividade pertence ao grupo dos métodos geoeletricos cujo principio se baseia na definição da resistividade elétrica dos materiais. (BRAGA, 2016). Na figura abaixo, encontra-se uma fácil classificação dos métodos geofísicos, aparecendo destacada a eletrorresistividade, método utilizado neste estudo, descrito em métodos e técnicas.

Figura 4 - O método da eletrorresistividade no contexto dos métodos geofísicos de prospecção



Fonte: Gallas (2000).

Braga (2016) explica que os mais diversos materiais componentes do ambiente geológico apresentam como uma de suas propriedades fundamentais a resistividade elétrica, usada como um parâmetro físico capaz de caracterizar a integridade física dos materiais geológicos, com relação à alteração, fraturamento, saturação, entre outras.

O objetivo geral deste trabalho é analisar o emprego da geofísica de eletrorresistividade e seus resultados na locação de um poço tubular profundo em área pré-definida e já citada anteriormente, tendo como objetivos específicos: analisar, por meio de bibliografia, o local de estudo, o mercado regional de poços, a geofísica; e apresentar os resultados do levantamento técnico/geofísico realizado para a área de estudo.

MÉTODO

Foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Cartas geológicas e hidrogeológicas digitalizadas em escalas diversas.
- b) Mapa hipsométrico elaborado a partir de imagens do modelo digital de elevação, nomeado projeto Topodata, processado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, elaborado a partir de dados SRTM sob o formato de grade vetorial, tendo em vista a importância desse tipo de mapeamento para a definição de áreas mais baixas do terreno.
- c) Informações sobre os poços tubulares já existentes na área do estudo. A localização desses poços foi georreferenciada e mapeada junto aos pontos que foram estudados. Os dados sobre eles foram adquiridos em etapa de campo junto a funcionários da fazenda onde está localizada a área do estudo. Os dados de poços tubulares (profundidade, vazão) fundamentais para a execução da comparação entre os métodos de locação e seus resultados.
- d) Equipamentos: nos levantamentos de eletrorresistividade foi utilizado o eletrorresistivímetro fabricado pela Auto Energia, modelo X5, de dezesseis canais, auxiliado por dois

multímetros digitais da Hikari, modelo HM-2090. Como acessórios, foram utilizados cabos de conexão elétrica, trenas, eletrodos de alumínio para o envio de corrente elétrica e leitura do potencial, e um GPS portátil eTrex 10 Garmin, para o georreferenciamento dos locais de estudo.

Foram interpretados os dados morfológicos de relevo e da drenagem superficial restringindo-se ao polígono da área de estudo. O estudo para locação de um poço tubular requer uma análise mais específica dos fatores que são capazes de interferir no sistema hidrogeológico, nível de inclinação de estudo que a análise do relevo num dado local é capaz de oferecer, pois, em locais onde existem aquíferos livres, o nível hidrostático tende a um ligeiro acompanhamento do nível do topográfico do terreno. (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013).

É de conhecimento científico que, nos aquíferos localizados em regiões cársticas, os poços localizados em áreas de fundo de vale ou em pontos mais baixos do terreno com relação à topografia em volta apresentam valores de vazão mais altos do que aqueles que se localizam nos altos da topografia local, de acordo com Costa (2013).

Depois de realizado o mapeamento do relevo dentro do polígono escolhido como área de estudo, as informações foram unificadas em um banco de informações georreferenciadas em um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Definição dos perfis geofísicos de caminhamento elétrico

Baseando-se nas áreas mais baixas do terreno em estudo, consideradas como os pontos mais favoráveis depois da análise topográfica o caminhamento elétrico foi realizado de modo a acompanhar a direção das estruturas citadas, para caracterizar a área de interesse.

Realização dos levantamentos geofísicos de eletrorresistividade

a) Fundamentação Teórica

O método da eletrorresistividade permitiu obter, de forma indireta, o valor de resistividade elétrica (ρ) dos materiais geológicos em subsuperfície. Nessa metodologia, foi adotada a técnica de aquisição baseada no Caminhamento Elétrico (CE).

Essa técnica tem como objetivo realizar investigação horizontal em subsuperfície, podendo ser em uma ou mais profundidades, em constantes medidas que serão efetuadas ao longo de perfis. Tem como objetivo a demarcação das variações laterais da resistividade na subsuperfície, encontrando grande aplicação no mapeamento de contatos geológicos, servindo também para ajudar a identificar zonas de falhas e fraturas, mapeamento de plumas de contaminação e estruturas ou corpos representados por uma heterogeneidade lateral de resistividade.

Os arranjos dos elétrodos em campo para coleta de dados na execução dessa técnica de prospecção são bastante variados. Para este trabalho, o arranjo escolhido foi o polo-polo. Conforme Gandolfo (2007), o benefício fundamental do arranjo polo-polo consiste na possibilidade de alcance de muitos níveis de investigação em decorrência do fato de a razão entre o sinal e os ruídos (interferências de leitura) ser alta, isso se deve ao fator geométrico. Como contrapeso ao benefício citado, a necessidade de maior espaço para a colocação dos elétrodos responsáveis pelo infinito pode ser considerada um fator desfavorável. Neste trabalho o espaçamento entre os elétrodos foi estabelecido como 15 metros entre os polos, com os infinitos distando duas vezes este valor, o estudo foi estabelecido com 15 níveis de investigação em profundidade. Foram realizados duas linhas de caminhamento elétrico.

As medidas coletadas em campo são impressas e interpoladas, em computador, tendo como resposta uma pseudosseção da resistividade aparente daquele

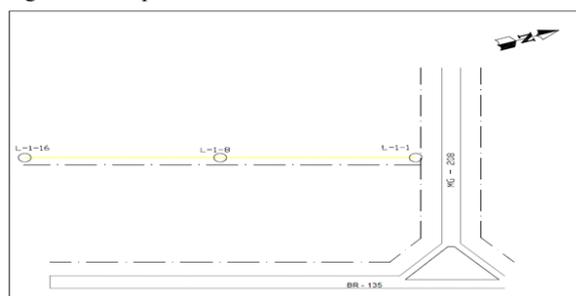
local. No trabalho de análise dos dados, a pseudosseção não pode ser atribuída como uma imagem verdadeira do subsolo, já que a profundidade alcançada pelo estudo não está sujeita exclusivamente à configuração impressa à geometria do caminhamento utilizado, mas igualmente dos contrastes de resistividade das litologias em subsuperfície. Sendo assim, os resultados encontrados nas pseudo-seções não caracterizam a realidade das profundidades nem das medidas de resistividades reais. (GANDOLFO, 2007).

A apreciação de anomalias é comumente realizada de modo qualitativo, para isso utilizando-se de programas para a inversão dos dados e, assim, gerar os modelos geoeletricos.

b) Levantamento de Campo

O Caminhamento Elétrico 01 foi realizado em área de pasto. Possui direção aproximada NO-SE e 15 estações de medidas equidistantes de 15 metros. O alinhamento teve início na porção NO, estaca L-1-1, sendo finalizado na estaca L-1-16 na porção SE, conforme o croqui a seguir.

Figura 5 - Croqui situacional do Caminhamento Elétrico 01



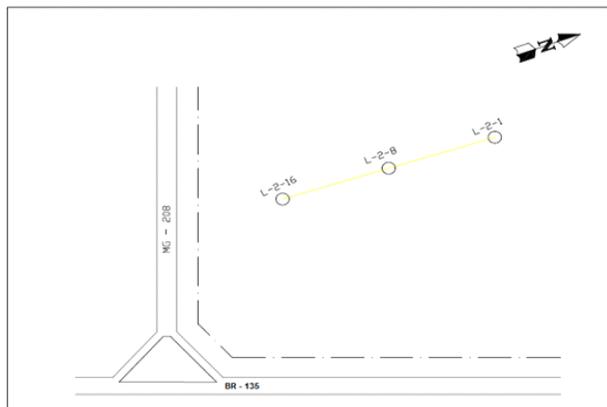
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O Caminhamento Elétrico 02 foi também realizado em área de pasto. Possui direção N-S e 15 estações de medidas equidistantes 15 metros. O alinhamento teve início na porção N, estaca L-2-1, sendo finalizado na estaca L-2-16 na porção S, conforme o croqui a seguir.

O posicionamento de todos os elétrodos foi

obtido por intermédio de uma linha guia para o alinhamento, e o uso de trena, para estabelecer corretamente o espaçamento entre eles.

Figura 6 - Croqui situacional do Caminhamento elétrico 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

INVERSÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A inversão de dados geofísicos é uma arte versada no assentamento de um modelo bidimensional (2-D) de resistividade, tendo como partida os dados colhidos nos levantamentos elétricos em campo. Neste trabalho, para realizar a inversão dos dados dos caminhamentos elétricos foi utilizado o programa RES 2D INV (Geotomo Software, 2003).

A modelagem 2-D utilizada no software da Geotomo porciona a subsuperfície em um número de polígonos retangulares, sendo o arranjo desses polígonos definido de acordo com a distribuição dos elétrodos para a coleta de dados que originou a pseudosseção. O programa, então, determina a resistividade aparente dos polígonos, ajustando as medidas realizadas.

Os procedimentos para realizar a inversão utilizam uma técnica otimizatória que recebe a denominação de *smoothness-constrained least-squares*, com o intuito de reduzir a diferença entre os valores encontrados para a resistividade aparente, mensurados e aferidos no trabalho de campo, desta feita ajustando a resistividade aos polígonos gerados no programa. (GANDOLFO, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

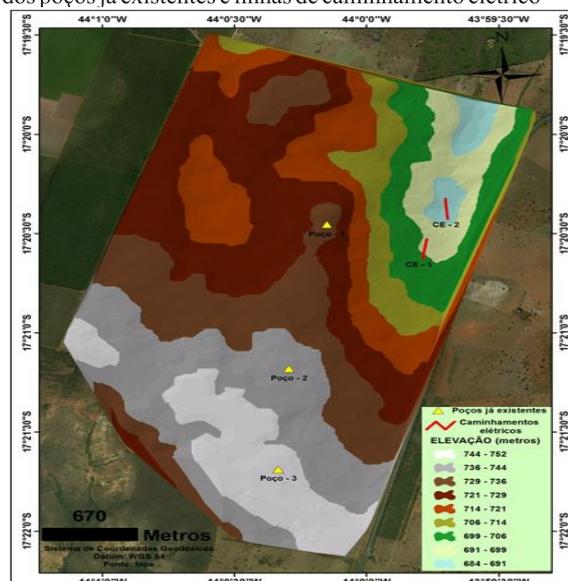
INTERPRETAÇÃO DO MAPA HIPSOMÉTRICO

No polígono definido como área de estudo para este trabalho, já existiam três poços tubulares. Como esses poços são antigos, as informações colhidas *in loco* restringiram-se à vazão, sendo a média entre eles um volume em torno de 4 m³/h, e a profundidade de 90 metros para os três.

A análise topográfica da área mostra que os três foram perfurados nas três cotas mais elevadas encontradas dentro da área do estudo. O poço denominado Poço - 1, no mapa da figura 7, encontra-se locado numa cota acima dos 729 m; o Poço - 2 está locado na cota acima dos 736 m; o Poço - 3 encontra-se na cota acima dos 744 m.

O mapeamento hipsométrico confirma a existência de uma área de cotas mais baixas em relação ao terreno onde os poços citados se encontram. Foi exatamente nesses pontos que as linhas de caminhamento elétrico foram estabelecidas, sendo o CE - 1 numa área de cotas em torno dos 706 m, e o CE - 2 numa área de cotas abaixo dos 691 m.

Figura 7 - Mapa hipsométrico da área de estudo, localização dos poços já existentes e linhas de caminhamento elétrico

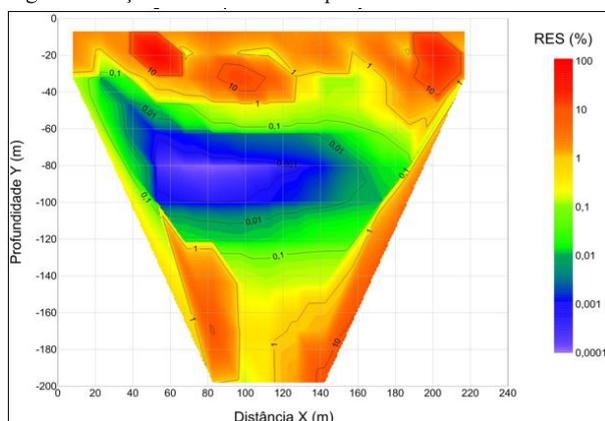


Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETORRESSISTIVIDADE

O Caminhamento Elétrico 1 apresentado na figura 8 teve extensão de 220 metros, utilizando espaçamento, já citado anteriormente, de 15 metros e 15 níveis de investigação. A interpretação sugerida indica a presença de um material bem resistivo na porção mais superior do estudo ao longo de todo o caminhamento, até a profundidade média de 20m, resistividade em torno de $6.053,88 \Omega.m$. Considerando que o levantamento foi realizado numa porção mais baixa do terreno se comparada a seu entorno, sem formação rochosa exposta e no mês de junho do ano corrente, o valor apresentado é, então, compatível com aqueles comumente associados a sedimentos superficiais secos, de acordo com valores apresentados por Borges (2007).

Figura 8 - Seção de resistividade aparente do CE - 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Como observado, a informação mais importante da seção está nas áreas de baixa resistividade, já que o intuito deste trabalho foi prospectar o melhor local para a perfuração de um poço tubular. Sendo assim, uma grande zona compreendida entre os 40 e os 150m do caminhamento, iniciando aproximadamente nos 60, alcançando até os 110m de profundidade, apresenta resistividades que partem de $6,05 \Omega.m$ e encontram um mínimo em torno de $0,605 \Omega.m$, numa espécie de

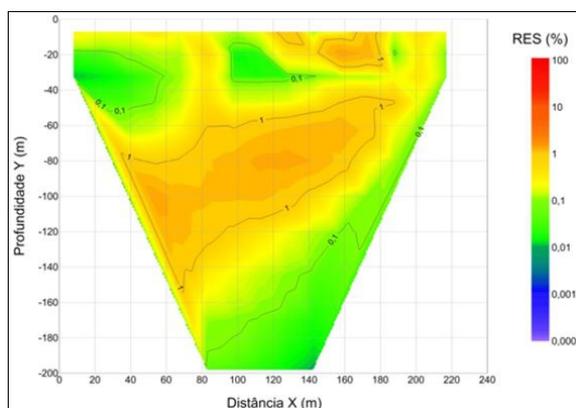
núcleo de baixa resistividade, que começa próximo dos 50, indo até os 150m do caminhamento, iniciando próximo dos 70 e alcançando os 100m de profundidade em subsuperfície. Desse modo, é possível inferir que o local descrito indica fortemente a possibilidade de essa ser uma zona altamente saturada em água; assim, confirmaria o local em questão como sendo altamente fraturado ou até compreendendo uma cavidade subterrânea preenchida por água.

Os demais valores de resistividade encontrados em outros pontos do CE - 1 são bastante condizentes com aqueles estabelecidos como limites de variação estabelecidos por Luiz; Silva (1995) e Borges (2007), para os materiais litológicos encontrados na geologia da região: calcários, siltitos e argilitos.

Para que a representação gráfica se mostrasse mais limpa, os valores de resistividade foram normalizados (valor de 100% = $60.538,8 \text{ ohms.m}$), proporcionando, assim, uma maior inteligência.

A figura 9 apresenta a seção de resistividade aparente referente ao Caminhamento Elétrico 2, realizado também no mesmo período, em que os valores também foram normalizados, como citado anteriormente.

Figura 9 - Seção de resistividade aparente do CE - 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Pelo gráfico da seção, é possível perceber que a região em subsuperfície compreendida pelo CE -

2 apresenta uma menor variação nos valores de resistividade. Ao centro do gráfico, abrangendo quase toda a extensão do caminhamento e tendo início aproximado partindo dos 55m de profundidade, a resistividade medida está em torno de 605,38 Ω .m, valor está condizente com aqueles exibidos por calcários, siltitos e siltitos, segundo dados de Luiz; Silva (1995) e Borges (2007).

Com relação à possibilidade de definir algum local capaz de conter água subterrânea nessa área, a região que merece destaque está localizada a partir dos 10m, alcançando os 50m na extensão do CE - 2, iniciando próximo dos 20m e chegando até aproximadamente os 30m. A resistividade nesse local encontra-se em torno dos 60,53 Ω .m, valor que se enquadra nos padrões informados por Luiz; Silva (1995) e Borges (2007). Apesar de a resistividade desse ponto indicar a presença de água, não é possível afirmar que esse ponto pode ser destacado como sendo muito fraturado ou, ainda, processado como uma área de cavidade subterrânea.

COMPROVAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

Como o Caminhamento Elétrico 1 apresentou uma área com valores de resistividade muito baixos, foi o escolhido como ponto de locação para a perfuração do poço tubular profundo. O ponto determinado como mais favorável situa-se aos 80m do início do caminhamento, onde a zona de baixa resistividade encontra uma espécie de centro.

Foram executados 100 metros de perfuração, sendo necessário revestir os primeiros 21 metros. A vazão total encontrada foi de 33 m³/h, este valor de vazão foi aferido sem a acuidade de um teste de bombeamento, por isso não foram informados os dados sobre os níveis estáticos e dinâmicos nem a que profundidades ocorreram as entradas de água. Ao se tratar da vazão, o poço locado com o resultado dos estudos apresenta valores bem acima daqueles encontrados pelos poços mais antigos existentes dentro da área de estudo, o que caracteriza o estudo

geofísico de eletrorresistividade acompanhado de uma apropriada caracterização local, como um instrumento eficaz para a locação de poços tubulares profundos. Esses dados foram gentilmente cedidos pelo responsável pela propriedade onde a área de estudo está localizada.

CONCLUSÃO

O trabalho de locação de poços tubulares profundos deve ser realizado de modo mais completo possível, abrangendo o uso das técnicas convencionais: interpretação topográfica, estudos hidrogeológicos preliminares e até mesmo o uso da hidroestesia. Busca-se, ainda, mediante a geofísica de eletrorresistividade, a complementação e/ou confirmação das informações obtidas anteriormente, uma vez que ela se mostra competente para balizar, de forma clara e concisa, áreas favoráveis para a locação de um poço tubular em regiões de aquíferos cársticos, pois permitem a identificação das fraturas ou áreas de dissolução preenchidas por água, representadas por baixas respostas de resistividade nesses pontos.

A partir das ideias e resultados deste trabalho, é possível levantar o questionamento sobre a necessidade de investimentos em estudos mais completos acerca das formações aquíferas da região onde se encontra o local do estudo, com o propósito de possibilitar melhores conhecimentos sobre elas. Ainda dentro desses termos, é admissível pleitear também a possibilidade de solidificar a geofísica de eletrorresistividade como uma ferramenta dentro da lista de estudos exigidos para a obtenção de direito de uso d'água subterrânea, por meio do processo de outorga.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, p.349-364. São Paulo. 1977.

- BEATO, Décio; CÂNDIDO, Marcio; PAIXÃO, Maricene. Bacias hidrogeológicas representativas - Projeto águas do norte de Minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17., 2012, Bonito. **Anais...** Bonito: Acqua, 2012. v. 1, p. 13 - 16.
- BORGES, Welintom Rodrigues. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado IAG/USP**. 2007. 271 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Geofísica Aplicada, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. **Métodos geoeletricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 159 p.
- COSTA, Waldir Duarte. Locação de Poços. In: GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia; GONÇALES, Valter Galdiano. (Org.). **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Cap. 6, p. 169-188.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO (Brasília, DF). **Mapa Hidrogeológico do Brasil**: Folha Belo Horizonte (SE.23). Brasília, 2010. 1 mapa. Escala 1:1.000.000.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO (Brasília DF). **Projeto de Hidrogeologia do Norte de Minas Gerais e Sul da Bahia**. Brasília, 1983. 95p.
- DARDENNE, Marcel Augusto. Síntese sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978. Recife-PE. **Anais**. Recife, 1978.
- GALLAS, J, D, F. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. **Revista do Instituto Geológico**, 24(1/2), p.43-51, São Paulo. 2003.
- GALLAS, J, D, F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. 2000. 258f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, São Paulo, 2000.
- GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia; GONÇALES, Valter Galdiano (Org.). **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 496 p.
- GNADLINGER, J. A contribuição da captação de água de chuva para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro – uma abordagem focalizando o povo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMIÁRIDO, 3., 2001. Campina Grande-PB. **Anais eletrônicos**. Campina Grande, 2001.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Censo Demográfico 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 25 Outubro de 2017.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasília - DF). **Mapa Hidrogeológico Região Sudeste**. Brasília, 2015. 1 mapa. Escala 1:1.800.000.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Estudo da Disponibilidade Hídrica Subterrânea no Norte do Estado de Minas Gerais Compreendida pelas Upgrhs Sf6, Sf7, Sf8, Sf9, Sf10, Jq1, Jq2, Jq3, Mu1, Pa1 e Bacias do Leste**. Belo Horizonte: Igam, 2010. 42 p.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Programa de Monitoramento de Águas Superficiais e Subterrâneas**. Belo Horizonte: Igam, 2005. 101 p.
- KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; KILL. Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 438 p.
- LUIZ, José; SILVA, Lúcia Maria da e. **Geofísica de Prospecção**. Belém: UFPA/CEJUP, 1995. 311p.
- MANOEL FILHO, João. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza, CPRM, LABHID-UFPE Pernambuco, 1997. 412 p.
- OLIVEIRA, Claudio Pereira de. O mercado da água e a gestão dos recursos hídricos. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, 1., 2003, Petrópolis. **Anais...** Petrópolis: Abas, 2003. v. 1, p. 113 - 122.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA – UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 1992. 12p.

SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. Investigações Geofísicas. In: OLIVEIRA, A. M. S., BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. Métodos de investigação. p.165-183.

DESENVOLVIMENTO DE ÓRTESE AUTOMATIZADA PARA PUNHO E MÃO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA MOTORA

BATISTA, José Messias Cardoso¹; CALDEIRA, Wesley Rabelo¹; MALVEIRA, Bruno Maia²; OLIVA, Henrique Nunes Pereira³.

¹Graduado em Engenharia Mecânica pelas FIPMoc, Docente das FIPMoc;

³Docente e professor orientador da pesquisa FIPMoc

RESUMO

Órteses são recursos que auxiliam na reabilitação, tratamento e qualidade de vida de pessoas com alguma lesão ou comprometimento dos membros. Com o advento da automação moderna, esses recursos de reabilitação podem ser trabalhados e melhorados no âmbito da engenharia. O presente artigo tem como objetivo apresentar um estudo de revisão bibliográfica e documental sobre tipos de órteses para mão. O trabalho contempla estudos para projeto e construção de protótipo de órtese para ser fabricada com material leve, de bom acabamento e sem implicar incômodo para os eventuais usuários. As simulações feitas no SolidWorks mostraram que sua estrutura, em seu funcionamento, implicou apenas 69,67% da tensão limite de tração do material utilizado, o que permitiu observar que o funcionamento ocorre com boa margem de segurança. Assim, foi desenvolvido um protótipo de órtese automatizada de baixo custo, com cinco movimentos livres para os dedos da mão, coordenados por servos motores programados pelo Arduino uno R3. Esse protótipo foi designado para levar uma qualidade de vida para pacientes com paralisias ou traumas ortopédicos que geralmente se encontram impossibilitados de realizar atividades do dia a dia.

PALAVRAS-CHAVE: Órtese. Reabilitação. Mãos. Automatização.

INTRODUÇÃO

Segundo o censo 2000 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), no total de casos declarados de portadores de deficiência investigados 41,1% possuem deficiência física, e 22,9%, deficiência motora. São várias doenças que podem causar paralisia no corpo, dentre elas o AVC (Acidente Vascular Cerebral), que atinge 16 milhões de pessoas em todo o mundo, a cada ano. Quando não morrem, as pessoas ficam com sequelas, que deixam parte do corpo paralisado (BRASIL, 2012). Com o aumento da população, existe maior possibilidade de haver pessoas com algum tipo de deficiência motora. Uma dessas deficiências é a perda da capacidade manipuladora das mãos, que leva a graves problemas para o indivíduo afetado, comprometendo o desempenho de suas tarefas do dia a dia.

O desenvolvimento de órteses é muito utilizado para ajudar essas pessoas com deficiência de manipular pequenos objetos e fazer movimentos simples, como o de pinça (responsável por cerca de 20% da manipulação de objetos). A automatização de órtese, diferencial deste estudo, possibilitará maior segurança e confiabilidade em atividades

corriqueiras a que essas pessoas estão sujeitas. Além disso, esta pesquisa mostra-se relevante, pois relata alternativas de matérias de baixo custo para produção da órtese e possibilidade de fácil reparo e reprogramação de sistema.

A estrutura da mão é formada por 27 ossos, sendo os principais 8 do carpo; 5 do metacarpo e 14 falanges. São os ossos, tendões, cartilagens e ligamentos que são responsáveis pelos movimentos e rigidez da mão. Para o punho e mão se movimentarem, são utilizados 39 músculos, que são separados e localizados no antebraço e mão, em que trabalham juntos com rede polias transmitindo os movimentos para os dedos (SOBOTTA, 2000).

Além dos músculos e ossos, a mão conta com diversos ligamentos e tendões. Os ligamentos fazem a conexão entre os ossos, dando uma estabilidade nos tendões da mão. Pode-se observar que os movimentos dos dedos sempre trabalham em conjunto, pois não conseguimos movimentar um único dedo sem estar movimentando os outros (ROCHA, 2011).

As primeiras órteses que surgiram foram chamadas de órteses passivas, por não possuírem nenhum tipo de atuador por comando elétrico. O funcionamento da órtese dependia do movimento do paciente ou era usada somente para restringir os movimentos para recuperação de algum trauma (ARAUJO, 2014) como a órtese dinâmica indicada para pacientes com paralisia periférica, alterações musculares, e pós-operatórios de cirurgias da mão.

Segundo Rocha (2011), foi durante a década de 1990 que começaram a se desenvolver as primeiras órteses funcionais, no qual o maior desafio era a de desenvolver uma órtese com junções parecidas com as da mão humana, que fosse capaz de realizar movimentos e manipular vários tipos de objetos, o que para uma pessoa com deficiência motora realizar esses movimentos com tamanha precisão seria difícil.

Utilizar material como termoplástico reduz o peso, o custo, e é um material que possui maior facilidade para modelagem conforme a mão do

paciente, trazendo maior conforto. O controle da órtese era feito pela rotação do punho que era medido pelo potenciômetro; quando o punho sofria rotação, era enviado um sinal de comando do servo motor fazendo o fechamento da pinça em torno do objeto; desse modo o paciente tinha um controle maior sobre a órtese. Porém, essa órtese era restrita a usuários que não perderam os movimentos do punho (PINTO, 1999).

De acordo com Rocha (2011), em 2004 foi desenvolvido um exoesqueleto com foco somente nos movimentos básicos da mão, o movimento de pinça, responsável por realizar as principais tarefas do dia a dia, auxiliando apegar pequenos objetos. Esse exoesqueleto usa o sinal EMG (*Eletromiográfico*), sistema utilizado para controlar a pressão nas válvulas pneumáticas, que acionam os cilindros e fazem os movimentos do dedo indicador, promovendo o movimento de pinça. A utilização de atuadores pneumáticos em órteses não seria viável, pois é necessário o armazenamento do ar comprimido, sendo estes reservatórios, cujo peso tornaria a órtese desconfortável. E, em termos de estética, o sistema mecânico deixa a órtese mais robusta, com visual pouco agradável para os usuários.

Em 2008, foi possível a construção de um modelo de órtese para mão na Labbio, que exigiu algumas modificações em detalhes técnicos, para adaptar-se às dimensões do usuário dessa nova tecnologia. Assim, precisou substituir um modelo de motor com corrente contínua por outro motor em que fosse possível controle de posição. Esse motor, denominado “servo motor” detém alta leveza e bom torque para esse tipo de aplicação, com um sistema elétrico de baixa complexidade e um correto posicionamento do atuador para um funcionamento adequado da nova órtese (MENESES *et al*, 2008).

Como meio de aperfeiçoar o processo de desenvolvimento de projetos de forma econômica e eficaz, a prototipagem rápida oferece vantagens

em relação às formas convencionais de prototipagens, como uma maneira de se reproduzirem várias peças sem alteração de geometria obtida. Diferente do modo convencional de se obterem peças por meio da remoção de cavacos, até se chegar à geometria final do objeto como nas máquinas CNC (*Controle Numérico Computadorizado*), a prototipagem rápida, por meio de deposição de camadas de material por uma impressora 3D, permite construir peças respeitando todas as características geométricas de cavidades internas, vazados e com sistemas de articulações. A prototipagem rápida tecnicamente falando é conhecida pela construção de objetos físicos a partir de projetos concebidos em *software* auxiliado por computador, mediante de processos aditivos, tais como manufatura aditiva (CAMPOS, 2012).

Há diversos trabalhos de Graduação, Mestrado e Doutorado relacionados ao assunto de próteses e órteses, como os de Meneses (2012), Marinho (2009), Campos (1999), Rocha (2011), Oliveira (2014), Araújo (2014), Silva (2016). Os autores descrevem a automatização ou automação como um método utilizado para gerenciar os movimentos necessários para acionamento das próteses. No caso das mãos biônicas e robóticas, que imitam os movimentos da mão humana em seus experimentos, é utilizada a plataforma arduíno para acionar os servos motores que estão ligados as próteses por meio de cabos de aço ou *nylon*, que, por sua vez, faz a função dos tendões de acionamento dos dedos.

Realizamos este trabalho com o objetivo de desenvolver um protótipo de uma órtese automatizada, capaz de reabilitar e coordenar os movimentos de punho e mão de pessoas com deficiência motora.

MÉTODO

Neste presente trabalho foi realizado um estudo, em artigos científicos, sítios eletrônicos e livros relacionados em órtese funcional para mãos,

com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento do protótipo da órtese, com o intuito de escolher os melhores métodos e materiais a serem utilizados na confecção. O propósito é melhorar a qualidade de vida das pessoas que sofrem com paralisia ou doença que impossibilita o movimento de punho e mão, o que as impede de realizar as atividades cotidianas, como manipular objetos, escovar os dentes ou segurar um copo. Para proceder ao trabalho, foram levantados alguns questionamentos sobre como desenvolver uma órtese financeiramente viável, que atenda as expectativas de pacientes com lesões nas mãos. Assim, foram determinadas as seguintes etapas para o desenvolvimento do protótipo:

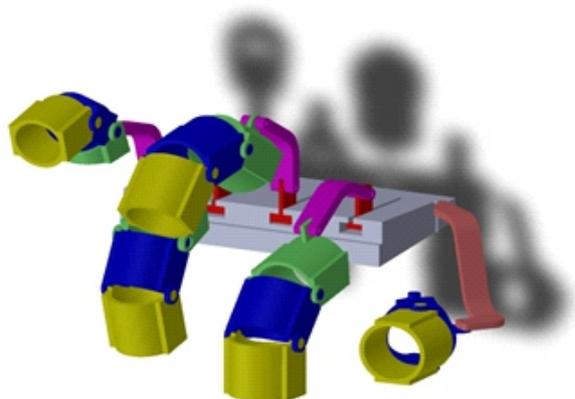
- 1º- Pesquisa documental e bibliográfica;
- 2º- Elaboração do desenho no *SolidWorks*;
- 3º- Seleção de material com boa resistência e acabamento;
- 4º- Fabricação dos componentes do protótipo;
- 5º- Compra do Kit-Arduíno, fios de *nylon* e conduítes;
- 6º- Programação do sistema utilizado;
- 7º- Montagem e testes do protótipo.

O protótipo da órtese foi desenhado no *SolidWorks* com as dimensões de uma mão conforme a figura 01. A mão utilizada como modelo foi a de um dos autores. Com o desenho finalizado foi escolhido o material a ser utilizado como matéria-prima, o ABS (*Acrilonitrila butadieno estireno*), que é um material com baixo custo e de melhor manipulação na impressora 3D, deixando-o com melhor acabamento e também com um custo mais viável para o cliente final. Com o auxílio do *software SolidWorks*, foi feita uma simulação, em que foi possível realizar uma análise de elementos finitos com as peças que constituem a órtese, a fim de se conhecer o comportamento quando solicitados esforços de tração, compressão e torção, para obter parâmetros de projeto.

Para obter os movimentos da órtese, utilizou-se uma placa Arduíno uno R3, por ser uma placa

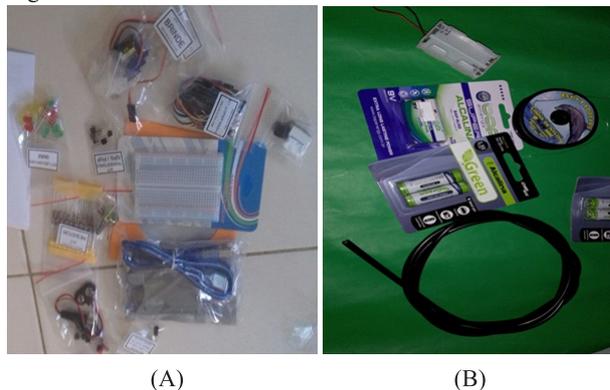
com valor mais viável e utilizar uma linguagem de programação simples. Foram escolhidos 5 servos motores modelo SG90 de 6v com torque de 1,6 kg/cm, para dar os movimentos aos dedos do protótipo. E, para transmitir os movimentos dos servos motores, foram utilizados fios de *nylon* com diâmetro de 0,25 mm, para fazer o papel dos tendões da mão humana, suportam uma carga de até 5 kg. Para conduzir e proteger os fios de *nylon* de uma extremidade onde estão localizados os servos motores de acionamentos a outra extremidade onde realizarão os movimentos de manipulação dos dedos, foram utilizados condutites. Todos os itens utilizados na construção da órtese se encontram na figura 02.

Figura 01- Desenho do protótipo da órtese



Fonte: Acervo dos autores

Figura 02- Material utilizado



(A)

(B)

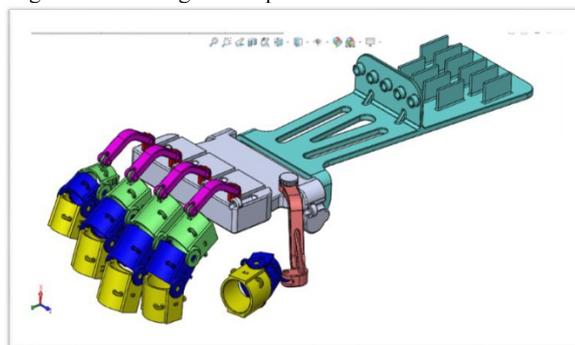
Fonte: Acervo dos autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto auxiliado pelo *SolidWorks*

possibilitou uma visualização mais ampla de como seria o funcionamento do protótipo da órtese e quais seriam as tensões nela submetidas. Com as dimensões definidas de diâmetro, espessura e comprimento das peças, foi possível fazer testes de resistência mecânica, movimento e interferência de encaixe nos testes de montagem. Assim, foram feitas as correções necessárias para se chegar ao produto final, e realizada a impressão das peças, conforme a figura 03.

Figura 03 - Montagem completa e atualizada da órtese



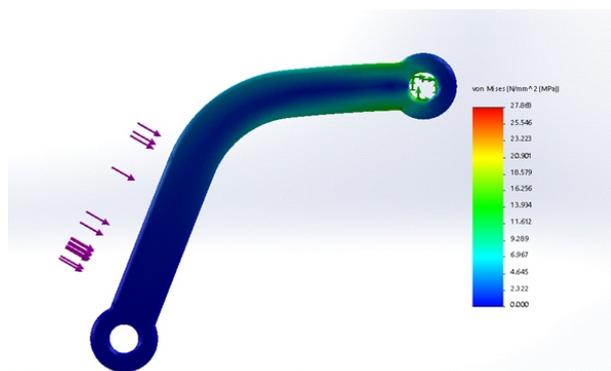
Fonte: Acervo dos autores

Segundo Hibbeler (2004), em projeto se faz necessário usar alguns princípios da estatística para determinar as forças que atuam sobre o interior e o exterior de sua estrutura. Suas dimensões, deflexão e estabilidade dependem não só das cargas nela submetida, mas também do material que será utilizado para sua confecção.

As junções dos dedos (em roxo, na figura 03) são alguns dos elementos mais importantes da órtese, pois elas transmitem o movimento para os dedos e sofrem a maior tensão. No ensaio feito no *SolidWorks*, conforme a figura 04, foi utilizada uma força 1,6 Kgf, convertendo para Newtons 15,68 N, conforme o torque máximo do servo motor, para observar a deformação do material. Nessa simulação, o material sofre uma tensão de compressão de 15,647 MPa e tensão de tração de 27,868 MPa, aplicando-se a força diretamente na face superior da peça. O valores estão bem a abaixo do limite de escoamento do material que foi

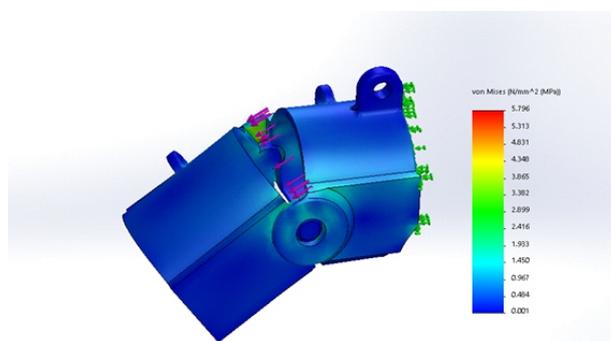
utilizado, que é 40 Mpa. Foram feitas, também, simulações nos encaixes dos dedos (em azul e amarelo, figura 03). No ensaio em que foram submetidas aplicações de força, as peças obtiveram valores de tensão de compressão de 3,314 MPa e tensão de tração de 5.680 MPa conforme a figura 05, mostrando que a peça foi suficientemente bem dimensionada, com margem de segurança.

Figura 04- Simulação de resistência nas junções dos dedos



Fonte: Acervo dos autores

Figura 05- Simulação de resistência nos encaixes dos dedos



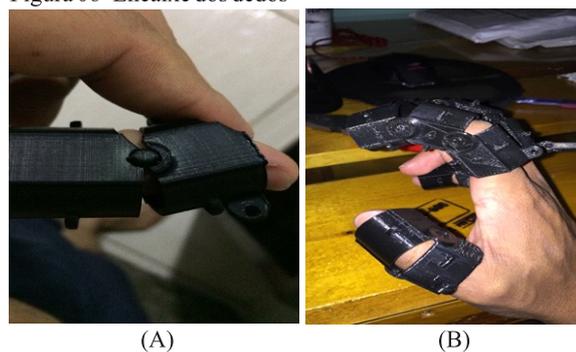
Fonte: Acervo dos autores

Durante o processo de impressão das peças, verificou-se a necessidade de ajustes em algumas, para a melhoria de resistência mecânica em pontos de articulações, pois elas estavam sofrendo deformação nas junções. Nesse caso, fez-se necessária a modificação do modo de impressão e o material utilizado na confecção das peças, que foram ajustadas, conforme a figura 06.

Após esse processo, foi feita a montagem da órtese iniciando testes dinâmicos, em com análise

experimental dos movimentos dos dedos. Como a programação da órtese foi feita de modo repetitivo, foi utilizada uma luva de látex com preenchimento de algodão, para simular a mão humana; assim, foi possível visualizar os movimentos da órtese e de como seria em um paciente. A programação da órtese foi feita para movimentar cada dedo por si só, e também fechando a mão toda, para simular o movimento de pega de um objeto. Nesses testes realizados, foi possível visualizar que todos os movimentos ficaram como esperados, porém com algumas restrições, devido ao ângulo de giro em torno do eixo de cada elemento de coordenação dos dedos, que ficaram com ângulos de 37° graus em cada componente de articulação da órtese.

Figura 06- Encaixe dos dedos



Fonte: Acervo dos autores

CONCLUSÃO

Com o intuito de se desenvolverem novas tecnologias de reabilitação terapêutica para pacientes com determinados tipos de traumas ortopédicos, foram levantados estudos sobre novos tipos de órteses para mãos. Os engenheiros são desafiados constantemente a solucionar problemas dos mais diversos segmentos da sociedade. Em busca dessas soluções, surgem novas tecnologias, que são empregadas nos meios sociais.

Um dos principais desafios do projeto foi desenvolver a órtese de modo que ela não incomodasse o usuário, sendo leve, e que o

material tivesse boa resistência e um bom acabamento, com custo final viável. O objetivo foi alcançado, a órtese ficou com um peso final consideravelmente leve, teve um bom acabamento e com valor final acessível.

Dessa forma, foi possível desenvolver um protótipo de órtese para mão com o conhecimento adquirido ao longo de curso de Engenharia Mecânica, cujas disciplinas de Desenho Técnico, Engenharia de Produto, Informática na Engenharia Mecânica, Resistência dos Materiais e Metodologia de Pesquisa Científica foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Para futuros trabalhos, a órtese pode ser feita com a espessura menor, e seus movimentos podem ser dados por comandos ativados pelos músculos do braço do paciente, assim reproduzindo o movimento que ele deseja.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Douglas Ruy Soprani S. *et al.* **Mão robótica**. 2015. Disponível em: <<http://www.mnr.org.br/mostravirtual/interna.php?id=11069>>. Acesso em: 17 mar. 2017.
- CAMPOS, Emanuel. **Prototipagem Rápida - definições e processo**. 2012. Disponível em: <<http://www.impresso3d.com.br/2012/10/prototipagem-rapida-definicoes-e.html>>. Acesso em: 14 jun. 2017.
- CAMPOS, Mário Fernando Montenegro; PINTO, Saulo Augusto de Paula. **Uma órtese robotizada de mão**. 1999. 5 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.
- IBGE. **Censo Demográfico 2000**. Tabulação Avançada Resultados Preliminares da Amostra: Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/08052002tabulacao.shtm>>. Acesso em 27 de março 2017.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Pearson Prentice Hall, 5.ed., São Paulo, 2004.
- MARINHO, Thiago de Sá Earp de Souza. **Projeto e controle de um mão robótica servo controlada por tendões**. 2009. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Puc-rio, Rio de Janeiro, 2009
- MENESES, K. V. P.; ROCHA, D. N.; CORRÊA JÚNIOR, F. L.; SONO, T.; OLIVEIRA, A. L.; PINOTTI, M. Aplicação de uma órtese funcional para mão em indivíduos com lesão do plexo braquial. **Rev. Ter. Ocup.** Univ. São Paulo, v. 23, n. 1, p. 34-43, jan./abr. 2012.
- MENESES, K.V.P. **Avaliação funcional de uma órtese para mão com músculos artificiais eletromecânicos em pacientes com lesão de plexo braquial**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008
- OLIVEIRA, Carlos D.; DAVIM, J. Paulo. **Maquinagem de uma prótese para artroplastia total do ombro**. 2014. 13 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014.
- PINTO, S.A.P. **Implementação e avaliação de uma órtese funcional robotizada de mão**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.
- ROCHA, Daniel Neves. **Desenvolvimento de modelos biomecânicos tridimensionais do membro superior: mão e cotovelo**. 2011. 118 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- SILVA, Luiz Augusto Zillmann da. **Controle de prótese mecânica aplicado à robótica assistiva através de eletromiografia**. 2016. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- SOBOTTA, Johannes. **Atlas de anatomia humana: tronco, vísceras e extremidades inferiores**. Guanabara Koogan, 2000.

ANÁLISE ESTRUTURAL BASEADA NA ARQUITETURA ÓSSEA UTILIZANDO RECURSOS DE MODELAGEM 3D E SIMULAÇÃO ANALÍTICA POR ELEMENTOS FINITOS

OLIVA, Henrique Nunes Pereira¹; QUEIRÓZ, Anderson Gomes²; ALVES, Bruno²; QUEIRÓZ, Karine Gomes²; RICELE, Roberto²
¹Docente das FIPMoc. ²Discentes das FIPMoc

RESUMO

O osso apresenta exclusiva propriedade biomecânica. Possui regiões características: osso compacto e osso esponjoso, que, por sua vez, apresentam os mesmos componentes histológicos, mudando apenas a disposição estrutural. As cargas aplicadas no osso adaptam-se dinamicamente por meio de elementos trabeculares, além de se encontrarem preferencialmente alinhados segundo a direção das tensões máximas aplicadas. Em engenharia, busca-se obter estruturas com distribuição de tensões tão boa quanto no caso dos ossos. Este estudo tem com objetivo analisar e simular, por meio de *software* de modelagem e simulação, o fenômeno da distribuição e resistência incidida em objeto de arquitetura semelhante à estrutura óssea. Realizou-se a modelagem do objeto com as referidas características, da forma mais aproximada possível. Foi representada, de forma esquematizada, a modelagem em 3D dos objetos, fundamentando-se nas regiões de um osso, obtendo-se então a montagem da estrutura final, que demonstra as características das regiões e a correlação com o modelo natural. Por meio do suplemento *Simulation Standard* do SolidWorks, iniciou-se a análise estrutural da montagem. A análise foi limitada tendo em vista a capacidade restrita do *hardware* utilizado para simulação, somada à complexidade da peça. As criações em modelagem 3D dos componentes, bem como sua montagem, foram efetuadas com sucesso. A obtenção dos dados da análise estrutural foi inviabilizada em decorrência das dificuldades e limitações de processamento do *hardware*. No

entanto, o presente trabalho satisfaz o objetivo de modelar e permitir análise da estrutura de engenharia análoga ao osso humano.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem 3D. Estrutura Óssea. Trabéculas. Biomimética.

INTRODUÇÃO

Biomimética

Há muito tempo que o homem tende a imitar a natureza, com o objetivo de solucionar as diversas contrariedades provenientes do mundo a seu redor. Ao longo de seu desenvolvimento, desde a utilização das peles dos animais como proteção de seu corpo, até o atual desenvolvimento tecnológico e científico, a natureza tem oferecido uma vasta gama de modelos naturais como fonte de inspiração para o desenvolvimento de novas soluções sustentáveis (BAR-COHEN, 2006).

Segundo Bar-Cohen (2006), na Biomimética ou Biomimetismo, a natureza é encarada como modelo, tentando-se imitar suas configurações, processos e sistemas, alterando o pensamento de retirar e usar os diversos elementos da natureza, para a ideia de visualizar e aprender com eles.

Utiliza-se um padrão ecológico para julgar a sustentabilidade das invenções, pois, ao longo de sua evolução, a natureza aprendeu o que funciona, o que é apropriado e o que perdura. A aplicação dessa ciência tem trazido grandes benefícios no desenvolvimento de diversas áreas tecnológicas e científicas, inclusive na Engenharia Mecânica.

Sistema Ósseo

O sistema ósseo desempenha diversas funções, como sustentação, sítios de fixação; colabora com o sistema de alavancas; faz proteção, armazenamento de cálcio e minerais, como também hematopoese (MOREIRA, 2013). Diniz *et al.* (2009) comentam que o tecido ósseo é aperfeiçoado para sustentar cargas aplicadas pelo deslocamento fisiológico, estando relacionadas tanto suas propriedades materiais como sua geometria estrutural. Devido à função que desempenham, os ossos são constantemente submetidos a diversos tipos de esforços, à semelhança de estruturas utilizadas na engenharia (DALMOLIN *et al.*, 2013).

O osso é um tecido dinâmico, complexo, influenciado por fatores fisiológicos, nutricionais e físicos, como estresse mecânico e atividades físicas. Para atender às necessidades de crescimento do organismo, os ossos sofrem processo de modelagem, que representa o alongamento longitudinal e do diâmetro. Há uma variação individual e específica do crescimento de cada osso, cujo controle se dá sobre a epífise, isto é, cada cartilagem de conjugação tem uma taxa específica de crescimento, em que o controle é geralmente hereditário (MACARI *et al.*, 2002).

O tecido ósseo é uma forma especializada de tecido conjuntivo, constituído por células e por uma matriz extracelular, que possui a característica única de mineralizar. A mineralização da matriz confere a esse tecido uma extrema dureza, permitindo-lhe desempenhar importantes funções de sustentação e proteção (JUDAS *et al.*, 2012).

Essas ligações cruzadas são as principais responsáveis pela estabilização da molécula e das fibras de colágeno, e pela modulação das propriedades de resistência à tração conferida ao osso pelo colágeno, atribuindo força ao tecido para suportar as pressões (MACARI *et al.*, 2002). Segundo Dalmolin *et al.* (2013), devido à função que desempenham, os ossos são constantemente submetidos a diversos tipos de esforços, à semelhança de estruturas utilizadas na engenharia.

A maioria dos ossos do corpo humano possui, em sua estrutura óssea, a camada externa composta de osso do tipo cortical, com tecido esponjoso subjacente a essa parte compacta. É importante ressaltar que ambos são anisotrópicos, quer dizer que esses ossos oferecem graus de resistência e rigidez diferentes em resposta às forças aplicadas em diferentes direções. O tecido ósseo é mais forte para suportar *stress* compressivo e mais fraco para resistir a *stress* tangencial (WATKINS, 2001).

Análise Estrutural

A análise estrutural realiza, a partir de um modelo estrutural, os levantamentos dos esforços internos e externos da estrutura perante as ações impostas. A idealização do comportamento da estrutura é de fundamental importância, pois, ao final dessa análise, obtêm-se resultados de esforços correspondentes, deslocamentos e deformações na estrutura em estudo (MARTHA, 2010). Para que se realize a análise estrutural, é necessário basear-se em um modelo estrutural que envolva todas as hipóteses físicas necessárias e condizentes com a estrutura real.

Com base em biomimética, o presente trabalho tem por objetivo analisar e simular, por meio de *software* de modelagem e simulação, o fenômeno da distribuição e resistência incidida no objeto de arquitetura semelhante à estrutura óssea e, assim, extrair ilações relativas à concepção de uma estrutura inspirada em modelo natural.

MÉTODO

O projeto 3D da estrutura proposta e os trabalhos experimentais foram realizados com a utilização do *software* SolidWorks. O *SolidWorks Simulation* é um conjunto completo de aplicativos de análise estrutural, funcional e de fluxo para projetistas do processo de desenvolvimento de produtos. Ele ajuda a prever o desempenho de seu projeto em condições reais de operação, e a detectar problemas, para corrigi-los antes das fases de protótipo, desenvolvimento de ferramentas e produção. O suplemento *SolidWorks Simulation Standard* oferece um ambiente de teste virtual intuitivo para movimento estático linear, com base em tempo, e para simulação de fadiga; assim, é possível lidar com desafios comuns de engenharia com uma solução incorporada do *SOLIDWORKS CAD 3D*. O “Modo de Falha Fadiga” realiza facilmente análises de fadiga metálica em componentes metálicos com o *SolidWorks Simulation Standard*. Avalia o impacto de cargas cíclicas sobre a vida estrutural de um produto, para garantir que ele atenda aos requisitos de desempenho, qualidade e segurança (SKAEngenharia, 2014).

As ferramentas utilizadas neste trabalho foram: um *software* de modelagem e análises, o *SolidWorks*, para a modelagem do objeto para estudo, no caso, uma peça de arquitetura semelhante à estrutura óssea considerada. Foi usado, também, um suplemento, o simulador *SolidWorks Simulation Standard*, como ferramenta para o estudo do comportamento estrutural. Como *hardware*, usou-se um *Workstation* móvel, que é um *notebook* modelo *Dell Precision M6800* de configuração, sendo um processador *i7 4800M 3.7 GHz*, *16GB* de RAM e placa de vídeo *NVIDIA Quadro K3100M 4GB*.

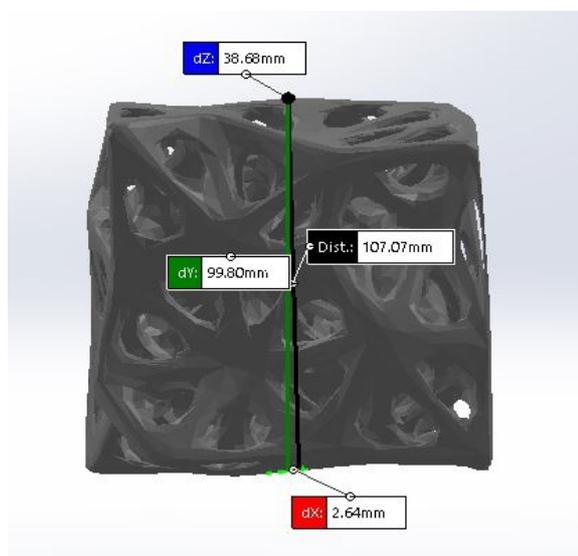
Abordou-se a teoria acerca da estrutura óssea, suas características e comportamento, objetivando compreender a geometria e comportamento às cargas incididas, tendo também como finalidade esta abordagem nortear a execução deste trabalho.

Posteriormente, executou-se a modelagem do objeto com as características, da forma mais aproximada possível referente, à literatura abordada e limitações do *software* utilizado. As representações, esquematizadas a seguir, referem-se à modelagem em 3D dos objetos, fundamentado em relação às regiões de osso compacto e esponjoso. Este trabalho releva a arquitetura estrutural óssea, limitando-se especificamente ao fêmur.

RESULTADOS

A figura 1 mostra o objeto que representará, posteriormente, o osso esponjoso, no qual os elementos trabeculares, como dito na literatura, estão dispostos de maneira aleatória e espaçados. Ressalta-se também, que o objeto, em específico, localiza-se à nas extremidades superior e inferior de sua estrutura – a região denominada Epífise.

Figura 1: Objeto – Osso Esponjoso

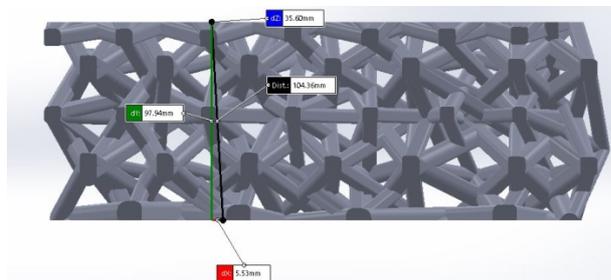


(Fonte: Acervo do pesquisador).

Na figura 1, verifica-se caixas com valores. Esses valores são medições das dimensões da peça projetada, para fins de conferência do projetista. A figura 2 permite visualização do objeto modelado, que representará o osso compacto. As trabéculas se

comportam de forma mais organizada e admitindo caráter linear e paralelo.

Figura 2: Objeto – Osso Compacto



(Fonte: Acervo do pesquisador).

Segue-se, agora, a representação da estrutura final, que demonstra as características das regiões e a correlação com o modelo natural. Essa representação denomina-se montagem. Há, então, na montagem, as regiões Epífise e Diáfise.

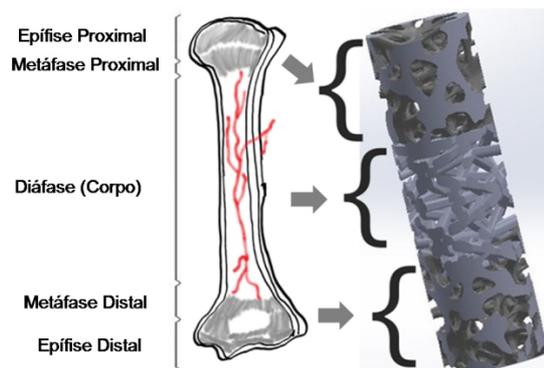
As figuras 3, 4 e 5 mostram o posicionamento das regiões características, a conformidade do objeto até a última versão, bem como suas dimensões. A estrutura aproximou-se de 250mm de altura, e diâmetro de 75mm. Isso é mais bem demonstrado na etapa em que se insere a capa no entorno do objeto (figura 5).

Figura 3: Montagem



(Fonte: Acervo do pesquisador).

Figura 4: Correlação e Montagem conformada



(Fonte: Acervo do pesquisador).

Fez-se necessária a aplicação de uma capa em torno do objeto, para ser possível realizar sua análise estrutural, tornando-o um perfil de forma aparentemente cilíndrica (Figura 5).

Por meio do suplemento *Simulation Standard do SolidWorks*, iniciou-se a análise estrutural da montagem, implementando o recurso Malha no objeto, aferindo-o todo, ou seja, a estrutura por trás da capa, também. Nesse recurso, definiu-se o material da montagem, que foi o Aço A36, indicado para uso estrutural, tendo sido o de melhor escolha na lista de opções do *software*.

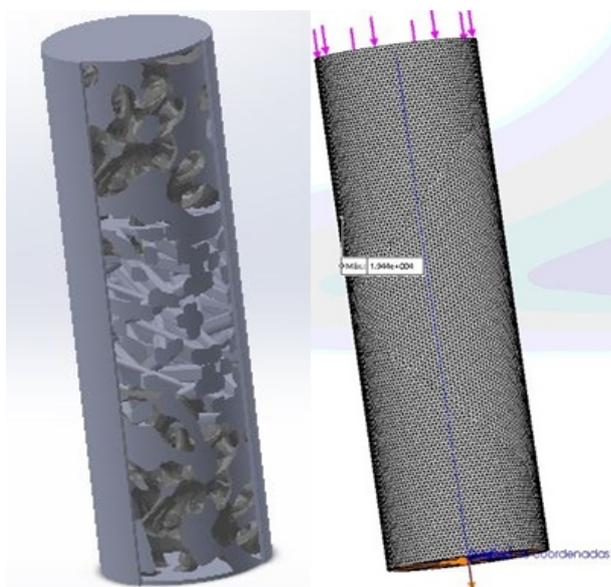
Os aços estruturais de média e alta resistência mecânica, termo designativo de todos os aços, devido a sua resistência, ductilidade e outras propriedades, são adequados para serem empregados em elementos da construção sujeitos a carregamento. Os principais requisitos para aços destinados à aplicação estrutural são: elevada tensão de escoamento, alta tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade microestrutural, dentre outras (DIAS, 1997).

Dentre os aços estruturais existentes atualmente, o mais utilizado e conhecido é o ASTM A36, que é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica. O aço A36 possui pequenas quantidades de carbono, sendo composto, principalmente (99%), de ferro. Possui uma superfície rugosa; sua resistência em relação à tração encontra-se entre 58.000 psi e 79.800 psi,

trabalhando com um máximo de elasticidade de 36.000 psi, sendo recomendado pela norma não ultrapassar um alongamento de 20% de sua seção (TRIMETAIS, 2015).

Ao efetuar o recurso de Malha (Figura 5), obtiveram-se os dados necessários para estimar a força a ser aplicada no objeto. O valor foi de 8.900 N.

Figura 5 Visualização da arquitetura interna e Montagem com a Malha e Carregamento



(Fonte: Acervo do pesquisador).

A execução desta análise estrutural demandou um alto desempenho de *hardware* disponível. Ressalta-se, também, que esse objeto possui uma alta complexidade, grande quantidade de faces e superfícies irregulares. Esses fatores ocasionaram uma elevada demanda de memória RAM e, além disso, houve uma sequência de erros no *SolidWorks*, associada ao excesso de variáveis para simulação. Segue-se a mensagem do erro: “O Solver iterativo parou. O solucionador tem dificuldades numéricas. O modelo pode não ter acessórios adequados. Nenhum resultado salva.”

Por fim, considerando as limitações de *hardware* disponível, mesmo fazendo uso de um *Workstation* móvel e tendo razoáveis configurações (citadas no item Métodos), além das limitações do

SolidWorks para esta aplicação, tornou-se impossível a execução da análise estrutural completa.

DISCUSSÃO

O tecido ósseo sustenta e estrutura o corpo, sendo considerado órgão fisiológico e estrutura anatômica. Uma íntima relação entre a forma e a função foi, desde muito tempo, reconhecida na arquitetura óssea (GUSMÃO; BELANGERO, 2009).

De fato, ao longo da vida, o tecido ósseo possui uma grande capacidade de adaptação aos estímulos mecânicos associados à atividade fisiológica diária. Solicitações mecânicas como as decorrentes da ação da gravidade ou da atividade muscular constituem exemplos de estímulos (estáticos e dinâmicos) fundamentais à preservação da massa óssea (JUDAS *et al.*, 2012). Sua deformação durante a locomoção varia de 0,04-0,3%, raramente excedendo 0,1% (GUSMÃO; BELANGERO, 2009).

Materiais como o osso, cujas características de tensão - deformação e de resistência dependem da velocidade de deformação aplicada, são considerados visco - elásticos, pois se distendem vagarosamente sob baixa carga, considerando que, quanto maior o tempo de aplicação da carga, mais se distendem, embora de maneira mais lenta com o passar do tempo (DALMOLIN *et al.*, 2013). De acordo com Watkins (2001), a resposta de um material visco - elástico é sempre tempo-dependente. Entretanto, a resposta real depende do tipo de carga.

As trabéculas ósseas se encontram preferencialmente alinhadas segundo a direção das tensões máximas aplicadas, o que origina uma distribuição anisotrópica da resistência e rigidez do osso, ou seja, essas propriedades variam com a direção considerada. Cada osso constitui, então, uma estrutura tridimensional otimizada e

economicamente muito eficaz, para melhor resistir aos esforços mecânicos aplicados.

De um modo geral, pode-se afirmar que o tecido ósseo é um material duro e particularmente resistente à compressão axial, possuindo, ainda, certo grau de flexibilidade e capacidade de absorção de choques (tenacidade). Com efeito, sendo essencialmente constituída por cristais de hidroxiapatite e fibras de colágeno, a matriz óssea combina, numa só, as propriedades de ambos os materiais. Isto é, a dureza e rigidez do componente mineral, e a elasticidade e flexibilidade das fibras colagênicas (JUDAS *et al.*, 2012).

Ossos não é completamente dúctil nem frágil, mas uma combinação dessas características. A porção orgânica corresponde a 35% da matriz extracelular, sendo responsável pela resistência à fratura, compressão e tração, conferindo maleabilidade tecidual, sem que ele perca clinicamente sua dureza. A resistência à deformação deve-se aos componentes inorgânicos que constituem 65% da matriz (CASTRO JR *et al.*, 2008).

Forças não fisiológicas são geradas durante atropelamentos ou quedas, por exemplo. Facilmente excedem a resistência limite do osso, levando a fraturas. Essas forças são divididas em quatro tipos básicos (compressão, flexão, tensão e torção), que afetam o osso de maneira diferente, desenvolvendo, cada uma delas, um padrão de fratura característico (HULSE; HYMAN, 2007).

Os ossos, como qualquer outro material na natureza, quando submetidos a forças, podem apresentar aceleração, deformação ou ambas. De certa forma, uma força externamente aplicada pode ser direcionada em qualquer ângulo, produzindo padrões de *stress* complexos (CULLINANE; EINHORN, 2002).

Assim, o tamanho, a forma e a resistência do osso são regulados, em parte, por essas forças mecânicas, durante as atividades físicas diárias. As forças fisiológicas são complexas e sobrepostas, devendo ser consideradas separadamente para

análise mecânica, pois, embora o osso seja submetido a várias forças interna e externamente geradas que podem surgir individualmente, tipicamente elas o fazem de maneira combinada (DALMOLIN *et al.*, 2013).

Análises da resistência dos ossos podem ser realizadas de maneira semelhante a muitos materiais da engenharia. O teste universalmente utilizado para determinar as propriedades mecânicas de um material é o de tensão uniaxial. Nesse teste, uma amostra do material, na forma de uma haste com uma seção transversa quadrada ou circular, é sujeita a uma deformação axial no sentido de seu eixo longitudinal (CULLINANE; EINHORN, 2002).

CONCLUSÃO

As criações em modelagem 3D e sua montagem foram executadas da forma mais aproximada que se poderia alcançar nesse projeto, como demonstradas anteriormente, considerando, então, que houve a obtenção de sucesso nesse objetivo. Foi inviabilizada a obtenção dos dados da análise estrutural para aqui serem demonstrados, devido, como já dito, a limitações presentes no equipamento disponibilizado para o estudo. O erro refere-se ao fato de a Montagem conter um grande número de superfícies irregulares, assim não sendo possível executar a iteração matemática computacional. Um possível *software* que poderia substituir o *SolidWorks* nessa função seria o ABAQUS, da mesma companhia (Dassault Systemes), que é mais indicado para simulação por elementos finitos.

REFERÊNCIAS

CASTRO JR, A.F. *et al.* Embriologia e histofisiologia do tecido ósseo: revisão de literatura e bases histofisiológicas das principais doenças ósseas metabólicas. **Rev Boletim do Centro de Biologia da Reprodução**. 27(1/2): 27-32, 2008.

BAR-COHEN, Y. Biomimetics—using nature to inspire human innovation. **Bioinspiration & biomimetics**, v. 1, n. 1, p. P1, 2006.

CULLINANE, D. M.; EINHORN, T. A. **Biomecânica do osso**. 2.ed. v. 1, Cap 2. CA: Academic Press. pp. 17-32, 2002.

DALMOLI, F.; FILHO, S. T. L. P.; CORTES, A. M.; BRUN, M. V.; CAUDURO, C. R. SCHOSSLER, J. E. W. Biomecânica óssea e ensaios biomecânicos - fundamentos teóricos. **Rev Ciência Rural**. 43(9): 1675-1682, 2013.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem** São Paulo: Zigurate, 1997.

DINIZ, J.S. *et al.* Propriedades mecânicas do tecido ósseo: uma revisão bibliográfica. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 5., 2009, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2009. 3p.

GUSMÃO, C.V.B.; BELANGERO, W.D. Como a célula óssea reconhece o estímulo mecânico? **Revista Brasileira de Ortopedia** 44(4): 299-305, 2009.

HULSE, D.; HYMAN, B. Biomecânica e biologia das fraturas. In: SLATTER, D. **Manual de Cirurgia de Pequenos Animais**. 3 ed. Barueri: Manole. Cap. 126, p. 1785-1792, 2007.

JUDAS, F.; PALMA, P.; FALACHO, R. I.; FIGUEIREDO, H. Estrutura e dinâmica do tecido ósseo. **RevBones**. 42(4): 106-115, 2012.

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2007.

MACARI, M.; FURLAN, R.L.; GONZALES, E. **Fisiologia aviária aplicada a frangos de corte**. Jaboticabal: FUNEP/UNESP. p. 375, 2002.

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. 1 Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MOREIRA, B. S. A biomecânica da fratura e o processo de cicatrização. **ArqUnisuam**. 3(1): 101-117, 2013.

SKA, Engenharia. Disponível em:

<http://www.ska.com.br/site/uploads/produtos/downloads/fb79e46deb2e4892ec1d356b5bc47e6f.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2017.

TRIMETAIS, Indústria Metalúrgica. Disponível em:<<http://trimetais.com.br/materiais/aco-a36/>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

WATKINS, J. **Estrutura e Função do Sistema Musculoesquelético**. Porto Alegre: ArtMed, 2001.