

ESTUDO DE PUNÇÕES EM TECIDO BIOLÓGICO PARA BRAQUITERAPIA REALIZADAS POR UM ROBÔ INDUSTRIAL COM SISTEMA DE CONTROLE ABERTO

RENATO DE SOUSA DÂMASO; FLÁVIA APARECIDA FERNANDES DE SOUSA

Laboratório de Robótica, CEFET-MG, Campus Divinópolis
Rua Álvares de Azevedo, 400 - Bela Vista – Divinópolis, MG - CEP 35503-822
E-mails: renatosd@div.cefetmg.br flaviaaafsousa@gmail.com

TARCÍSIO PASSOS RIBEIRO DE CAMPOS

Lab. NRI- Nucleo de Radiações Ionizantes, Depto. Engenharia Nuclear, UFMG
Av. Antônio Carlos, 6.627 - Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG - CEP: 31270-901.
E-mail: tprcampos@yahoo.com.br

Abstract—Brachytherapy is a cancer treatment technique that seeks the position of sealed and discrete radioactive sources near or inside the tumor tissue. In prostate brachytherapy, it is being proposed inserting $\text{Ho}^{166}\text{:Si:Ca}$ sources made of biodegradable and biocompatible ceramic segments with 1.6mm long and 0.5mm in diameter, activated in radiators. These sources are developed in NRI/UFMG; contrasting with I^{125} metal seed of 4.5mm x 0.8mm. These sources, called seeds, are applied manually by the clinician through needle guided by ultrasound. This paper proposes the use of a robotic manipulator to perform the positioning of seeds in certain positions in the planning stage of treatment, with greater accuracy than the current clinical procedure, besides the improvement of radiation protection, saving the clinical staff of exposure to radiation doses. This paper presents a study of parameters related to the automated procedure, carried out by means of an industrial robot with open control system. A support prototype was developed for attaching a needle to a force sensor assembly and that to the standard robot flange. It is expected that the signals generated by the sensor can be used in a power control loop to drive the robot. Results of punctures tests made on biological tissue are shown at the end. It is expected that this kind of test and its results will assist in identifying the type of tissue is being penetrated by the needle, depending on its density, thereby preventing the placement of seeds in adipose tissue, blood vessels or empty regions.

Keywords—Robotized needling, Force sensor, Seeds positioning

Resumo—A braquiterapia é uma técnica de tratamento de câncer que busca o posicionamento de fontes radioativas seladas e discretas próximo ou no tecido tumoral. Na braquiterapia de próstata, está sendo proposta a inserção de fontes $\text{Ho}^{166}\text{:Si:Ca}$ compostas de segmentos cerâmicos biodegradáveis e biocompatíveis, com 1,6mm de comprimento e 0,5mm de diâmetro, ativada em irradiadores, desenvolvidas no NRI da UFMG; contrapondo a sementes de I^{125} metálicas de 4,5mm x 0,8mm. Estas fontes, denominadas sementes, são aplicadas manualmente pelo clínico médico através de agulhas guiadas por ultrassonografia. Este trabalho propõe o uso de um manipulador robótico para realizar o implante das sementes nas posições determinadas na etapa de planejamento do tratamento, com uma precisão maior que o procedimento clínico atual, além da melhoria da proteção radiológica, poupando o corpo clínico de exposições a doses consideráveis. Este trabalho apresenta um estudo de parâmetros relacionados ao procedimento automatizado, realizado por meio de um robô industrial com sistema de controle aberto. Foi desenvolvido um protótipo de suporte para acoplar uma agulha a um sensor de força e esse conjunto à flange padrão na extremidade do robô. É esperado que os sinais gerados pelo sensor possam ser usados na implementação de uma malha de controle de força para o acionamento do robô. Ao final são mostrados resultados de testes de agulhamentos feitos em tecido biológico. É esperado que esse tipo de teste e seus resultados venham a auxiliar na identificação do tipo de tecido que está sendo penetrado pela agulha, em função da sua densidade, evitando assim o posicionamento de sementes em tecido adiposo, vasos sanguíneos ou regiões vazias.

Palavras-chave—Agulhamento robotizado, Sensor de força, Posicionamento de sementes

1 Introdução

Os vários tipos de câncer que acometem milhões de pessoas a cada ano no mundo são tradicionalmente tratados pela radioterapia, quimioterapia e cirurgia, ou pela combinação desses procedimentos. A braquiterapia é uma modalidade de radioterapia na qual se procura posicionar fontes discretas de radiação no tecido tumoral ou próximo a ele, de forma a minimizar os danos nos tecidos sadios em sua vizinhança (Einstein, 2016).

A deposição das sementes, atualmente, na braquiterapia de próstata é realizada por meio de agulhamento manual, como é ilustrado na Figura 1. Para isso é utilizada uma espécie de placa gabarito para

auxiliar na colocação das agulhas e guiar a sua inserção através do períneo. O posicionamento das sementes radioativas é monitorado através de um equipamento de ultrassom transretal. A Figura 2 mostra um procedimento de braquiterapia de próstata executado em um paciente, onde pode ser vista a placa guia.

Após o implante das sementes, seus posicionamentos são verificados através de imagens de raio-X. Uma dessas imagens é mostrada na Figura 3, em que os pontos azuis representam as sementes posicionadas. Caso tenha ocorrido um posicionamento impreciso de algumas das sementes, não é previsto sua reversão por conta das dificuldades inerentes a essa correção.

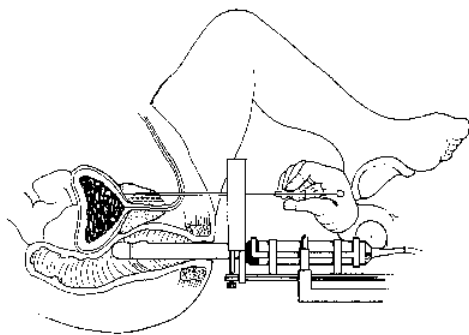


Figura 1. Representação do processo de braquiterapia de próstata (Rodrigues, 2014)

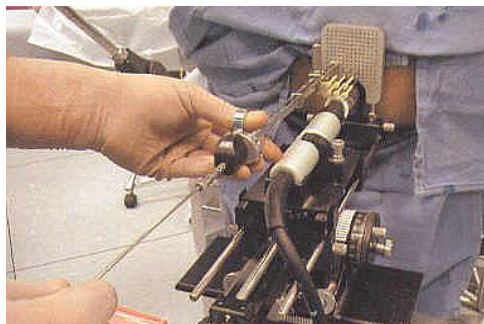


Figura 2. Procedimento real de braquiterapia de próstata (Rodrigues, 2014)

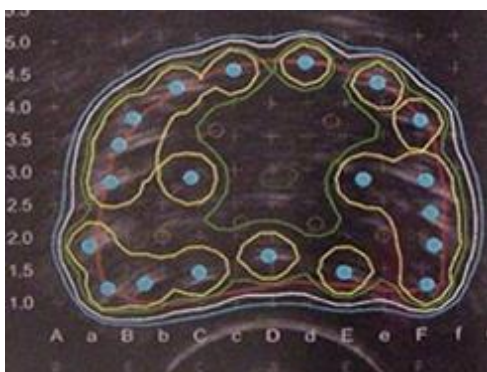


Figura 3. Imagem de raio X para verificação do posicionamento das sementes (Einstein, 2016)

No grupo de pesquisa NRI – Núcleo de Radiações Ionizantes, da UFMG, foi abordado o projeto e desenvolvimento de um posicionador de fontes por meio de hastes flexíveis acopladas à extremidade de cateteres (Dâmaso e Campos, 2000). Em (Oliveira, 2013) foi projetado um dispositivo capaz de guiar agulhas com a finalidade de posicionar sementes radioativas em braquiterapia intersticial, em especial para o tratamento de câncer de próstata, numa parceria entre o CEFET-MG e a UFMG. Em 2015, com a compra de um robô industrial com sistema de controle aberto, foi retomada essa parceria para desenvolver a ideia de empregar o robô para automatizar o implante de sementes radioativas para o tratamento de câncer de próstata por braquiterapia.

A precisão do posicionamento de sementes metálicas de I-125 de 4,5 mm de comprimento e 0,8 mm de diâmetro, por meio da aplicação manual pode ser estimada através de um possível deslocamento espacial induzido por desvios presentes na orientação do

ângulo de punção, no deslocamento longitudinal da agulha, e no deslocamento longitudinal e torção da sonda de ultrassom; mesmo sendo aplicado com a esperada acurácia de um cirurgião. Por exemplo, 5% de inclinação normal inserida em 200 mm no comprimento, tomado da ponta de uma agulha, devido à flexão, implicam em um deslocamento radial de 0,4 mm da posição original. Um adicional erro de 10% do recolhimento longitudinal da agulha ou da própria cabeça do ultrassom, em um *stepper* de 10 mm, implica em 2,0 mm de desvio ou em dobro (4,0 mm), caso os desvios sejam opostos. Considerando os desvios no espaço 3D, estima-se 2,04 mm a 4,02 mm, com média 3,02 mm, um possível desvio da posição original da semente. Considerando que o comportamento da dose atenua de forma exponencial em função da distância e do coeficiente de atenuação do tecido à 30 keV (NIST, 2016); estima-se que 3,02 mm induz um desvio de 19% na dose absorvida no tecido canceroso. Assim, a 5 mm de distância radial da semente, uma dose esperada de 50 Gy representará uma subdosagem de 10 Gy; e a 10 mm, uma dose de 30 Gy terá uma subdosagem de 6 Gy. Estes desvios podem ser acumulativos, visto que as sementes circunvizinhas podem também apresentar desvios, e consequentemente imprecisões significativas da dose absorvida na próstata, o que terá significativas alterações radiobiológicas do tumor.

Essa imprecisão na dose absorvida motivou a proposta de utilização de um sistema automatizado de posicionamento de sementes em implantes radioativos na próstata, mais especificamente a utilização de um manipulador robótico.

2 Proposta do Projeto

Foi proposto o desenvolvimento de um protocolo de implante automatizado para braquiterapia de próstata. Esse protocolo tomou como princípio a existência de pontos de referência, ditos pontos fiduciais superficiais, posicionados na pele do paciente. Tais pontos podem ser fisicamente representados por microesferas de aço ou chumbo, fixados na pele por fitas adesivas. Em tomografia computadorizada (CT), tais pontos de referência podem ser identificados e superpostos à reconstrução tridimensional da anatomia do paciente. A reconstrução tridimensional é utilizada no planejamento do tratamento, onde é então estimada a distribuição espacial das sementes no tumor, tomadas como referência os pontos fiduciais.

A partir de tais referências e do planejamento do tratamento, o sistema automatizado executará o implante proposto. Para a execução do protocolo automatizado foi considerado o uso um robô, neste caso, o *Comau Smart5 SiX*, para a realização das punções e o posicionamento das sementes. Essa solução foi considerada ótima em função da precisão dos sistemas robóticos, sendo que a expectativa é obter-se uma melhoria da precisão para cerca de 0,5mm. Com o uso do robô, graças aos cálculos realizados por sua

unidade controladora, é acrescentada a capacidade de variar a orientação dos agulhamentos, para atender melhor a anatomia do paciente. Outras vantagens potenciais são: a possibilidade de automatizar também a tarefa de carregamento das sementes radioativas ao longo da agulha; e evitar que o corpo clínico esteja em contato com altas doses de radiação para executar o implante das sementes.

3 Materiais e Metodologia

A realização do estudo de características associadas à punção de tecidos biológicos por meio de um robô demandou a construção de um suporte capaz de fixar uma agulha hipodérmica BD8 ao flange do robô. Este tipo de agulha pode ser usado para implantar sementes radioativas na próstata. A fim de monitorar as forças geradas na agulha nos procedimentos de punção em diferentes tecidos, foi necessária a integração de um sensor de força ao sistema robótico. Essa integração foi possível devido à unidade controladora do robô possuir um sistema de controle aberto, chamado de C5G Open. Este sistema, segundo Antonelli et al (2010), possui uma arquitetura que permite a integração fácil e segura da controladora do robô industrial a um computador externo. Portanto, através desta plataforma computacional externa é possível controlar as ações do robô a partir de sinais externos, aumentando assim suas funcionalidades em relação à controladora padrão. No caso deste trabalho, os sinais externos são provenientes do sensor de força, que permitirão a implementação de uma malha de controle de força a ser acrescentada ao controle de movimentação do robô.

Foi adaptado um sensor de força, entre outros elementos de uma balança eletrônica de precisão de baixo custo. Os demais elementos aproveitados da balança foram os componentes de aquisição, de tratamento do sinal e de conversão analógico digital para display de sete segmentos. Foi preciso acrescentar decodificador para os sinais do display, um buffer do tipo FIFO e um transmissor USB.

3.1 O Robô Comau

O robô *Comau Smart5 SiX* foi o manipulador utilizado para efetuar os testes, devido ao fato de estar disponível na instituição e possuir características compatíveis com a tarefa proposta. Esse robô industrial é do tipo antropomorfo com 6 graus de liberdade de juntas rotacionais. Pesa cerca de 160Kg, possui uma repetibilidade de 0,05mm para um alcance horizontal de 1.400mm e uma capacidade de carga (*payload*) de 6Kg (Comau, 2005).

A linguagem dedicada à programação dos robôs Comau é a PDL2 (*Programm Development Language version Two*), que é baseada na linguagem Pascal, acrescentada de variáveis e funções predefi-

nidas do sistema. A principal adaptação da linguagem PDL2 é o comando *Move*, que movimenta o robô em relação ao frame de referência, que pode ser da base do robô ou do usuário. Outra possibilidade é a realização de movimentos incrementais em relação ao frame corrente da ferramenta (Comau Robotics, 2008).

3.2 A Agulha BD8

A agulha utilizada no projeto é do tipo hipodérmica, codificada como BD8, sendo mostrada na Figura 4, juntamente com seu êmbolo. A agulha possui um diâmetro externo de 1,1mm, um orifício passante de 0,8mm e comprimento de 73mm, sendo adequada para o implante das sementes radioativas cerâmicas de Ho:Si:Ca no processo de braquiterapia. As sementes possuem cerca de 1,6mm de comprimento por 0,5mm de diâmetro. O êmbolo possui um diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro interno da agulha, tendo sido seccionado em sua extremidade de forma a favorecer o avanço das sementes sem que sejam pressionadas contra a parede interna da agulha.



Figura 4. Agulha BD8 utilizada na braquiterapia e seu êmbolo

3.3 O Sensor de Força

Segundo Balbinot e Brusamarello (2011), a força pode ser medida através de deformações mecânicas como demonstrada na Lei de Hooke:

$$F = kx \quad (1)$$

Através da equação 1 é possível perceber que para um deslocamento (x) multiplicado por uma constante (k) há a medição da força.

Para minimizar o custo e maximizar a precisão das medições em relação a medidores de força puramente mecânicos foram criados os transdutores de força do tipo células de carga (*strain gage*) ou do tipo piezoelétricos. Estes dispositivos são responsáveis por converter uma deformação mecânica em um sinal elétrico (Fialho, 2012).

O sensor utilizado neste trabalho consiste em uma célula de carga de retirada de uma balança eletrônica de precisão com uma faixa de 0 a 500g e resolução de uma casa decimal. O seu funcionamento é baseado em um transdutor de força por extensometria, no qual há um elemento cuja resistência varia com a deformação. Um circuito eletrônico é respon-

sável por polarizar o sensor e converter suas deformações longitudinais em sinais elétricos.

3.4 Implementação do Decodificador Microcontrolado

Para complementar o circuito reaproveitado da balança digital, foi necessário o emprego de uma placa Arduino Mega, baseada no microcontrolador ATmega2560. Suas funções foram a decodificação dos sinais de controle e acionamento do display LCD da balança, criando assim um ponto de extração dos valores de força de agulhamento e a transmissão para a porta USB do computador integrado à unidade controladora do robô. Os sinais codificados para o display LCD contam com 4 sinais de controle multiplexados e 12 sinais de acionamento para os cinco dígitos do display, o ponto decimal e os demais ícones.

4 Desenvolvimento

4.1 Projeto da Ferramenta de Agulhamento

Um protótipo de ferramenta no formato de um suporte para acoplamento da agulha BD8 foi projetado em *software* de modelagem 3D. Um receptáculo foi modelado de forma que apoiasse a célula de carga ao suporte que é responsável pela conexão à flange do robô. Houve ainda a modelagem tridimensional de uma estrutura para fixar a agulha ao sensor de força.

Posteriormente as peças foram impressas separadamente em uma impressora 3D e montadas com o uso de alguns parafusos e porcas. A Figura 5 mostra o suporte acoplado à flange do robô.

O modelo cinemático do robô é fornecido pelo fabricante. Esse modelo expressa o frame móvel da flange na extremidade do robô em relação ao frame inercial de referência, localizado na base do mesmo. No entanto, ao ser acrescentada uma ferramenta à extremidade móvel do robô, é preciso acrescentar seu modelo cinemático. Isso é realizado por meio de um procedimento de calibração da ferramenta, onde é preciso posicionar a extremidade da ferramenta em relação a um referencial e fornecer quatro poses distintas para que a controladora do robô calcule o modelo cinemático da ferramenta. Uma dessas poses do processo de calibração da ferramenta é mostrada na Figura 5.

4.2 Planejamento da Tarefa no Ambiente de Simulação

Foi empregado o ambiente de simulação e programação *off-line* Sim 3D Lite para o planejamento das tarefas de agulhamento. Para isso, foi necessário proceder a modelagem do protótipo da ferramenta de agulhamento nesse ambiente, bem como do suporte da base do robô Comau e de um corpo de teste, representado por uma parte da região da pelve humana com uma esfera representando a próstata, como pode



Figura 5. Calibração da ferramenta de acoplamento da agulha à flange do robô

ser visto na Figura 6. Esse ambiente será particularmente útil nas preparações de tratamentos, podendo ser previamente analisadas as trajetórias, a fim de evitar colisões do robô com o paciente, por exemplo.

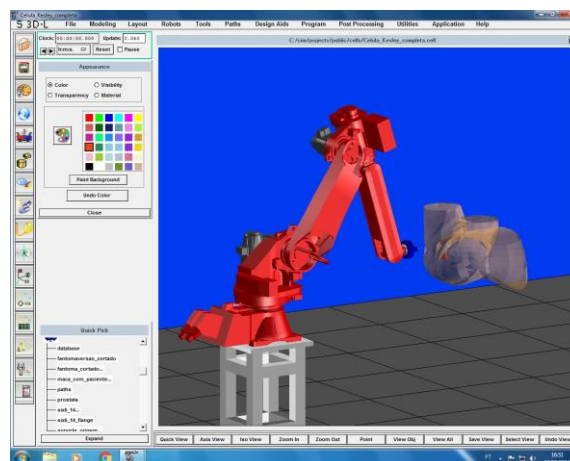


Figura 6. Ambiente de simulação

4.3 Testes Efetuados no Manipulador Robótico

Os testes iniciais podem ser divididos em três categorias, detalhadas a seguir.

Testes de calibração do sensor de força.

Nesses testes, a ferramenta de agulhamento foi posicionada com a agulha para cima e usada a função de ajuste de zero do circuito da balança eletrônica. Dessa forma, pôde-se caracterizar essa condição em que não está ocorrendo o contato da agulha com nenhum material ou tecido, mas somente a deformação do sensor produzida pela estrutura de fixação da agulha e da própria agulha sob a ação da gravidade.

Testes de agulhamento em corpo de gelatina.

O objetivo desses testes era verificar o comportamento do protótipo de ferramenta sem correr o risco de

dano no corpo da agulha. Esses testes serviram também para avaliar aspectos como: i) formas de programação do robô Comau em relação ao posicionamento e orientação; ii) resposta do sensor de força ao tocar e penetrar a superfície do corpo, bem como ao avançar e recuar dentro do corpo ao longo de uma punção; iii) identificação da trajetória da agulha e possíveis deformações, quer seja por algum desvio na direção do agulhamento em relação à direção “Z” do frame da ferramenta, quer seja por conta de diferentes ângulos de penetração da agulha em relação à superfície do corpo, permitido pela transparência da gelatina; e, por fim, iv) avaliação da precisão do posicionamento da agulha em relação ao posicionamento programado no robô, levando em consideração a correlação do frame do corpo de prova ao frame da base do robô. Para atender o presente objetivo, foi preparado um corpo de prova com a geometria de um tronco de cone, como é mostrado na Figura 7.



Figura 7. Sequência de agulhamento de corpo de prova de gelatina

Testes de agulhamento em corpo de tecido suíno.

Na Figura 8 é ilustrada a repetição dos testes de agulhamento programados no robô, usando agora o corpo de prova feito com camadas de tecido suíno. O principal objetivo desses testes foi verificar o perfil das forças medidas pelo sensor ao ocorrer a penetração da agulha em tecidos de diferentes densidades, tais como pele, tecido adiposo e tecido muscular. Outra variação produzida no procedimento de punção foi a alteração do ângulo de penetração da agulha em relação à superfície do corpo de prova de tecido suíno, semelhante ao que foi feito com o corpo de prova de gelatina.

Um vídeo com partes dos testes em corpo de gelatina e em tecido suíno pode ser visto no endereço https://youtu.be/T2pqo_HeQqA.

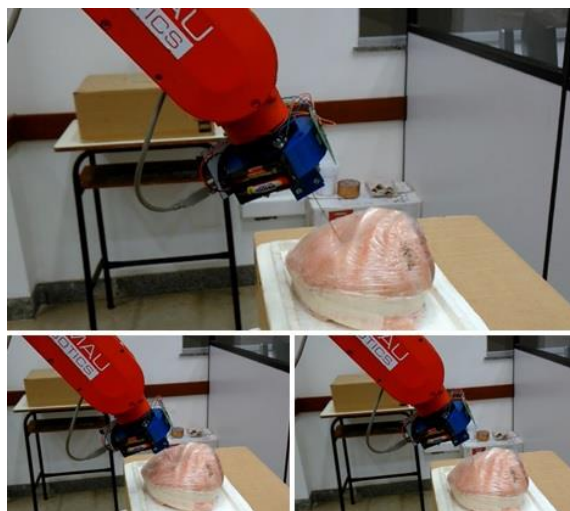


Figura 8. Sequência de agulhamento do corpo de tecido suíno

5 Análise de Resultados

Os perfis de forças de um dos testes de agulhamento em tecido suíno são apresentados nos gráficos da Figura 9, para ângulos de penetração de 45°, 65° e 90° da agulha em relação à superfície do corpo de prova. Nos testes, houve uma taxa de 15 amostras por segundo.

Nos gráficos da Figura 9 podem ser observados os momentos da amostragem em que a agulha toca a superfície do corpo de prova (início do aumento dos valores de força na agulha). O primeiro desses toques ocorreu 17 segundos após o início do teste. É característico também os instantes em que a agulha penetra a pele suína (queda brusca após o pico inicial de força). É importante ressaltar que, notadamente, a pele suína apresenta-se mais grossa e resistente que a humana. É possível notar também que a variação de forças dentro do tecido ao longo do agulhamento não ficou caracterizado, não sendo possível a diferenciação entre os tecidos. Isso pode ter ocorrido por conta do corpo de prova utilizado ter uma proporção bem maior de tecido adiposo do que muscular. Será preciso fazer mais testes em corpo com pele mais fina e camadas de espessuras conhecidas de tecido adiposo e tecido muscular, de forma a reunir mais dados, buscando caracterizar as interfaces teciduais. Por sua vez, a comparação entre diferentes ângulos de agulhamento resultaram em forças consideravelmente maiores em 45° do que em 65° e 90°, sendo produzida uma deflexão da agulha com potencial de causar dano à mesma ou ao sensor de força, que chegou à atingir seu fundo de escala de 5N, como pode ser observado no perfil de força para 45° na Figura 9.

6 Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho foi abordado o processo de punção automatizado para braquiterapia, testado em corpos de prova, por meio de um protótipo de ferramen-

ta desenvolvido para ser acoplado à extremidade do robô Smart5 SiX da Comau. Esse procedimento foi proposto como uma forma de evolução em relação ao procedimento manual para o posicionamento de sementes para a braquiterapia de câncer de próstata.

Com esse estudo inicial, foi possível o desenvolvimento de um protótipo da ferramenta de agulhamento e realizar testes tanto em corpo de prova feito com gelatina quanto em corpo feito com tecido suíno, numa tentativa de aproximar os testes dos diferentes tecidos existentes na região da pelve humana. Esses testes permitiram inferir características físicas e mecânicas do processo de agulhamento, bem como uma avaliação preliminar de variações de força em presença de diferentes tipos de tecido, importante para auxiliar na identificação dos mesmos e evitar posicionamentos de sementes em tecido adiposo, vasos e estruturas vazias.

Foram avaliadas também as variações do perfil de força em função de três diferentes ângulos de agulhamento. A necessidade de variação de ângulos é prevista quando forem realizados os posicionamentos futuros de sementes radioativas com uso de robô. Nesse sentido, concluiu-se que, para a agulha BD8 empregada, devem ser evitados agulhamentos a ângulos maiores que 45°, tanto pela geração de imprecisão de posicionamento, quanto pelo risco de acidente como a dobra da agulha, por exemplo.

Como trabalhos futuros deverão ser realizados mais testes de punção em corpo de tecido ou em fantoma, com o objetivo de avaliar a precisão de posicionamento com auxílio de um equipamento de ultrassom. Será necessário também o desenvolvimento de outra ferramenta composta por dois estágios para a realização do posicionamento das sementes. O segundo estágio terá a função de movimentação

do êmbolo de forma a proceder a deposição de uma única semente em cada posicionamento, começando pela semente mais avançada em cada punção.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG e à UFMG por tornarem possível a realização do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

- Antonelli G., Chiaverini S., Perna V., Romanelli F. (2010). A Modular and Task-oriented Architecture for Open Control System: the Evolution of C5G Open towards High Level programming. ICRA
- Balbinot, A., Brusamarello, V.J. (2011) Instrumentação e Fundamentos de Medidas, volume 2, 2ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro
- Comau Robotics (2005). Smart SiX Technical Specification, Comau Robotics Instructions Handbook
- Comau Robotics (2008). PDL2 – Programming Language Manual, System Software Rel. 2.30.xx
- Dâmaso, R.S., Campos, T.P.R. (2000). Desenvolvimento Tecnológico de um Irradiador para Braquiterapia, Dissertação de Mestrado em Ciências Técnicas Nucleares, UFMG
- Einstein, A. (2016). Braquiterapia prostática com sementes de I-125, disponível em <http://www.einstein.br/Hospital/oncologia/tratamento/radioterapia/tecnicas-e-equipamentos-disponiveis/Paginas/braquiterapia-prostatica-com-sementes-de-i-125.aspx>, acessado em 14/04/2016
- Fialho, A.B. (2012). Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamentos e Análise de Circuitos. 7ª edição, Editora Érica, São Paulo
- Oliveira, L.S. (2013). Automação da técnica de braquiterapia de alta dose por agulhamento utilizando uma mesa XY orientada por imagem radiográfica, Trabalho de Conclusão de Curso, CEFET-MG / Campus Divinópolis
- NIST, Nuclear data, (2016). URL: <http://www.nist.gov/index.html>, acessado em maio de 2016
- Rodrigues, R. (2016). Radioncologia, Radioterapia, disponível em http://ruirodrigues.net/radio2/index.php?option=com_content&view=article&id=135%3Amdo-de-aplica&catid=49%3Aabraquiterapia&Itemid=109&limitstart=2, acessado em 14/03/2016
- Spong, M.W., Hutshinson, S., Vidyasagar, M. (2005). Robot Modeling and Control, First Edition, John Wiley & Sons, Ins.

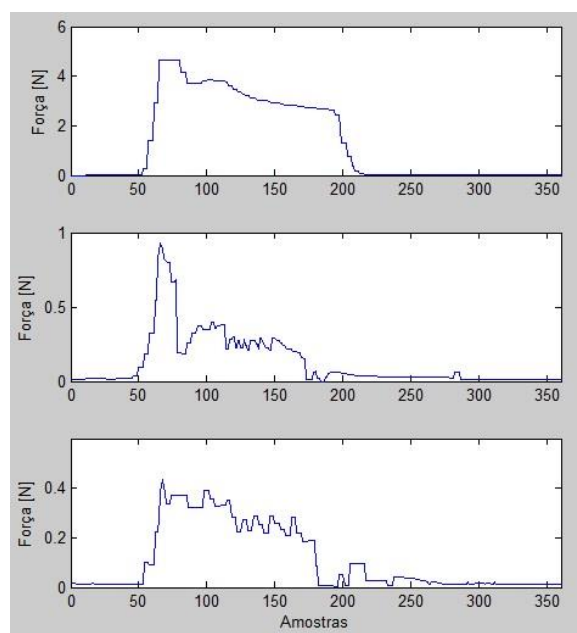


Figura 9. Perfil de força do agulhamento em corpo de tecido suíno para ângulos de penetração de 45°, 65° e 90° da agulha em relação à superfície em função do número de amostras.