



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Introdução ao Monte Carlo

“Cálculo de Doses em Braquiterapia da Próstata”

Diploma de Formação Avançada em Segurança e Protecção Radiológica

Docente:

Professor Doutor Pedro Vaz

Discentes:

Bruno Martins
João Schiappa



Março de 2009

Índice

1. Introdução	2
2. Dados da simulação.....	4
2.1 Geometria	4
2.2 Definição da Fonte	5
3. Resultados	6
3.1 Dose na Próstata	7
3.2 Dose nos Órgãos Críticos.....	8
3.2.1 Uretra	8
3.2.2 Recto	9
4. Interpretação e análise dos resultados	10
5. Referências Bibliográficas	11
6. Anexo I – Ficheiro de Input	12

1. Introdução

O adenocarcinoma da próstata é a patologia oncológica mais frequente nos indivíduos do sexo masculino. A intensificação dos exames de diagnóstico, nomeadamente o PSA (prostate specific antigen), tem detectado cada vez mais casos patológicos.

Existem algumas abordagens terapêuticas possíveis para tratamento de carcinoma primário de próstata, entre as quais se podem referir cirurgia, hormonoterapia, radioterapia externa e braquiterapia.

Na Braquiterapia – técnica de irradiação denominada de curta-distância – usam-se pequenas fontes radioactivas seladas que são colocadas directamente ou muito próximas do volume a tratar. Esta técnica tem algumas vantagens em relação a outras técnicas de irradiação, nomeadamente Radioterapia Externa Conformacional, entre as quais se pode destacar o facto de haver maior débito de dose numa zona bem localizada e bem conformada e um “fall-off” acentuado em tecidos adjacentes ao que se pretende irradiar.

A selecção das fontes é de extrema importância quando se pretende irradiar determinado alvo e são vários os critérios a ter em conta, nomeadamente, a actividade da fonte e energias das partículas emitidas (deve ser adequada ao tipo de aplicação – volume a irradiar vs tecidos adjacentes), o tempo de meia-vida e dimensões das fontes. Geralmente as fontes usadas em braquiterapia estão encapsuladas; a cápsula serve para conter a radioactividade, conferir rigidez à fonte e absorver radiação alfa e beta produzida através de decaimento da fonte.

Para efeitos de braquiterapia da próstata usa-se a técnica intersticial, em que as fontes, em forma de sementes, agulhas ou fios são colocadas de forma directa sobre o volume a irradiar. Esta técnica engloba dois passos:

- 1) Introdução de agulhas de aço-inoxidável, sem fonte, no tumor;
- 2) Introdução das sementes radioactivas nas agulhas, ou ligação das agulhas a um equipamento que controle a introdução das sementes nas agulhas.

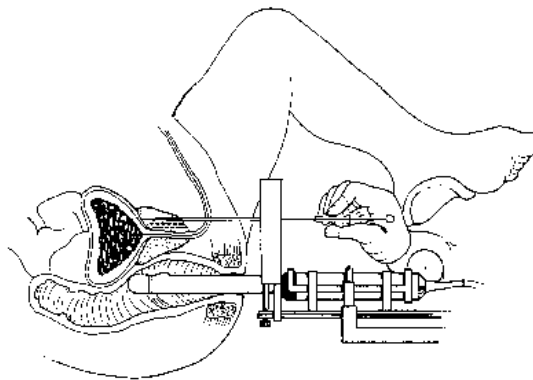


Figura 1 - Esquema simplificado da técnica

Para este trabalho estudou-se um sistema de braquiterapia intersticial permanente, com sementes de ^{125}I .

O ^{125}I é produzido quando o ^{124}Xe captura um neutrão, e decai depois via captura electrónica com uma vida média de 59.4 dias, para o primeiro estado excitado do ^{125}Te que pode sofrer conversão interna (probabilidade de 93%) ou emitir radiação gama de 35.5keV.

O volume de tratamento contempla toda a glândula prostática e uma pequena margem de tecido periprostático. A localização e a distância entre as sementes é estudada de forma a minimizar a dose na uretra, uma vez que este é um tecido sensível.

Para tratamento único com Braquiterapia, os protocolos internacionais, nomeadamente o TG-43 da *American Association of Physicists in Medicine (AAPM)* e as guidelines da *European Society for Therapeutic Radiology and Oncology (ESTRO)*, estabelecem que a isodose de 145Gy deve abranger todo o volume a tratar. Os constrangimentos de dose nos órgãos de risco envolvidos são os seguintes:

Recto: D_{2cc} tem de ser inferior a 145Gy e $D_{max}= 200$ Gy;

Uretra: D_{10} tem de ser inferior a 150% da dose prescrita e D_{30} tem de ser inferior a 130% da dose de prescrição.

2. Dados da simulação

2.1 Geometria

Para efeitos deste trabalho elaborou-se um modelo geométrico simplificado da anatomia humana, considerando que a próstata tem uma forma elipsoidal, com um volume de 45cc. A densidade utilizada ($\rho=1.05\text{g/cm}^3$) é bastante próxima da da água e foi adoptada como a densidade para tecidos biológicos. [1]

Os órgãos críticos desta técnica, uretra e recto, foram simulados como *macrobodies* cilíndricos. Simulou-se a uretra com raio de 0,2 cm e altura de 10 cm, atravessando o volume prostático, e o recto com raio de 0,4 cm e comprimento de 5 cm, fora do volume a irradiar.

Para estabelecer a geometria das sementes fez-se uma aproximação às sementes da Bard® [2] - as sementes são cápsulas de titânio soldadas, que contêm ^{125}I odo, revestido por níquel/cobre, com uma geometria semelhante à apresentada na figura 2.

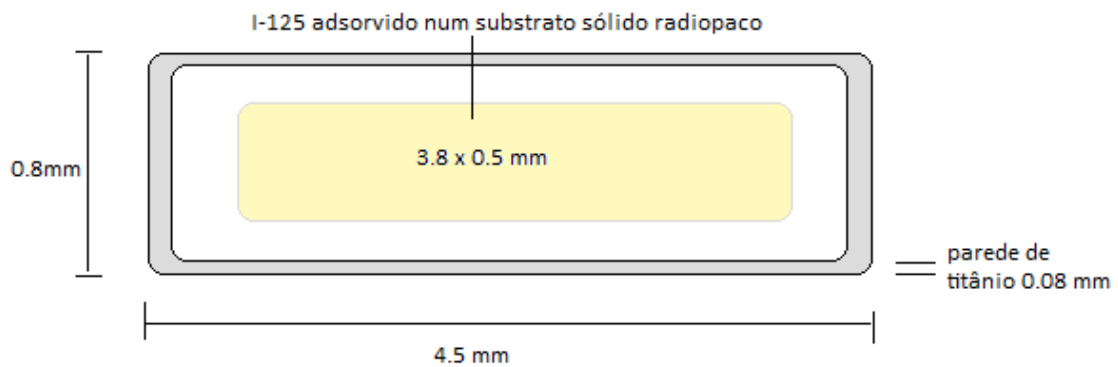


Figura 2 -Geometria aproximada de uma fonte usada para aplicações de Braquiterapia prostática.

2.2 Definição da Fonte

Foram implementadas 62 sementes (fontes) de ^{125}I com tempo de meia-vida de 59.6 dias, decaindo com emissão de fótons característicos e electrões de Auger. Os últimos são absorvidos pela parede de titânio das sementes. As principais emissões de fótons são de 27.4keV e 31keV (raios-X) e 35.5keV (raios gama). Segundo dados do fabricante, a actividade nominal aparente, para cada fonte, é de 0.492 mCi. Esta actividade aparente é um output mensurável e não a actividade real da fonte, que pode ser estimada multiplicando a actividade aparente total por um factor de 1.7.

Assim, estimou-se uma actividade total real, para as 62 fontes, sendo esta 51,9 mCi.

Pode ainda determinar-se o número de partículas emitidas por cada uma das fontes, pela equação 1 (Eq.1):

$$N = \int_0^{\infty} A_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{A_0}{\lambda} = \frac{A_0 t_{1/2}}{\ln 2}$$

Eq.1

Desta maneira, estimou-se que cada fonte emite cerca de $2,3 \times 10^{14}$ partículas em toda a sua vida.

3. Resultados

A geometria especificada anteriormente foi implementada e pode visualizar-se na Figura 3.

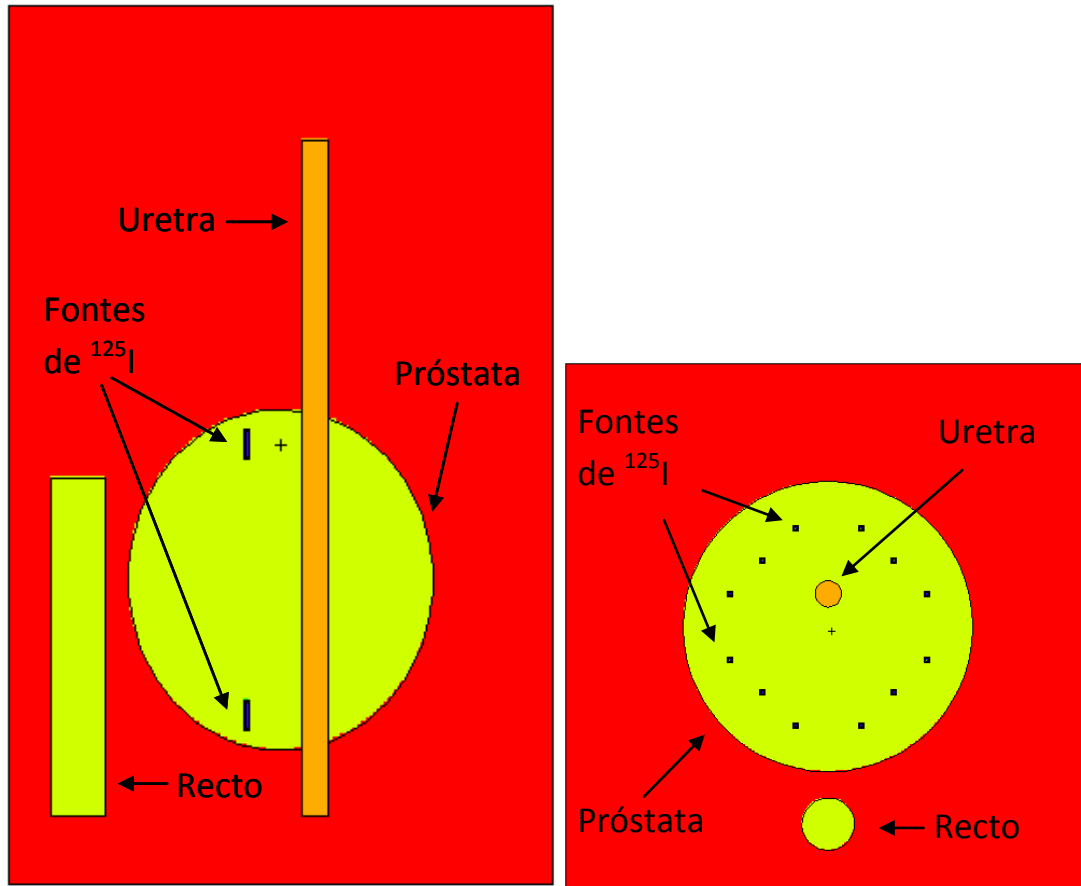


Figura 3 - Plots da geometria implementada. À esquerda, corte axial; à direita, corte sagital

A dose nas várias estruturas de interesse foi estimada com recurso à tally f6, disponível em MCNPX, após implementação da geometria e das fontes descritas. A esta tally acrescentou-se uma carta de factor multiplicativo (FM), para converter a energia depositada [MeV/g.partícula emitida pela fonte], em dose absorvida [Gy].

O FM obteve-se multiplicando o número de partículas (resultante da actividade de cada fonte) por $1,6 \times 10^{-10}$ (conversão de MeV para J) e pelo número de fontes utilizadas.

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos da simulação computacional de cerca de 6×10^7 histórias.

3.1 Dose na Próstata

Correndo o ficheiro de input obteve-se uma dose de $155,03 \pm 0,05$ Gy, para a próstata.

Constatou-se que variando a densidade dos materiais da fonte, a dose absorvida pela próstata pode variar algumas ordens de grandeza. Selecionou-se a densidade de $2,5\text{g}/\text{cm}^3$ para a liga de cobre-níquel (não há informação disponível suficientemente detalhada sobre a composição ou densidade desta parte da fonte).

Para um estudo mais detalhado da distribuição de doses nos órgãos envolvidos realizaram-se *mesh tallies* de energia absorvida (do tipo 3). Apresentam-se alguns resultados nas figuras abaixo:

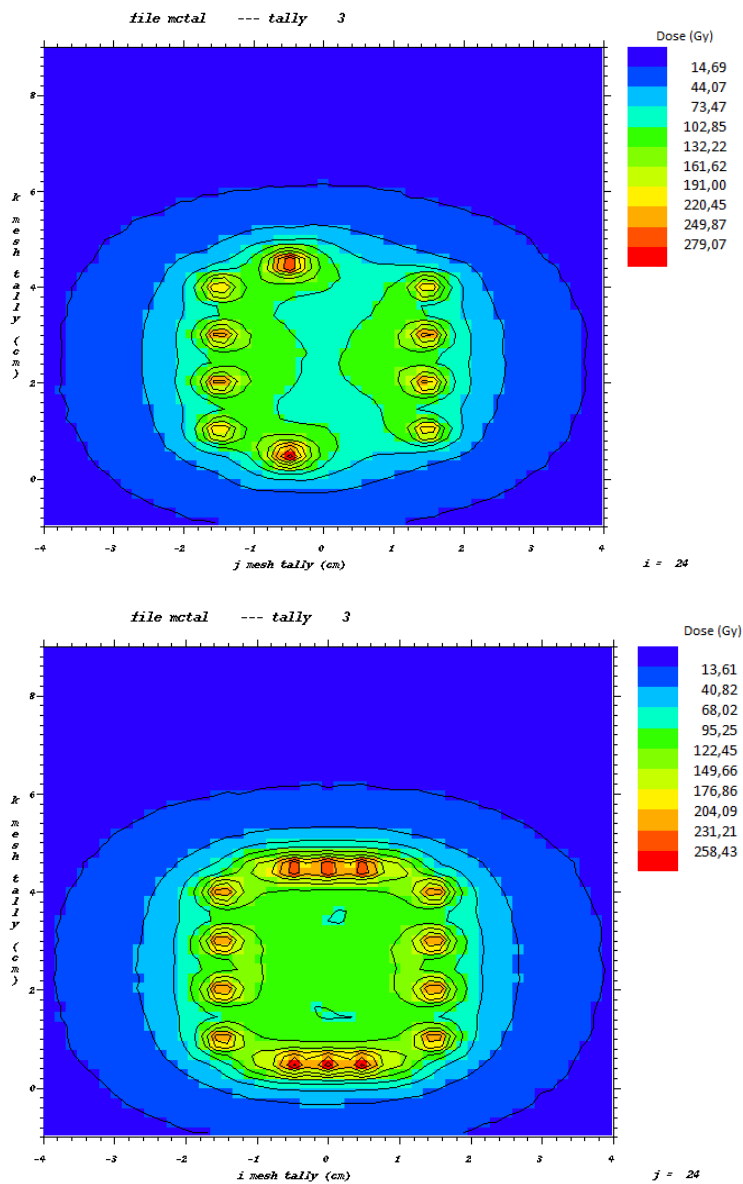


Figura 4- Distribuição de doses, em cima, num plano sagital; em baixo, num plano transversal

3.2 Dose nos Órgãos Críticos

Nesta parte do trabalho pretende-se inferir quanto à dose recebida pelos órgãos de risco envolvidos nesta planimetria.

3.2.1 Uretra

Para além do estudo de dose na próstata investigou-se as doses que chegariam aos órgãos de risco envolvidos (recto e uretra). Com recurso à *tally* F6 e à carta FM determinou-se a dose depositada na uretra e obteve-se uma dose de $53,00 \pm 0,07$ Gy.

Recorrendo à *mesh tally* 3 rectangular foi possível determinar as doses máximas recebidas por determinadas percentagens de volume da uretra, analisando o ficheiro de output *mctal*.

Os constrangimentos impostos pelo protocolo internacional da ESTRO [3] foram estudados para este caso e obtiveram-se os seguintes resultados: a dose máxima em 10% do volume de uretra, denominado por D_{10} , determinado é $95,8 \pm 1,1$ Gy e a dose máxima em 30% do volume, D_{30} , é $102,4 \pm 1,1$ Gy.

O resultado da *mesh tally* 3 sobre a geometria do sistema é semelhante ao que se apresenta na Figura 5. Constata-se que a uretra recebe doses mais elevadas na porção mais próxima das fontes (como esperado) e a dose máxima é na ordem dos 104Gy.

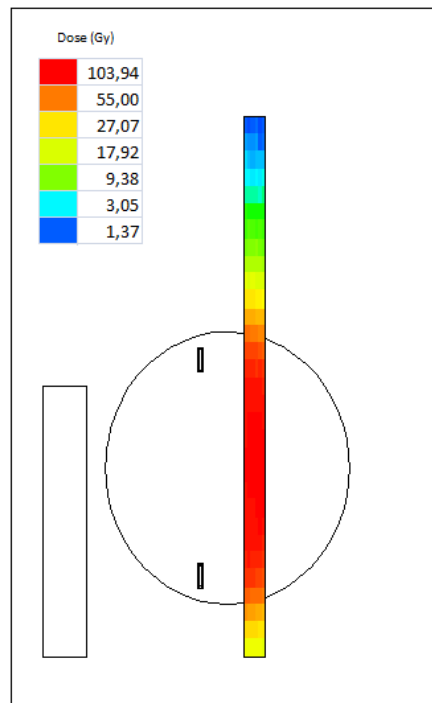


Figura 5 - Plot da mesh tally 3 sobre o volume definido como uretra

3.2.2 Recto

Realizou-se uma análise semelhante para o recto e obteve-se uma dose média de $23,52 \pm 0,24$ Gy.

Ao implementar uma *mesh tally* 3 rectangular pode inferir-se quanto aos valores de dose que chegam a determinadas percentagens de volume. Também neste caso se estudaram os constrangimentos estabelecidos pelo protocolo internacional da ESTRO. Os resultados foram os seguintes: a dose máxima no volume de recto, denominado por D_{max} , determinado é $43,14 \pm 0,06$ Gy e a dose máxima recebida por 2cc do volume é $26,09 \pm 0,48$ Gy.

O resultado da *mesh tally* aplicada sobre a estrutura definida como recto é a que se apresenta na

Figura 6. Constata-se que as doses mais elevadas se encontram junto do volume definido como próstata (e das fontes presentes nela), sendo no máximo, da ordem de 43Gy.

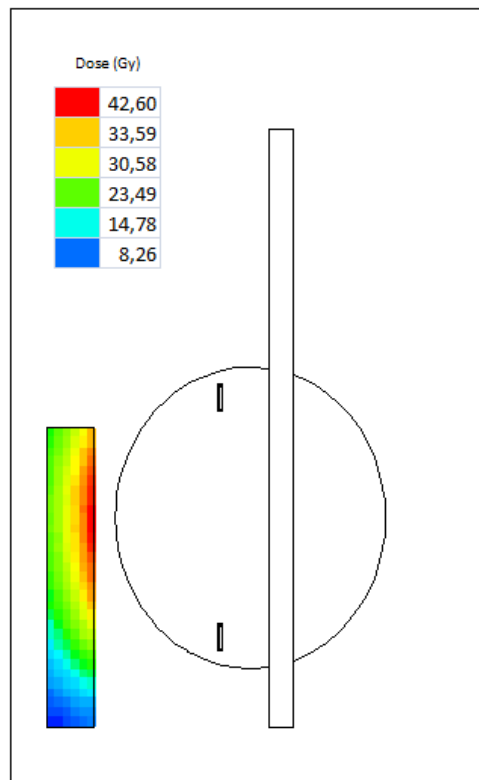


Figura 6 - Plot da *mesh tally* 3 sobre o volume desenhado como recto.

4. Interpretação e análise dos resultados

Nesta secção procede-se à análise e interpretação dos resultados obtidos através das simulações e apresentados no capítulo 3.

Com esta simulação conseguiu implementar-se um tratamento de braquiterapia, com uma dose de 155Gy na próstata. Por se ter adoptado uma geometria em forma de elipsoide para este órgão, não é possível fazer uma *mesh tally* justa ao volume para saber as doses mais baixas com que este é irradiado. Pode, no entanto, estudar-se as distribuições de dose (resultantes da simulação da *mesh tally 3* rectangular) em vários cortes e averiguar quais as doses mais baixas que a próstata está exposta. Constatou-se que em zonas periféricas do volume da próstata estavam sub-expostas, ou seja inferior a 145 Gy (doses da ordem dos 65 Gy).

Considerando que se pretendia que todo o volume delimitado como próstata estivesse incluído pela isodose mínima prescrita (145Gy), os resultados estão abaixo do esperado. Esta evidência pode ter várias causas, nomeadamente:

- a fonte de ^{125}I não está devidamente implementada uma vez que este isótopo não se encontra disponível nas bibliotecas de MCNPX e este foi definido recorrendo a outros isótopos de iodo disponíveis nestas bibliotecas (as secções eficazes deste podem não ser semelhantes à da fonte em consideração);
- a densidade da liga de cobre e níquel é desconhecida, tendo sido adoptado um valor que se considerou razoável;

Analisando os resultados obtidos através das *mesh tallies 3* para o recto e a uretra estimaram-se os seus valores médios e inferiu-se que são inferiores aos limites definidos pelos protocolos internacionais [3]. Para determinar estas doses (que se tratam de histogramas de dose/volume) usaram-se *mesh tallies* rectangulares. Para estas dever-se-ia ter aplicado uma *mesh tally* cilíndrica, ajustada aos volumes cilíndricos, no entanto, houve algumas dificuldades na sua implementação. Assim, interpretam-se os resultados destas *mesh tallies* rectangulares como sendo os volumes de recto e uretra, determinando um valor por excesso do valor real simulado, por conter volume do qual estes órgãos não fazem parte.

No que diz respeito à simulação em si, considera-se que os resultados foram satisfatórios uma vez que as incertezas são relativamente baixas para os vários resultados apresentados, pelo que se considera que o número de histórias usadas simuladas foi suficiente para a complexidade do problema (bons resultados estatísticos).

5. Referências Bibliográficas

[1] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab2.html>

[2] BrachySource® Seed Implants in Cartridges, modelo #: STM125 – informações do fornecedor

[3] – Salembier C., et al; Tumour and target volumes in permanent prostate brachytherapy: a supplement to the ESTRO/EAU/EORTC recommendations on prostate brachytherapy; Radiotherapy and Oncology (2007).

6. Anexo I – Ficheiro de Input

```

Título: braqui
c cell cards
1 1 -5.675e-1 -1 u=1 imp:p=1 $iodeto de prata
2 2 -4.54 -3 2 u=1 imp:p=1 $capsula titanium
3 3 -2.5 1 -2 u=1 imp:p=1 $material que envolve a fonte
9 4 -1.04 3 u=1 imp:p=1
10 0 -8 fill=1 imp:p=1
11 like 10 but *trcl=(0 -1 0) imp:p=1
12 like 10 but *trcl=(0.5 0.5 0) imp:p=1
13 like 10 but *trcl=(0.5 -1.5 0) imp:p=1
14 like 10 but *trcl=(1 1 0) imp:p=1
15 like 10 but *trcl=(1 -2 0) imp:p=1
16 like 10 but *trcl=(2 1 0) imp:p=1
17 like 10 but *trcl=(2 -2 0) imp:p=1
18 like 10 but *trcl=(2.5 0.5 0) imp:p=1
19 like 10 but *trcl=(2.5 -1.5 0) imp:p=1
20 like 10 but *trcl=(3 0 0) imp:p=1
21 like 10 but *trcl=(3 -1 0) imp:p=1
22 like 10 but *trcl=(0.5 -0.5 -1.5) imp:p=1
23 like 10 but *trcl=(1 -1 -1.5) imp:p=1
24 like 10 but *trcl=(1.5 -1 -1.5) imp:p=1
25 like 10 but *trcl=(2 -1 -1.5) imp:p=1
26 like 10 but *trcl=(2.5 -0.5 -1.5) imp:p=1
27 like 10 but *trcl=(0 0 -1) imp:p=1
28 like 10 but *trcl=(0 -1 -1) imp:p=1
29 like 10 but *trcl=(0.5 0.5 -1) imp:p=1
30 like 10 but *trcl=(0.5 -1.5 -1) imp:p=1
31 like 10 but *trcl=(1 1 -1) imp:p=1
32 like 10 but *trcl=(1 -2 -1) imp:p=1
33 like 10 but *trcl=(2 1 -1) imp:p=1
34 like 10 but *trcl=(2 -2 -1) imp:p=1
35 like 10 but *trcl=(2.5 0.5 -1) imp:p=1
36 like 10 but *trcl=(2.5 -1.5 -1) imp:p=1
37 like 10 but *trcl=(3 0 -1) imp:p=1
38 like 10 but *trcl=(3 -1 -1) imp:p=1
39 like 10 but *trcl=(0 0 1) imp:p=1
40 like 10 but *trcl=(0 -1 1) imp:p=1
41 like 10 but *trcl=(0.5 0.5 1) imp:p=1
42 like 10 but *trcl=(0.5 -1.5 1) imp:p=1
43 like 10 but *trcl=(1 1 1) imp:p=1
44 like 10 but *trcl=(1 -2 1) imp:p=1
45 like 10 but *trcl=(2 1 1) imp:p=1
46 like 10 but *trcl=(2 -2 1) imp:p=1
47 like 10 but *trcl=(2.5 0.5 1) imp:p=1
48 like 10 but *trcl=(2.5 -1.5 1) imp:p=1
49 like 10 but *trcl=(3 0 1) imp:p=1
50 like 10 but *trcl=(3 -1 1) imp:p=1
51 like 10 but *trcl=(0 0 2) imp:p=1
52 like 10 but *trcl=(0 -1 2) imp:p=1
53 like 10 but *trcl=(0.5 0.5 2) imp:p=1
54 like 10 but *trcl=(0.5 -1.5 2) imp:p=1
55 like 10 but *trcl=(1 1 2) imp:p=1
56 like 10 but *trcl=(1 -2 2) imp:p=1
57 like 10 but *trcl=(2 1 2) imp:p=1
58 like 10 but *trcl=(2 -2 2) imp:p=1
59 like 10 but *trcl=(2.5 0.5 2) imp:p=1
60 like 10 but *trcl=(2.5 -1.5 2) imp:p=1

```

```

61 like 10 but *trcl=(3 0 2) imp:p=1
62 like 10 but *trcl=(3 -1 2) imp:p=1
63 like 10 but *trcl=(0.5 -0.5 2.5) imp:p=1
64 like 10 but *trcl=(1 -1 2.5) imp:p=1
65 like 10 but *trcl=(1.5 -1 2.5) imp:p=1
66 like 10 but *trcl=(2 -1 2.5) imp:p=1
67 like 10 but *trcl=(2.5 -0.5 2.5) imp:p=1
68 like 10 but *trcl=(0.5 0.5 0.5) imp:p=1
69 like 10 but *trcl=(0.5 -1.5 0.5) imp:p=1
70 like 10 but *trcl=(2.5 0.5 0.5) imp:p=1
71 like 10 but *trcl=(2.5 -1.5 0.5) imp:p=1
c
4 4 -1.04 -4 5 3 8 #11 #12 #13 #14 #15 #16 #17 #18 #19 #20 #21 #22
    #23 #24 #25 #26 #27 #28 #29 #30 #31 #32 #33 #34 #35 #36 #37
    #38 #39 #40 #41 #42 #43 #44 #45 #46 #47 #48 #49 #50 #51 #52
    #53 #54 #55 #56 #57 #58 #59 #60 #61 #62 #63 #64 #65 #66 #67
    #68 #69 #70 #71 imp:p=1 $prostata
5 5 -1.05 -5 imp:p=1 $uretra
6 4 -1.06 -6 imp:p=1 $recto
7 6 -1.05 -7 4 5 6 imp:p=1 $tecido
8 0 7 imp:p=0

c surface cards
1 rcc -1.5 0.5 1.810 0 0 0.38 0.025 $superfice do iodo
2 rcc -1.5 0.5 1.783 0 0 0.434 0.036 $superficie interna titanium
3 rcc -1.5 0.5 1.775 0 0 0.45 0.04 $superfice externa titanium
4 ELL 0 0 2.5 0 0 2.52 -2.25 $prostata
5 rcc 0 0.5 -1 0 0 10 .20 $uretra
6 rcc 0 -3.0 -1 0 0 5 .40 $recto
7 rpp -4 4 -4 4 -2 11
c 7 rpp -12 12 -15 15 -5 30
8 rpp -1.541 -1.459 0.459 0.541 1.774 2.226 $caixa universo

c data cards
mode p
m1 53000 1 47000 1 $iodo 4,93
m2 22048 1 $titanium 4,54
m3 28000 1 29000 1 $niquel+cobre
m4 1001 -0.102 $recto
    6012 -0.143
    7014 -0.034
    8016 -0.708
    11023 -0.002
    15000 -0.003
    16000 -0.003
    17000 -0.002
    19000 -0.003
m5 1001 -0.102 $uretra
    6012 -0.143
    7014 -0.034
    8016 -0.71
    11023 -0.001
    15000 -0.002
    16000 -0.003
    17000 -0.001
    19000 -0.004
m6 1001 -0.105 $prostata
    6012 -0.093
    7014 -0.024
    8016 -0.768
    11023 -0.002

```

```

15000 -0.002
16000 -0.002
17000 -0.002
19000 -0.002
sdef erg=d1 par=2 rad=d2 ext=d3 pos=d4 axs=0 0 1
si1 1 0.003335 0.003306 0.003759 0.003769 0.004030 0.004069 0.004121
0.004173
    0.004302 0.004572 0.004829 0.026875 0.027202 0.027472 0.030944
0.030995
    0.031237 0.031704 0.031774 0.035492
sp1 d 0.00230 0.00112 0.00630 0.056 0.035 0.0042 0.007 0.00043 0.0101
0.0045
    0.00263 0.000032 0.406 0.757 0.0683 0.0132 0.00121 0.03811
0.0058 0.0668
si2 0.0245 0.025
sp2 -21 1
si3 -.19 0.19
sp3 -21 0
si4 1 -1.5 0.5 2
    -1.5 -0.5 2
    -1 1 2
    -1 -1 2
    -0.5 1.5 2
    -0.5 -1.5 2
    0.5 1.5 2
    0.5 -1.5 2
    1 1 2
    1 -1 2
    1.5 0.5 2
    1.5 -0.5 2
    -1 0 0.5
    -0.5 -0.5 0.5
    0 -0.5 0.5
    0.5 -0.5 0.5
    1 0 0.5
    -1.5 0.5 1
    -1.5 -0.5 1
    -1 1 1
    -1 -1 1
    -0.5 1.5 1
    -0.5 -1.5 1
    0.5 1.5 1
    0.5 -1.5 1
    1 1 1
    1 -1 1
    1.5 0.5 1
    1.5 -0.5 1
    -1.5 0.5 3
    -1.5 -0.5 3
    -1 1 3
    -1 -1 3
    -0.5 1.5 3
    -0.5 -1.5 3
    0.5 1.5 3
    0.5 -1.5 3
    1 1 3
    1 -1 3
    1.5 0.5 3
    1.5 -0.5 3
    -1.5 0.5 4
    -1.5 -0.5 4

```

