

RECOBRIMENTOS DE CARBONO AMORFO EM PARAFUSOS DE TITÂNIO
PARA CONEXÕES PROTÉTICAS

Tatiana Neves Dourado Teixeira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Sérgio de Souza Camargo Júnior, D Sc.

Prof. Luiz Carlos Pereira, D Sc.

Prof. Sylvio Jose Ribeiro de Oliveira, D Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2005

TEIXEIRA, TATIANA NEVES DOURADO

Recobrimentos de Carbono Amorfo em Parafusos de Titânio para Conexões Protéticas

[Rio de Janeiro] 2005

VIII, 83p., 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2005)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Parafusos para Conexões Protéticas
2. Pré-carga
3. Torque
4. Recobrimento de Carbono Amorfo

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Há pessoas que passam a vida inteira a procura de um alguém especial...
Um alguém que entenda nossas angústias apenas pelo nosso olhar
Que perceba nossas aflições só de ouvir o tom de nossa voz
Que saiba compartilhar os momentos felizes, ficando feliz também
Que saiba nos levantar quando achamos que o chão é o melhor lugar para ficarmos
Que nos faça sentir a mulher mais linda do mundo, mesmo ao acordar
Que nos convença de que vale a pena continuar, mesmo quando a pior injustiça do mundo acontece conosco.

Dedico essa Tese de Mestrado ao meu marido Henrique Dourado; esse Alguém em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar comigo sempre.

Ao Prof. Sérgio Camargo que faz jus ao título de Professor, sabendo valorizar as características positivas de seus alunos, entendendo as dificuldades e dando total apoio para os seus orientados. Obrigada de verdade!

Aos meus pais, José Carlos e Terezinha, meu equilíbrio de vida.

À minha irmã Mírian e ao meu cunhado Maurício, amigos de todas horas.

Ao meu afilhado Matheus, que me traz alegria mesmo antes de chegar.

Aos meus sogros, Antônio e Eliane, tão presentes em meu caminho.

À vó Lalá, tão querida.

Aos meus cunhados, Maurício e Débora, também amigos de todas as horas.

Ao tio Luiz, tio Chico, tia Vanda, Juliana, Rubinho, Mariana, tia Helen, tio Nilton, tia Leila, Mariana Autran e Renato por serem a minha família tão amada.

Ao Professor Lula por ter cedido seu laboratório todas as vezes em que precisei.

Ao Professor Sylvio que tão pacientemente me fez entender um pouco da tão complexa Engenharia Mecânica.

Aos técnicos Jackson, Laércio e Júlio que me deram todo o apoio necessário para a realização da parte prática desta Tese.

Aos amigos da COPPE, Michelle, Vânia, Marta, Andréia, Flávia, Fabiana, Leonardo, Celso, Eduardo e Paulo.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica da COPPE em especial Adriana, Márcia e Felipe.

A todos os professores da COPPE que tão brilhantemente estão ensinando engenharia a profissionais de outras áreas. Em especial ao Professor Luis Henrique e Bastian que nos convencem de que vale a pena estudar com afinco a Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

À Neodent Implante Osteointegrável que doou o material necessário para realização dos testes. Em especial ao engenheiro mecânico Alexsander que me apoiou e me incentivou durante a realização de todos os ensaios.

Aos Professores de estatística da ENCE, Sandra Cardoso e Cássio, que me ajudaram a fazer a estatística desse trabalho.

Às amigas Fernanda Paiva e Adriana Braga por entenderem minhas ausências, mas me perdoarem pelo simples fato de sermos amigas-irmãs.

Às minhas secretárias Zezé e Gláucia por me proporcionarem a Paz necessária para a realização deste trabalho, organizando minha vida profissional com brilhantismo.

Aos amigos Drix, Carlinhos, Déia e Edu que só me enriquecem com sua amizade.

Aos amigos e colegas de farda do CBMERJ que me incentivaram nessa etapa de vida tão importante, mas tão árdua.

À amiga Adriana Lucena por me dar a oportunidade de trabalhar ao seu lado, entendendo minha ausência durante a confecção deste trabalho.

À equipe de Prótese Dentária da UERJ da qual me orgulho muito de um dia já ter feito parte. Em especial aos professores Venícius Puppín, meu eterno Mestre. Aos professores David Balassiano, Ângela Vidal, William Frossard e João Duarte por serem um exemplo para mim de profissionalismo, caráter e amor a Odontologia.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

RECOBRIMENTOS DE CARBONO AMORFO EM PARAFUSOS DE TITÂNIO
PARA CONEXÕES PROTÉTICAS

Tatiana Neves Dourado Teixeira

Maio/2005

Orientador: Sérgio de Souza Camargo Júnior

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A terapia por implantes dentários, apesar de já estar consolidada, ainda apresenta algumas complicações, sendo o afrouxamento de parafusos para conexões protéticas um dos mais comuns. Nesse trabalho, parafusos de titânio para conexões protéticas foram recobertos com carbono amorfo do tipo diamante, DLC ou DLC-Si, e comparados com parafusos que não receberam recobrimento. Após terem sido submetidos a cinco torques de apertamento e afrouxamento, foi calculado o valor da pré-carga para cada amostra. Os resultados foram comparados através de uma análise estatística, demonstrando que o valor da pré-carga nos parafusos recobertos foi maior do que o alcançado nos parafusos sem recobrimento. Não houve diferença estatisticamente significativa entre o grupo recoberto com DLC e com DLC-Si. Amostras foram levadas ao MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), mostrando que não houve alteração no padrão de contato entre rosca do parafuso que recebeu recobrimento e rosca do análogo do implante.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

CARBON AMORPHOUS FILMS FOR ABUTMENT TITANIUM SCREWS

Tatiana Neves Dourado Teixeira

May/2005

Advisor: Sérgio de Souza Camargo Júnior

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Although implant therapy is a well developed technique, it has still some drawbacks such as loosening of abutment titanium screw. In this work, abutment titanium screw were coated with amorphous diamond-like carbon (DLC) or silicon incorporated DLC (DLC-Si) films and were compared with conventional uncoated screws. All screws were submitted to five torques of 32 N.cm and the preload value was calculated. Results were analysed by statistical methods and showed that DLC coated screws presented an increased preload value. No difference was observed on the preload value presented by screws coated with DLC and DLC-Si. SEM analysis of the specimens demonstrated that the threaded surfaces contact between screw and implant analogue were not modified by the coatings.

SUMÁRIO

I - INTRODUÇÃO	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
II.1 - CARACTERÍSTICAS DOS PARAFUSOS.....	4
II.2 - PRÉ-CARREGAMENTO DOS PARAFUSOS	8
II.3 - MONTAGEM – TORQUE.....	12
II.4 - RELAÇÃO ENTRE PRÉ-CARGA E TORQUE	16
II.5 - O FENÔMENO DO AFROUXAMENTO DO PARAFUSO	20
II.6 - CARBONO	25
II.7 - CARBONO AMORFO (DLC).....	26
II.8 - CONTEÚDO DE HIDROGÊNIO	28
II.9 - PROPRIEDADES MECÂNICAS	31
II.10 - INCORPORAÇÃO DE SILÍCIO (DLC-Si).....	32
II.11 - PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS.....	34
II.12 - DEPOSIÇÃO DOS FILMES DLC.....	36
III – MATERIAIS E MÉTODOS	38
IV.1 - TESTES ESTATÍSTICOS.....	55
IV.2 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	58
V – DISCUSSÃO	71
VI - CONCLUSÕES.....	75
VII -TRABALHOS FUTUROS.....	76
VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

I - Introdução

No início dos anos 60, o médico sueco Branemark e sua equipe resolveram estudar as relações funcionais entre a medula óssea e os tecidos ósseos durante a regeneração dos defeitos traumaticamente induzidos.

Para tal, fabricaram uma câmara ótica metálica e a implantaram na tíbia de um coelho. Porém, quando os pesquisadores tentaram remover tal câmara ótica para obter os resultados, esta havia se incorporado ao osso, estando o tecido ósseo intimamente aderido às minúsculas irregularidades de titânio.

A partir daí várias experiências foram desenvolvidas, culminando no desenvolvimento de um implante de titânio puro em forma de parafuso. Esses foram colocados nas mandíbulas de cães mestiços e foram confeccionadas próteses parciais fixas, que permitissem a função mastigatória por volta de dez anos. Passado esse tempo, foi observado que não havia perda óssea ao redor do implante.

Desde então os implantes osseointegráveis vêm sendo exaustivamente estudados e no atual momento a técnica já está consagrada. Segundo HENRY *et al.* (1996) em um estudo de 5 anos obteve-se uma taxa de sucesso de 96,6% na maxila e de 100% na mandíbula de pacientes que receberam implantes unitários.

Vários protocolos para a colocação e restauração com implantes têm sido publicados com objetivo de fazer com que o clínico alcance um bom resultado (TAYLOR, 1998). Primeiramente o implante deve ser colocado de forma que as forças oclusais estejam direcionadas no seu longo eixo. Segundo, as próteses em balanço (que são extensões protéticas sem apoio de dente ou implante) devem ser de menor tamanho possível para diminuir a alavanca. Terceiro, os contatos oclusais devem ser balanceados e de preferência cúspide-fossa. Quarto, deve ser usado parafuso de ouro com o torque máximo recomendado. E além disso, dispositivos antirotacionais devem ser usados para segurar a coroa ao implante (MC GLUMPHY, 1994).

Embora sendo a taxa de sucesso dos implantes dentários elevada, ainda persistem alguns problemas protéticos, sendo o mais comum o afrouxamento seguido ou não de fratura dos parafusos de conexão protética, também chamados de parafusos de “abutment” (MARTIN *et al.*, 2001, ZARB e SCHMITT, 1990).

Segundo LEE *et al.* (2002), as taxas de afrouxamento variam de 4,5% a 30,7% dependendo do tempo transcorrido entre o torque inicialmente dado até a consulta de

manutenção da prótese. Mas há trabalhos que demonstram uma taxa de até 48% de afrouxamento dos parafusos (SONIS, 1989, WALTON e MACENTEE, 1997).

Mediante a freqüente ocorrência desse desagradável fenômeno de afrouxamento, o que acarreta um tempo clínico gasto para seu reparo e também um custo adicional para o profissional e muitas vezes para o paciente, muitos esforços têm sido feitos na tentativa de minimizar e se possível eliminar esse inconveniente (CAVAZOS e BELL, 1996).

O objetivo maior de se dar o torque no conjunto – conexão protética, parafuso e implante – é atingir uma pré-carga máxima e assim oferecer um razoável grau de proteção contra o afrouxamento (BURGUETE *et al.*, 1994). A pré-carga é aplicada no parafuso quando o torque é dado durante o apertamento, sendo ela que mantém os componentes unidos (HAACK *et al.*, 1995). Assim, quanto maior for o torque aplicado, maior é a pré-carga alcançada e menor a chance de o parafuso afrouxar.

SAKAGUCHI E BORGERSEN (1995) reportaram que a pré-carga alcançada nos componentes é dependente do acabamento entre as interfaces, o atrito entre os componentes, a geometria e as propriedades do material.

BURGUETE *et al.* (1994) afirmam que o coeficiente de atrito é a variável mais importante. O coeficiente de atrito é dependente da dureza das roscas, do acabamento das superfícies, da quantidade e propriedades do lubrificante e da velocidade do apertamento.

Sendo o coeficiente de atrito uma variável importante na determinação da pré-carga, MARTIN *et al* (2001) compararam 4 diferentes materiais e superfícies de parafusos de “abutment”: de titânio com e sem superfície tratada (recobrimento com carbono amorfo), ouro com e sem superfície tratada (camada de ouro puro). Como resultado obtiveram uma maior pré-carga alcançada nos parafusos com recobrimento de superfície, já que o tratamento diminuiu o coeficiente de atrito.

Apesar de muitos trabalhos mostrarem a superioridade dos parafusos de ouro (SCHELLER *et al.*, 1998) quando comparados ao de titânio, o custo daquele material eleva o custo final do trabalho, incentivando cada vez mais a pesquisa para melhorar as características do parafuso de titânio.

Colaborando com o objetivo acima descrito, muito progresso tem sido feito nas pesquisas sobre o carbono amorfo mais especificamente o DLC (diamond like carbon ou carbono tipo diamante). Desde 1971, os filmes DLC têm sido estudados e a maturidade vem sendo alcançada com a compreensão dos mecanismos de crescimento do filme, as propriedades do material e seu uso na indústria (GRILL, 1998).

Dentre suas características, a de maior interesse para a utilização deste como recobrimento para os parafusos de “abutment” de titânio é seu baixo coeficiente de atrito (MATTEWS e ESKILDREN, 1994, GRILL, 1998, LIFSHITZ, 1998). Isso porque quanto mais baixo o atrito (dentro de um certo limite), mais alta é a pré-carga obtida, logo menor será a chance de haver insucesso com o parafuso (HAACK e SAKAGUCHI, 1995).

Por outro lado, dentre as desvantagens dos filmes DLC está sua elevada tensão interna o que leva a pequena aderência a determinados substratos, restringindo sua espessura. Porém, segundo DAMASCENO *et al.* (2000), uma melhora nesse sentido pode ser obtida por meio da incorporação de átomos de silício que substituirão átomos de carbono na estrutura do filme DLC.

Ao longo do trabalho serão discutidos alguns conceitos de engenharia mecânica para que seja entendido o funcionamento das próteses sobre implante que são consideradas como juntas aparafusadas.

Serão comparadas as pré-cargas alcançadas com parafusos de titânio sem recobrimento, com recobrimento de DLC e DLC-Si. Também será verificada a necessidade de utilizar, na instalação do trabalho definitivo, parafusos novos ou que já tenham recebido torques prévios.

Análises em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) serão feitas não só nos parafusos recobertos mas também nos corpos de prova (análogo do implante, conexão protética e parafuso) em seção transversal avaliando assim se a presença do recobrimento alterou o padrão do contato entre rosca do análogo e rosca do parafuso.

II - Revisão Bibliográfica

II.1 - Características dos parafusos

Na Engenharia Mecânica os parafusos são considerados como um elemento de união de peças. Apesar do amplo uso deste dispositivo em várias áreas, inclusive na odontologia, o entendimento de seu funcionamento não é simples, porém é de suma importância para que o parafuso desempenhe sua função.

O parafuso pode ser dividido em 2 partes: cabeça e corpo. O corpo pode apresentar uma parte lisa (pescoço) ou ser totalmente rosqueado. A figura 1 (SHIGLEY, 1983) representa a terminologia de rosca, onde passo é a distância entre pontos correspondentes de filetes adjacentes, medida paralelamente ao eixo da rosca. Diâmetro maior ou nominal d é o maior diâmetro da parte rosçada, diâmetro menor ou de raiz d_r é o menor diâmetro da parte rosçada e diâmetro médio d_m é a média dos diâmetros maior e menor.

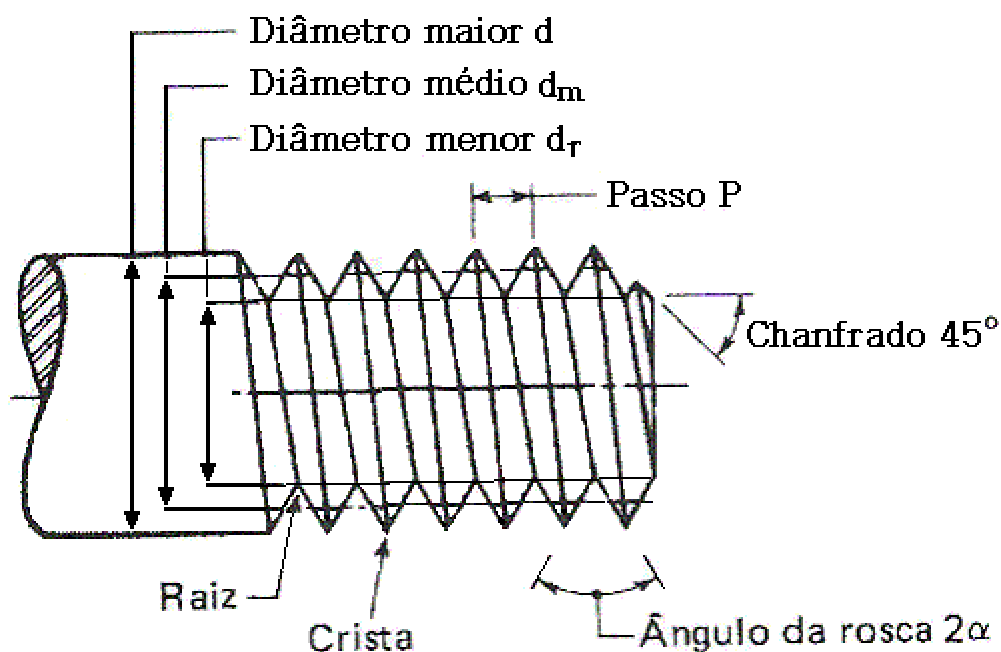


Figura 1 – Terminologia de filete de rosca (SHIGLEY, 1983).

A figura 2 (SHIGLEY, 1983) mostra a geometria da rosca para os três padrões de uso mais geral.

Figura 2 – Geometria de roscas de parafusos: a) Rosca Nacional Americana ou Rosca Unificada; b) rosca quadrada; c) rosca Acme (SHIGLEY, 1983).

Em relação a forma da cabeça do parafuso existem algumas variações conforme mostra a figura 3 (SHIGLEY, 1983).

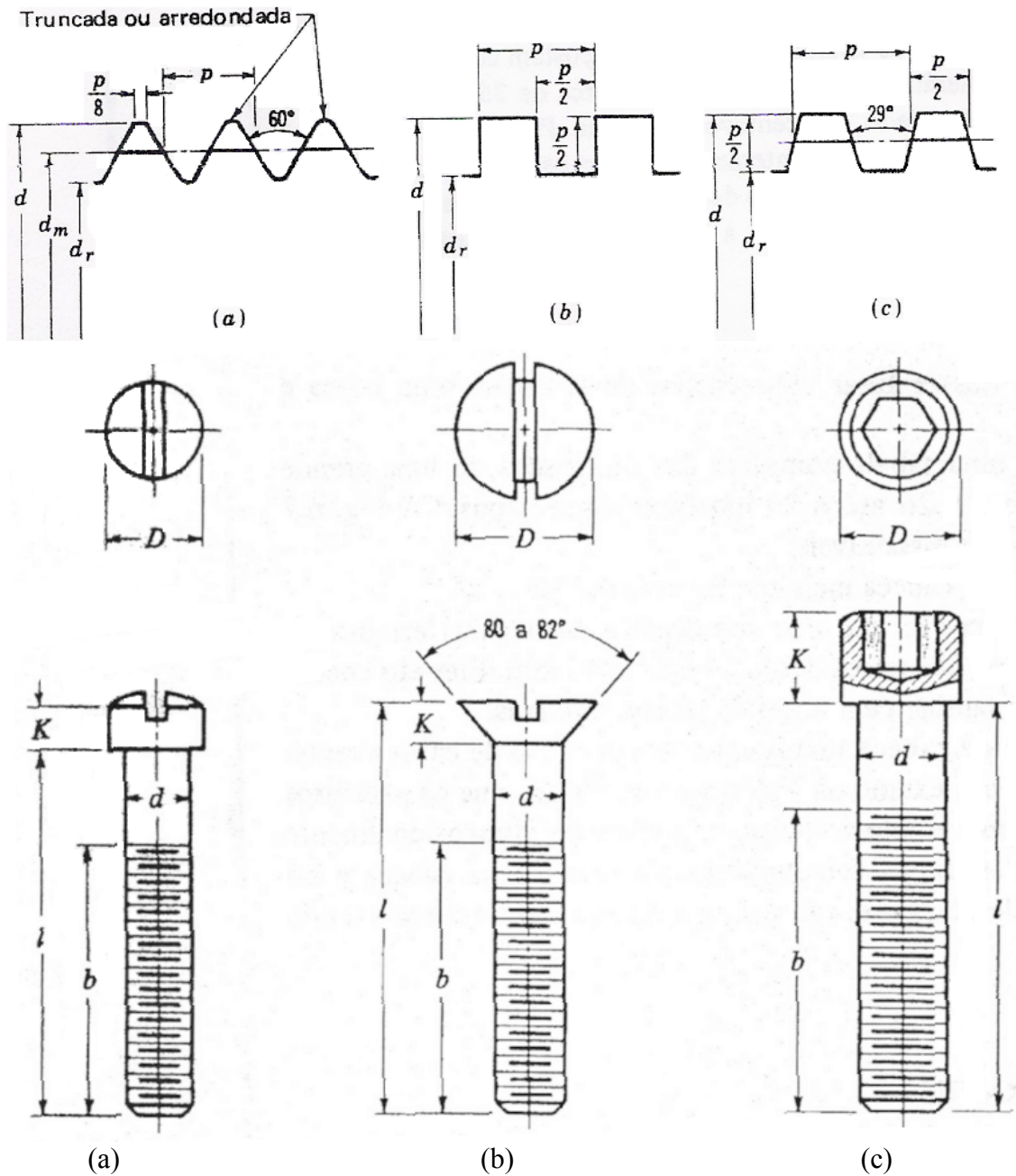


Figura 3 – Diferentes formas da cabeça do parafuso: a – cabeça cilíndrica arredondada com fenda; b – cabeça escareada com fenda; c – cabeça cilíndrica com sextavado interno (SHIGLEY, 1983).

Após várias pesquisas, os fabricantes definiram a geometria ideal que os parafusos para conexões protéticas devem seguir. Sendo assim, devem possuir cabeça plana, um corpo liso longo (pescoço) antes dos filetes que geralmente são em número de 6 (figura 4). O aumento no comprimento da parte lisa tem por objetivo alcançar um ótimo alongamento durante o torque e a redução no número de filetes diminui o atrito (BICKFORD, 1995).

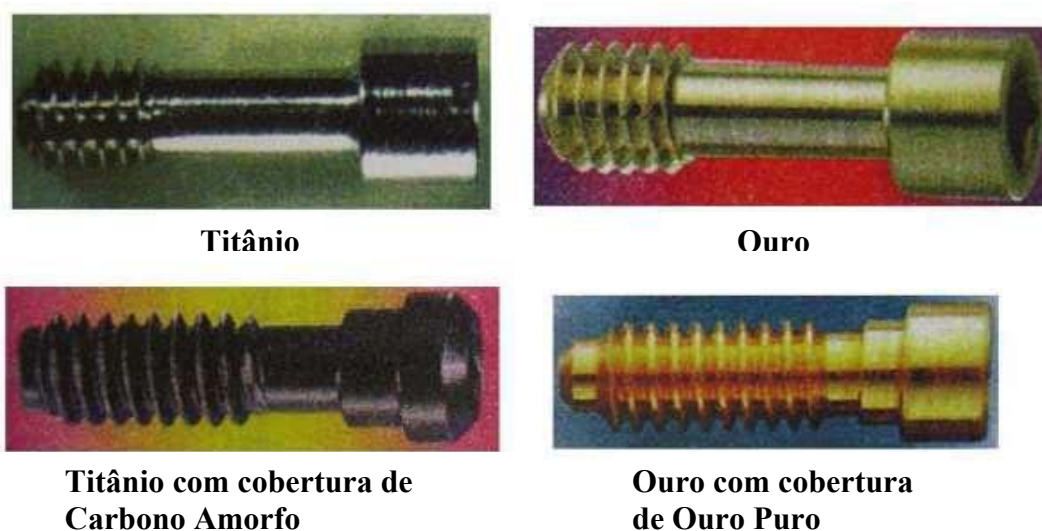


Figura 4 – Aspecto de parafusos para abutment, tanto de titânio quanto de ouro, com e sem superfície tratada (BINON, 2000).

JÖRNÉUS *et al.* (1992) compararam em seu trabalho parafusos de cabeça chata e de cabeça cônica em relação ao seu comportamento clínico quando próteses unitárias eram submetidas aos esforços mastigatórios. Os primeiros apresentaram melhores resultados já que mostraram um menor índice de afrouxamento durante os testes.

Segundo BICKFORD (1995), o fato de a rosca interna do implante e a rosca do parafuso serem do mesmo metal - titânio – faz com que possa haver um tipo de adesão das superfícies durante o carregamento do conjunto. Isso pode acontecer quando a camada mais externa de óxidos formada é removida durante o deslizamento das superfícies em contato, havendo uma reação química e conseqüente adesão de tais partes. BASTEN *et al.*, (1996) afirmam que o coeficiente de atrito entre duas superfícies de titânio comercialmente puro pode ser tão elevado que uma deformação nas superfícies contactantes pode ocorrer.

Nesse sentido, alguns autores (BINON, 2000, HENRY *et al.*, 1996, SCHELLER *et al.*, 1998) afirmam que a utilização de parafusos de ouro é mais segura já que estes apresentam um menor coeficiente de atrito, podendo ser apertados de forma mais efetiva, proporcionando assim uma mais alta pré-carga. Além disso, estando em contato dois materiais diferentes (ouro do parafuso e titânio do implante) não ocorrerá a adesão das superfícies em contato.

Porém, o ouro é um metal nobre de custo bem mais elevado quando comparado ao titânio. Sendo assim, a indústria vem tentando melhorar as características deste metal, de forma a expandir seu uso como material para a confecção de parafuso de abutment.

Assim, a empresa Nobel Biocare® lançou no mercado o produto denominado Torq Tite que é um parafuso de titânio recoberto por um lubrificante sólido ou mais especificamente por DLC. Segundo BINON (2000), esse recobrimento reduz o coeficiente de atrito em até 60%. As informações indicam um aumento efetivo na pré-carga alcançada neste tipo de parafuso.

Embora cálculos indiquem um aumento nos valores de pré-carga admissíveis, os testes de medição de pré-carga com e sem superfície lubrificada, indicaram que pode não haver diferença estatisticamente significativa. Um outro ponto diz respeito ao desgaste desse recobrimento após sucessivos apertamentos e afrouxamentos (BINON, 2002). Essas questões ainda não esclarecidas incentivam mais pesquisas nessa área.

Outra questão que ainda gera discussão é a utilização de parafusos novos ou usados na instalação definitiva do trabalho protético sobre implante.

TZENAKIS *et al.* (2002) concluíram em seu trabalho que mais altas pré-cargas são alcançadas quando são utilizados parafusos protéticos de ouro lubrificadas por saliva, que já receberam torques previamente (durante as provas do trabalho protético). Estes autores acreditam que os repetidos torques vão gradualmente eliminando as microrugosidades presentes nos componentes que estão sendo unidos, inclusive as do parafuso, proporcionando assim um contato mais efetivo das partes. Segundo os autores, essa diminuição do atrito no sistema permitiria um mais elevado torque, que por sua vez se transformaria em mais elevada pré-carga.

RAFEE *et al.* (2002) demonstraram em seu estudo que mesmo após 20 apertamentos e afrouxamentos de parafusos protéticos de ouro não houve alteração nas características, nem comprometimento da função desempenhada pelos parafusos.

II.2 - Pré-carregamento dos parafusos

SHIGLEY (1983) afirma que quando se deseja uma união desmontável sem empregar métodos destrutivos e que seja suficientemente resistente para suportar as cargas externas de tração e de cisalhamento ou a combinação delas, uma junta simplesmente aparafusada é uma boa solução, como mostra a figura 5. O parafuso é apertado inicialmente para produzir uma força inicial de tração F_i , após a qual são aplicadas a carga externa de tração P e a carga externa de cisalhamento F_s . O efeito de pré-carregamento é dar às partes em compressão melhor resistência à carga de tração externa e aumentar a força de atrito entre as peças, para resistirem melhor à carga de cisalhamento.

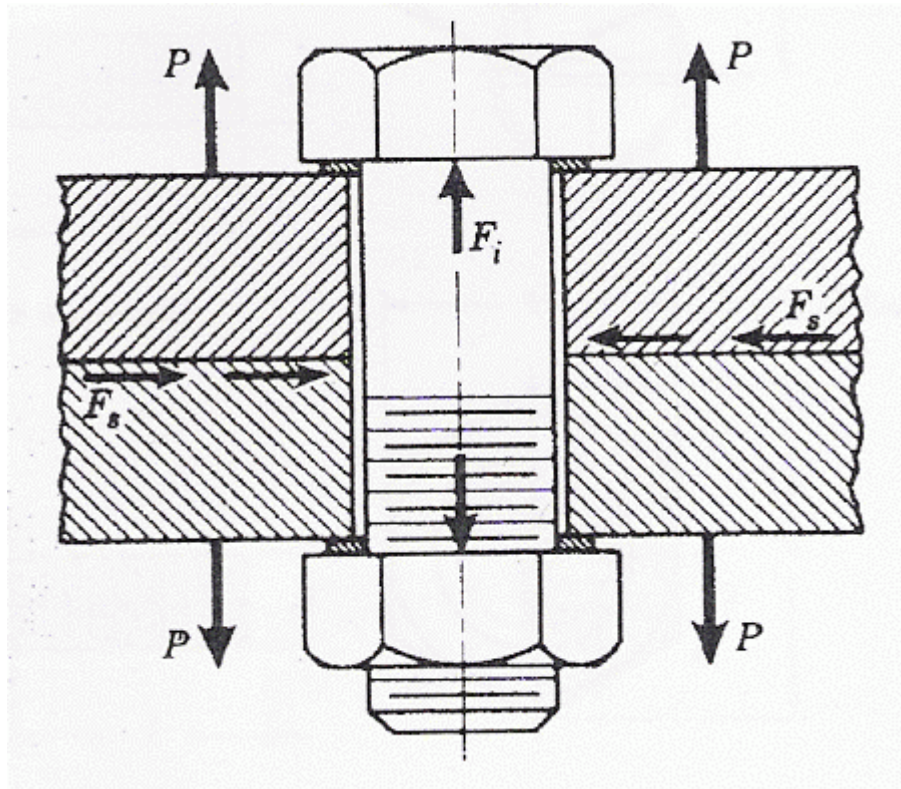


Figura 5 – Junta aparafusada (SHIGLEY, 1983).

Quando se aplica uma carga externa P a uma união pré-carregada, há uma variação na deformação do parafuso e na deformação das peças unidas. O parafuso, inicialmente sob tração, torna-se mais longo. Este aumento na deformação do parafuso é obtido por:

$$\Delta\delta_p = \frac{P_p}{K_p} \quad (1)$$

Onde:

P_p = carga externa no parafuso, porção de P suportada pelo parafuso

K_p = rigidez do parafuso

As peças unidas estão inicialmente submetidas à compressão, devido à pré-carga. Quando se aplica a carga externa a compressão diminui. A diminuição resultante na deformação das peças é:

$$\Delta\delta_m = \frac{P_m}{K_m} \quad (2)$$

Onde:

P_m = porção de P suportada pelas peças da união

K_m = rigidez das peças

Considerando-se que as peças não se separaram, o aumento na deformação do parafuso deve ser igual à diminuição na deformação das peças e:

$$\frac{P_p}{K_p} = \frac{P_m}{K_m} \quad (3)$$

Como $P = P_p + P_m$ (onde P = carga externa total aplicada a união) obtém-se:

$$P_p = \frac{K_p P}{K_p + K_m} \quad (4)$$

Logo a carga resultante no parafuso é:

$$F_p = P_p + F_i = \frac{K_p P}{K_p + K_m} + F_i \quad (5)$$

Onde:

F_i = força inicial de montagem, pré-carga no parafuso, devido ao aperto, antes de se aplicar P.

Do mesmo modo, a compressão resultante nas peças unidas é:

$$F_m = \frac{K_m P}{K_p + K_m} - F_i \quad (6)$$

As equações 5 e 6 só são válidas se existir alguma compressão inicial nas peças. Se a carga externa for suficientemente grande para remover completamente esta compressão, as peças se separarão e a carga inteira será suportada pelo parafuso (SHIGLEY, 1983).

A força inicial de montagem (pré-carga) mantém os componentes a serem unidos sob compressão. Enquanto eles estão sob compressão a carga externa se transmite ao parafuso basicamente como tração, reduzindo as chances de sobrecarga.

SAKAGUSHI e BORGERSEN (1995) reportaram que a pré-carga alcançada nos componentes é dependente do acabamento das interfaces, atrito entre os componentes, geometria e propriedades do material.

O gráfico da figura 6 mostra o que foi analisado acima. A linha k_m é a rigidez das peças; qualquer força, como a pré-carga F_i , causará nas peças uma deformação por compressão δ_m . A mesma força causará no parafuso uma deformação por tração δ_p . Quando se aplica uma carga externa, δ_m diminui de $\Delta\delta_m$, enquanto que δ_p aumenta da mesma quantidade $\Delta\delta_p = \Delta\delta_m$. Assim, a carga aumenta no parafuso e diminui nas peças.

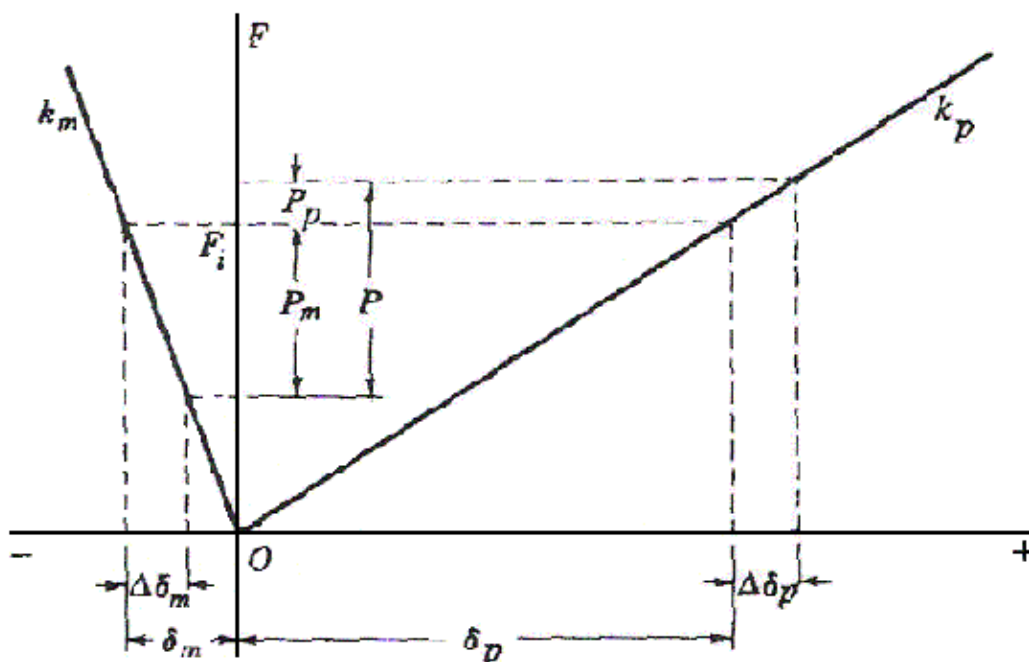


Figura 6 – Gráfico demonstrando como a carga aumenta nos parafusos e diminui nas peças (SHIGLEY, 1983).

Segundo KEATING (1999), pré-carga é a força axial no pescoço do parafuso, que ocorre entre o primeiro filete da rosca e a cabeça do parafuso. Esta força de tensão comprime o “abutment” ao implante. A importância da pré-carga não pode ser subestimada, pois melhora o efeito de travamento do parafuso. Para ser efetivo, o nível de tensão da pré-carga deve ser menor do que o limite de escoamento do material do parafuso, isto é, a carga máxima na qual nenhuma deformação permanente ocorrerá neste e maior que qualquer força aplicada pela ação de mordida. Dependendo da resistência do material do parafuso e seja ele ou não reutilizado, pré-cargas de 75% a 90% do limite de escoamento do material podem ser requeridas para prevenir soltura do parafuso submetido a moderadas cargas laterais. Para materiais dúcteis como o titânio comercialmente puro ou ouro, isto permite muito pouco espaço para erro.

Já SHIGLEY (1983) define pré-carga como uma força inicial obtida a partir do torque dado no parafuso promovendo uma força de compressão nas partes que estão sendo unidas (conexão protética e implante) e uma força de tensão em todo o parafuso que assim fica alongado.

Em relação ao apertamento, duas considerações importantes precisam ser feitas: o torque ótimo que será dado e a vida em fadiga do parafuso. A função do torque é a

aplicação de uma ótima pré-carga e esta por sua vez se relaciona com a vida em fadiga do parafuso (BURGUETTE *et al.*, 1994).

O gráfico da figura 7 proposto por PATTERSON e JOHNS (1992) demonstra a relação entre pré-carga e vida em fadiga de um parafuso de ouro usado para o protocolo onde eram colocados cinco implantes para suportar uma prótese fixa. Para demonstrar tal situação foram simuladas cargas fora do centro dos implantes. Os resultados do gráfico para essa geometria mostram que ao ser alcançada uma ótima pré-carga (em torno de 280 N) se tem o maior número de ciclos de fadiga. Acima deste valor, o torque dado provavelmente excedeu o limite de escoamento do material do parafuso, havendo uma deformação plástica no mesmo, abreviando assim sua vida em fadiga.

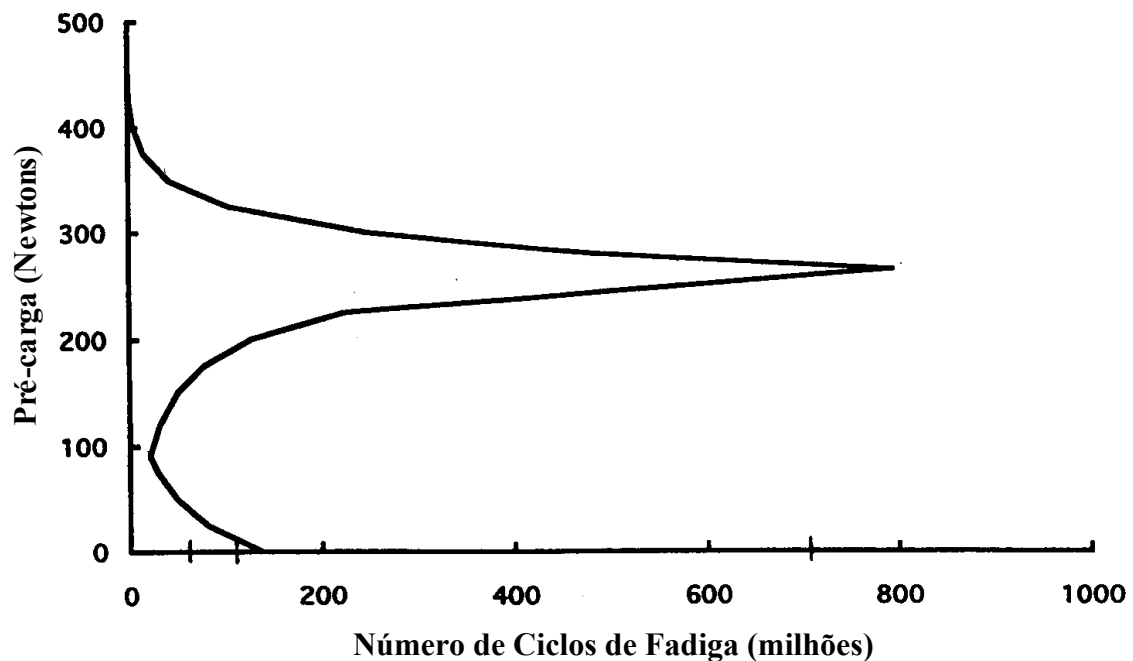


Figura 7 - Gráfico fadiga versus pré-carga (PATTERSON e JOHNS, 1992).

ELIAS e FIGUEIRA (2003) ratificam essa teoria quando afirmam que pré-cargas de baixa intensidade não garantem uma boa união e pré-cargas elevadas causam deformações plásticas do parafuso, igualmente não mantendo a estabilidade do sistema.

II.3 - Montagem – Torque

Para assegurar que o pré-carregamento se processe por ocasião da montagem das peças é de suma importância que o torque correto seja dado.

Na implantodontia, as peças são representadas pelo implante, conexão protética e parafuso. A partir do momento em que a conexão protética (“abutment”) é posicionada no implante e o parafuso recebe o torque, estabelecendo a pré-carga, todos os três componentes se mantêm unidos formando um conjunto único conforme mostram as figuras 8a e 8b. A figura 9 apresenta o conjunto e ainda a coroa protética demonstrando a situação que ocorre na clínica.

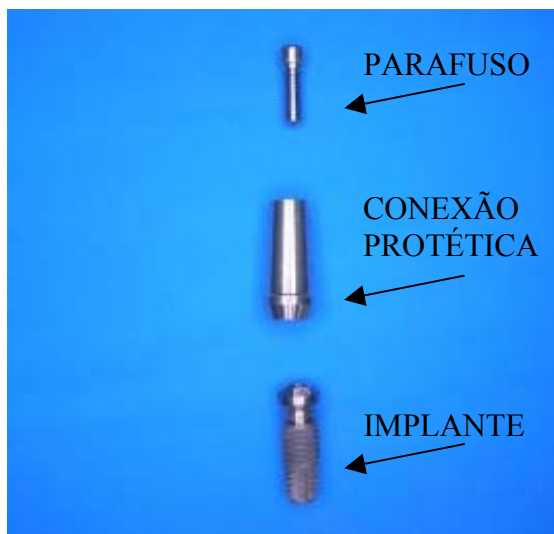


Figura 8a: Conjunto único - implante, conexão protética e parafuso



Figura 8b: Conjunto único já tendo o parafuso recebido o torque

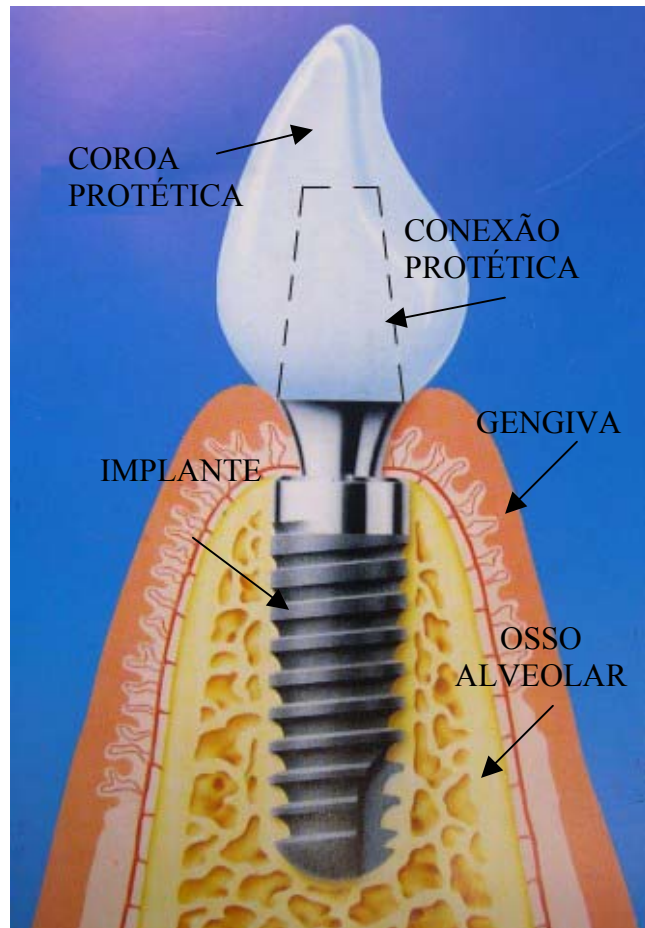


Figura 9 – Conjunto e ainda a coroa protética sobre o “abutment” (Neodent®, 2005)

Todos os fabricantes de implantes recomendam um determinado torque para a instalação final do trabalho protético indicando o uso de um torquímetro (geralmente manual) para que seja alcançado tal torque ótimo.

SHIGLEY (1983) utiliza uma fórmula onde pode ser obtida uma boa estimativa do torque necessário para produzir um dado pré-carregamento:

$$T = \frac{F_i d_m}{2} \left(\frac{1 + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right) + \frac{F_i \mu_c d_c}{2} \quad (7)$$

onde:

T = torque

F_i = força inicial de montagem ou pré-carga

d_m = diâmetro médio do parafuso

l = passo da rosca

μ = coeficiente de atrito do parafuso

α = metade do ângulo da rosca

μ_c = coeficiente de atrito do colar

d_c = diâmetro do colar

Assim sendo, através dessa equação 7 demonstra-se que o torque final está relacionado ao coeficiente de atrito nos filetes da rosca do parafuso e no colar, à geometria do parafuso (representada pelo passo, metade do ângulo da rosca, diâmetro médio do parafuso e diâmetro do colar) e também à pré-carga.

Ainda segundo BURGUETE *et al.* (1994) existem 3 classes de métodos de apertamento: controle do torque, controle do ângulo e controle do torque e ângulo. Segundo os autores apenas o método de controle de torque é usado em prótese dentária e este objetiva aplicar um torque (seja manual ou através de um torquímetro) calculado a partir da equação 7.

Um método proposto por HAGIWARA e OHASHI (1994) consiste na medição de torques de apertamento e afrouxamento e depois na estimativa da força de união dos componentes. Uma inicial estimativa do torque de apertamento T é feita a partir da equação 7 e é aplicada no parafuso. O torque necessário para o afrouxamento do parafuso (T_f) em um ângulo arbitrário, γ , é depois medido e de acordo com os autores a pré-carga realmente alcançada pelo torque de apertamento T é dado por:

$$P = \frac{\pi}{p} (T - |T_f|) \quad (8)$$

onde P é a pré-carga (que será calculada), p é o passo de rosca, T é o torque de apertamento (recomendado pelo fabricante) e T_f é o torque necessário para afrouxar o parafuso.

MARTIN *et al.* (2001) utilizam em seu trabalho a equação 8 para calcular a pré-carga. Como já mencionado no capítulo da Introdução, a partir dos resultados obtidos os autores verificaram qual tipo de parafuso (com ou sem superfície tratada, e se de ouro ou titânio) apresentou pré-carga mais elevada.

II.4 - Relação entre pré-carga e torque

O parafuso deve ser visto como uma mola rígida (algo que tenha elasticidade, mas que não tenha seu formato facilmente modificado), ou seja, logo que o torque rotacional é aplicado há um alongamento e por conseguinte tensionamento entre a cabeça e os filetes em trabalho do parafuso. Quando uma carga funcional é aplicada na prótese, como por exemplo durante a mastigação, a cabeça do parafuso é comprimida contra seu sítio no implante, podendo assim reduzir a força de atrito nas roscas. Caso haja um desengate das roscas com diminuição da pré-carga, o parafuso afrouxa (MARTIN *et al.*, 2001).

SAKAGUSHI e BORGERSEN (1995) utilizaram um método computacional – análise por elementos finitos – e chegaram a conclusões importantes. Por meio da figura 10 os autores demonstraram que as áreas de contato não deformáveis (superfície do “abutment” e implante e também parte angulada na cabeça do parafuso e sua correspondente no “abutment”) recebem muita força quando é dado o torque recomendado pelo fabricante de 20 N.cm no parafuso. Além destas, as áreas de contato deformáveis (segundo e terceiro filete do parafuso) também apresentaram elevadas forças axiais.

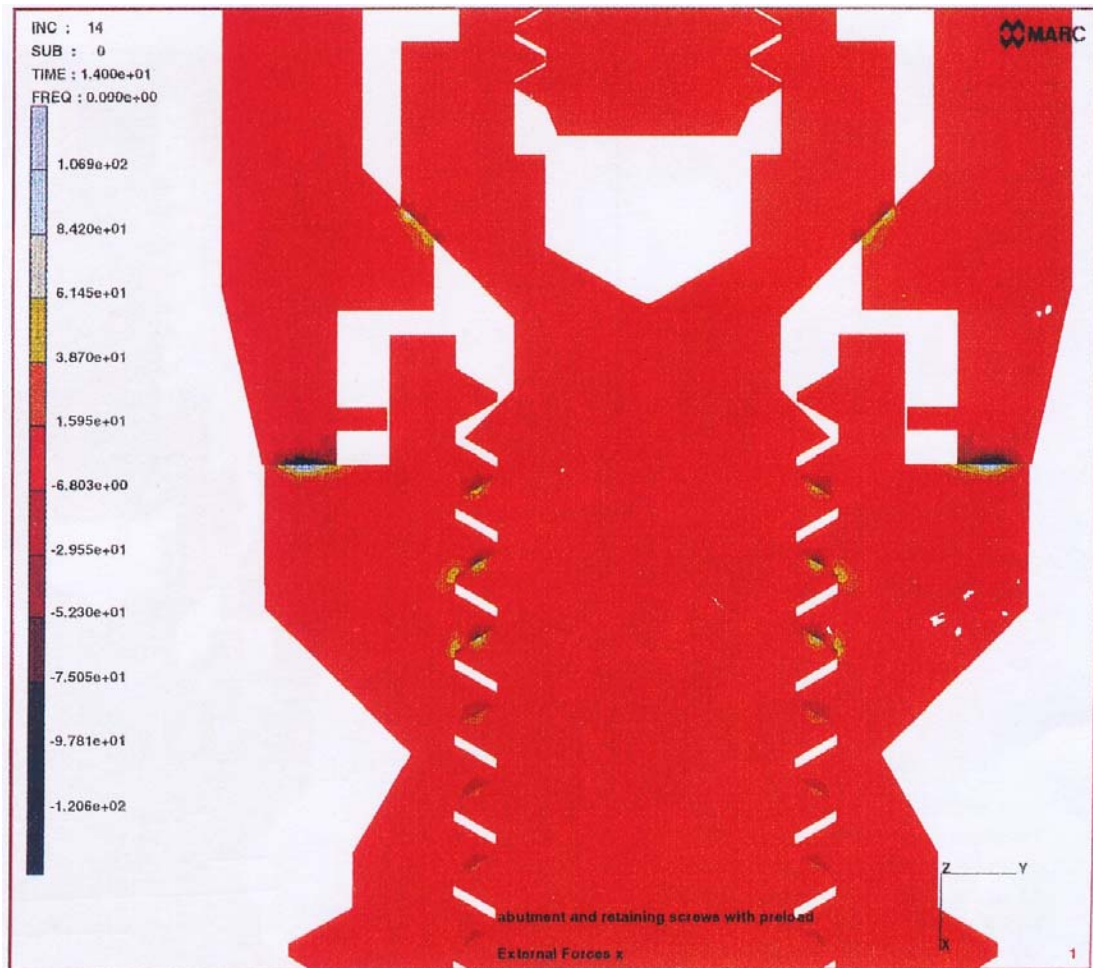


Figura 10 – Forças axiais no “abutment”, no parafuso do “abutment” e no implante depois do torque de 20 N.cm (SAKAGUSHI e BORGENSEN, 1995)).

A figura 11 demonstra a tensão axial concentrada em áreas específicas após o torque ter sido efetivado. O pescoço do parafuso do “abutment” apresentou a mais elevada tensão axial (240.7 MPa) e esta é uma das áreas mais susceptíveis a fratura.

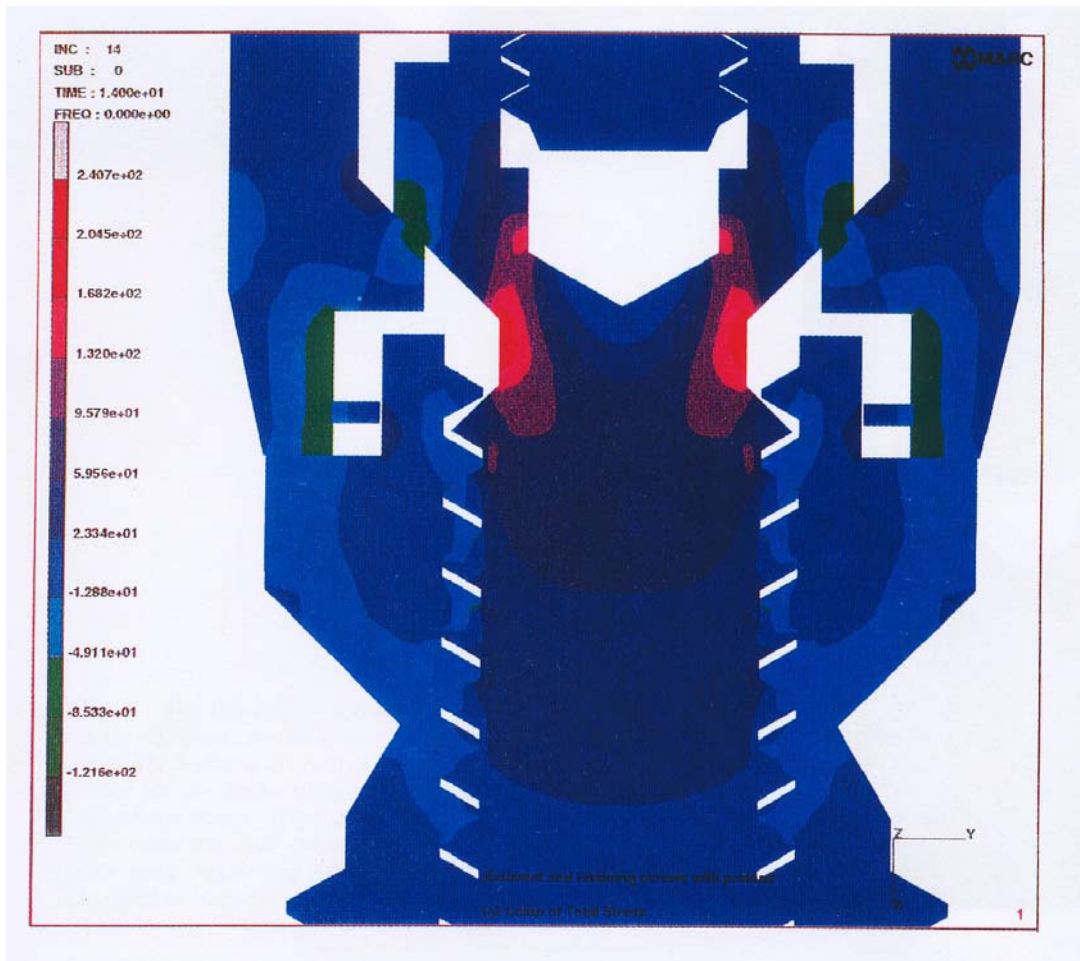


Figura 11 – Tensão axial no “abutment”, parafuso do “abutment” e implante depois de 20N.cm (SAKAGUCHI e BORGENSEN, 1995)

Vários estudos (MARTIN *et al.*, 2001) efetuaram sucessivos torques de apertamento e afrouxamento do parafuso, sem submeter os corpos a qualquer carregamento. Foi observado que no afrouxamento imediato (logo após o primeiro torque), o valor obtido era inferior ao torque inicialmente dado.

BURGUETE *et al.* (1994) explicam esse fato quando afirmam que o torque aplicado e a pré-carga são apenas indiretamente proporcionais, devido a influência de forças de atrito abaixo da cabeça do parafuso.

Quando o torque é aplicado em uma união aparafusada há uma oposição por forças responsáveis pelo alongamento do parafuso e pela compressão das partes a serem unidas (implante e “abutment”). Há também uma oposição por forças de atrito abaixo da cabeça do parafuso e nos filetes da rosca, o que induz a um torque de reação H e R respectivamente. A magnitude desse torque de reação depende das propriedades

lubrificantes e do atrito dos componentes. O torque de reação (R) que produz a pré-carga no parafuso pode ser simplificado pela equação:

$$R = T - H \quad (9)$$

onde T é o torque aplicado

Devido ao fato de a razão H/R variar de acordo com um grande número de fatores, o torque aplicado necessário para atingir uma ótima pré-carga é difícil de ser especificado porque isso vai variar de um parafuso para outro (BURGUETE *et al.*, 1994).

O gráfico a seguir (figura 12) relaciona o torque de reação nas roscas (R) e a pré-carga (P). O gradiente do gráfico é uma função do coeficiente de atrito, da geometria e das propriedades do material. Entretanto a importância da variação na geometria e nas propriedades do material são geralmente menores quando comparadas ao coeficiente de atrito. Este por sua vez é dependente da dureza das roscas, do acabamento da superfície, da quantidade e das propriedades do lubrificante, e da velocidade do apertamento, como dito anteriormente.

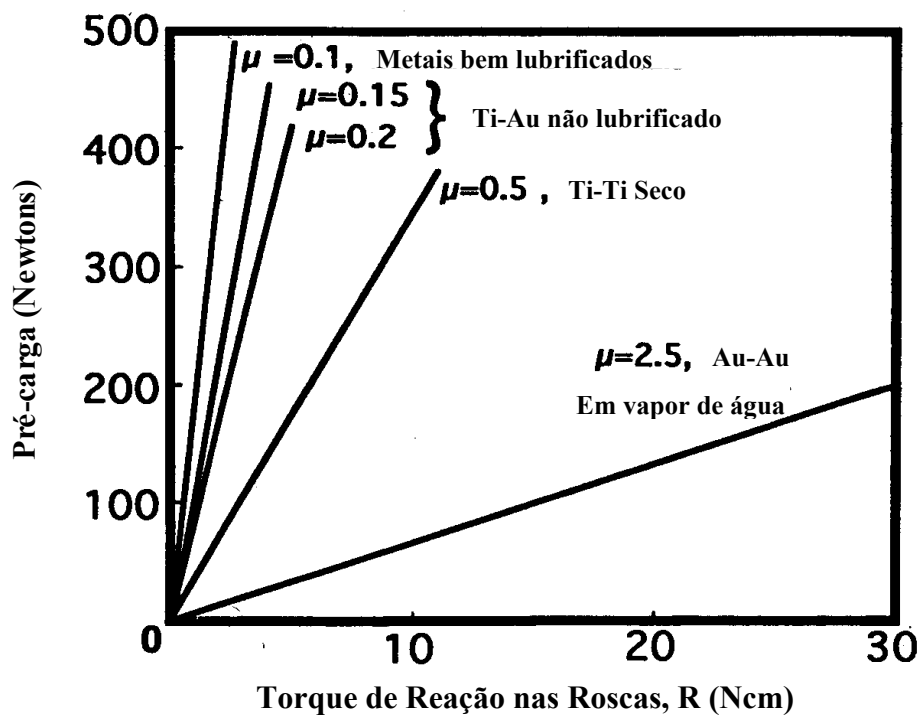


Figura 12 – Gráfico relacionando pré-carga e torque de reação nas roscas do parafuso (BURGUETE *et al.*, 1994)

II.5 - O fenômeno do afrouxamento do parafuso

CARLSON e CARLSSON (1994) afirmam que dentre as complicações encontradas na terapia com implantes e prótese sobre implantes o afrouxamento do parafuso da conexão protética corresponde a 10 % .

Alguns fatores podem comprometer as uniões por meio de parafusos e SHIGLEY (1983) cita algumas delas, como o aperto inconveniente do parafuso (para minimizar esse problema indica o uso de torquímetro até se atingir em torno de 60% do limite de escoamento), deformação plástica do parafuso, auto-afrouxamento devido a trepidações. Além destas, outras causas podem ser citadas como a corrosão química ou eletrolítica e o desgaste da rosca de parafuso de movimento (que pode ser evitado escolhendo materiais adequados, prevendo lubrificação e limitando as pressões superficiais).

No caso específico das junções aparafusadas de prótese sobre implante, além dos pontos acima mencionados soma-se a não adaptação perfeita dos componentes (PATTERSON e JOHNS, 1992), carga oclusal elevada por um ajuste incorreto (BINON, 1994), projeto inadequado do parafuso e microrugosidades nas superfícies (HOYER *et al.*, 2001).

JÖRNÉUS *et al.* (1992) investigaram em seu estudo dois prováveis mecanismos que causam o afrouxamento do parafuso usado em prótese sobre implante: efeito de alavanca no conjunto aparafusado e micro-movimentos ou vibrações. Se uma força de alavanca em uma prótese unitária (ou seja, substituindo apenas um dente) promove uma carga mais elevada do que o limite de escoamento do parafuso, uma deformação plástica permanente ocorrerá neste. Nesse tipo de situação haverá perda da tensão no corpo do parafuso, resultando em uma diminuição das forças de contato entre o cilindro do “abutment” e o implante, e assim há maior chance de o parafuso afrouxar. Quanto mais elevado for o limite de escoamento do parafuso, menor será a chance deste sofrer uma deformação plástica sob determinada carga.

O segundo mecanismo citado sugere que micro-movimentos ou vibrações no conjunto aparafusado causaria a separação das peças. Toda superfície usinada exibe algum grau de microrugosidades fazendo com que duas superfícies não estejam completamente em contato. Quando a interface do parafuso é submetida a cargas dinâmicas externas há perda de adesão desses pontos de contato, fazendo com que haja separação.

Ambos os mecanismos de afrouxamento do parafuso são considerados como causas da separação das peças. Imagina-se que durante a ação de forças cíclicas de alavanca, a pré-carga é perdida, havendo assim uma indução de deformação plástica do parafuso e da interface implante-abutment. Isso leva a deformação das superfícies tanto do parafuso quanto das roscas internas do implante. JÖRNÉUS *et al.* (1992) afirmam que aumentando a plataforma horizontal (plataforma larga de implante; de 5.0 mm ou mais) poderia aumentar a interface implante-abutment e assim diminuir a perda da pré-carga no carregamento dinâmico.

BICKFORD (1981) estabeleceu que a falência do conjunto aparafusado em prótese sobre implante se dá em 2 estágios. O primeiro ocorre quando cargas externas funcionais são aplicadas ao conjunto durante a mastigação levando a perda gradual da pré-carga. O parafuso pode ser comparado a uma mola, alongado pela pré-carga, onde tal alongamento é mantido através das forças de atrito nos filetes da rosca. Qualquer força externa transversal ou axial que cause um pequeno deslizamento entre as roscas, libera alguma tensão do alongamento e assim parte da pré-carga é perdida. Quanto mais alta for a pré-carga aplicada ao conjunto durante o torque, maior será a resistência a esse primeiro estágio do afrouxamento. Enquanto as forças de atrito entre as roscas permanecerem elevadas, somente uma grande força externa será necessária para causar o deslizamento. Já no segundo estágio de afrouxamento, a pré-carga está em um valor abaixo do crítico e então forças externas e vibrações de menor intensidade (quando comparadas com as do primeiro estágio) causam o desengate das roscas. Assim que esse estágio é alcançado o conjunto aparafusado não mais funciona da maneira para qual foi projetado, e assim o fracasso é estabelecido (CIBIRKA *et al.*, 2001).

Todos os fatores causais do afrouxamento do parafuso, isolados ou em conjunto, se não detectados e corrigidos a tempo podem ter como consequência a falha por fadiga, ou seja, a quebra do parafuso (KHRAISAT *et al.*, 2002).

A falha por fadiga ocorre de forma súbita em estruturas que estão sujeitas a tensões cíclicas. O processo ocorre pela iniciação e propagação de trincas, e em geral a superfície da fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada (CALLISTER, 2002).

Caso o afrouxamento não seja detectado clinicamente, progredindo para fratura do parafuso, a complicação se torna ainda maior, pois a remoção das partes fraturadas do interior do implante não é tarefa fácil. Segundo KHRAISAT *et al.* (2002), a área crítica onde mais frequentemente ocorre fratura é na junção entre o pescoço do parafuso (região

lisa) e a parte rosqueada. Isso porque há um afunilamento nessa região do pescoço, promovendo também uma concentração de tensão e resultando assim na iniciação de uma trinca por fadiga, que se propaga até a completa fratura catastrófica. Além disso, é o primeiro filete da rosca em contato efetivo com seu sítio que suporta a mais elevada tensão do conjunto.

No trabalho de BASTEN *et al.* (1996) todos os parafusos de titânio para “abutment” fraturaram na região do pescoço quando submetidos a um carregamento cíclico.

BINON (1996) sugere que a precisão da adaptação dos dois hexágonos também influencia a estabilidade do conjunto como visto nas figuras 13 e 14. O hexágono interno, por sua vez, promove um maior alinhamento entre abutment e implante, minimizando os componentes de flexão.

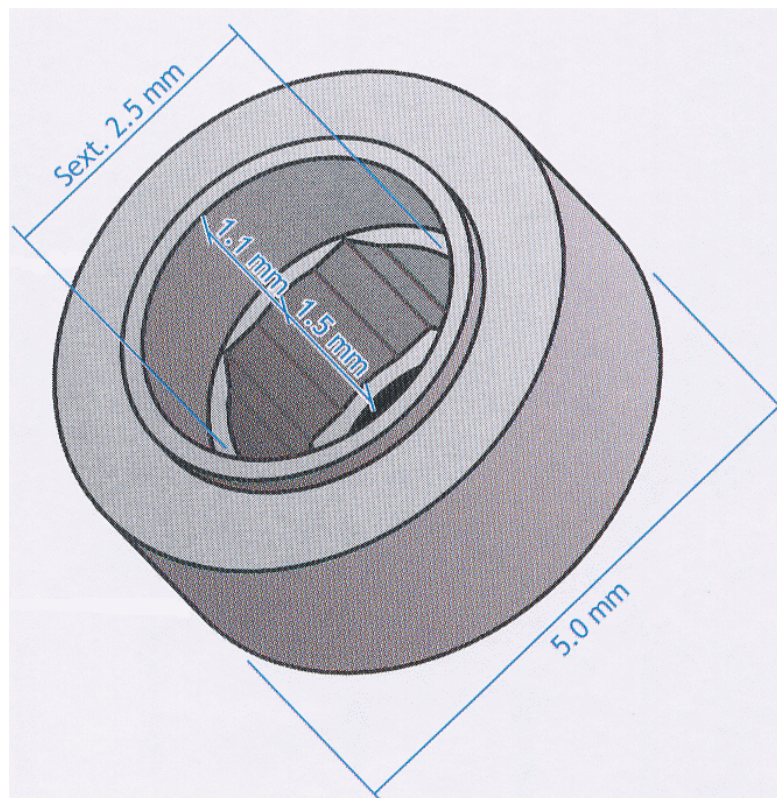


Figura 13- Conexão interna do implante (Neodent®, 2005).

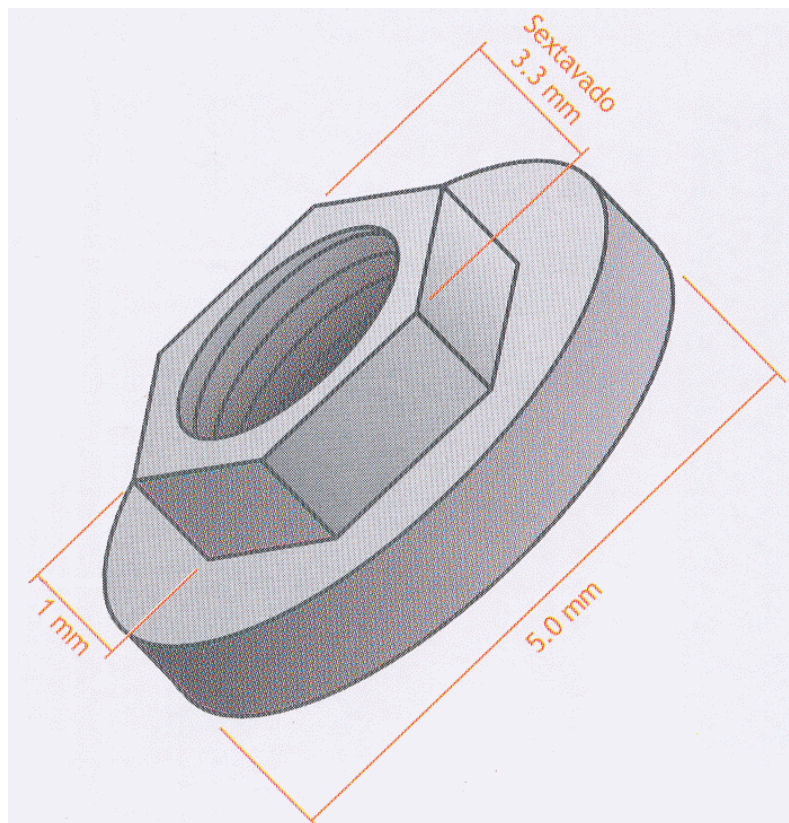


Fig 14 – Conexão externa do implante (Neodent®, 2005).

LANG *et al.* (2002) corroboram essa idéia afirmando que para que essa união se consolide é importante uma ótima adaptação dos componentes, ou seja, que a conexão protética se encaixe de forma precisa no sítio correspondente do implante. Relatam também que qualquer sistema de implante com potencial para rotação ou deslizamento da conexão protética ao redor do implante com menos de 5°, alcança a precisão de encaixe sugerida por BINON (1996).

MÖLLERSTEN *et al.* (1997) verificaram que os “abutments” que se conectavam com os implantes através de um hexágono interno, e assim havendo uma junção longa ou com maior área de contato, apresentavam uma resistência favorável aos momentos de força de alavanca.

Concluindo, para minimizar o fenômeno do afrouxamento busca-se um encaixe o mais perfeito possível dos componentes do conjunto, através da utilização de peças provenientes de uma indústria confiável que tenha métodos de fabricação com precisão e um rígido controle de qualidade.

Outro fator que deve ser considerado para evitar o afrouxamento é a obtenção de uma pré-carga a mais alta possível, sem contudo ultrapassar o limite de escoamento do

material do parafuso. E como já foi visto que o coeficiente de atrito, e por conseguinte o lubrificante, influenciam diretamente na pré-carga obtida, a possibilidade de se recobrir os parafusos para abutment com filmes de DLC ou DLC-Si pode ser uma alternativa interessante, já que tais filmes apresentam baixo coeficiente de atrito e por conseguinte uma pré-carga máxima poderá ser alcançada.

II.6 - Carbono

O carbono pode se apresentar de três formas distintas: cristalina, amorfa e vítrea. Segundo CALLISTER (2002), um material cristalino é aquele no qual os átomos estão situados em um arranjo que se repete ou que é periódico ao longo de grandes distâncias atômicas; isto é, existe ordem de longo alcance, de tal modo que quando ocorre a solidificação, os átomos se posicionarão em um padrão tridimensional repetitivo, no qual cada átomo está ligado aos seus átomos vizinhos mais próximos. O diamante e o grafite são formas cristalinas do carbono.

Também de acordo com a definição de CALLISTER (2002), os materiais não cristalinos ou amorfos são carentes de um arranjo atômico regular e sistemático ao longo de distâncias atômicas relativamente grandes. Portanto, materiais amorfos são caracterizados por estruturas atômicas ou moleculares relativamente complexas que se tornam ordenadas apenas com alguma dificuldade. Os filmes DLC são amorfos.

O carbono é um dos poucos elementos que tem a capacidade de compartilhar elétrons com átomos de outros elementos ou com outros átomos de carbono, formando quatro ligações covalentes (ALLINGER *et al.*, 1976).

Em seu estado fundamental, o carbono apresenta a configuração $1s^2 2s^2 2p^2$, porém quando reage com outro átomo, ele sofre o fenômeno denominado hibridização, onde ocorre a excitação dos dois elétrons 2s para os orbitais 2p vazios. Isso pode ocorrer de três maneiras distintas, dependendo das condições ambientais (como por exemplo temperatura e pressão) dando origem aos orbitais híbridos sp^3 (tetraédrico), sp^2 (trigonal) e sp^1 (linear).

O tipo de hibridização que os átomos de carbono sofrem diferencia as suas formas alotrópicas. Na estrutura diamante, o carbono sofre somente hibridização sp^3 em suas ligações, enquanto que na estrutura grafite o carbono sofre apenas hibridização sp^2 .

Cada forma alotrópica do carbono apresentará propriedades distintas designadas por sua configuração atômica. O diamante, por exemplo, apresenta elevada dureza devido ao fato de que os quatro elétrons de valência do carbono se unem aos átomos adjacentes através de fortes ligações σ (ROBERTSON, 2002).

O grafite, por sua vez, apresenta os 3 elétrons de valência dos orbitais híbridos sp^2 formando fortes ligações σ entre esses orbitais com seus três vizinhos no mesmo plano, enquanto que o quarto elétron forma ligações π com os átomos vizinhos. Fracas forças de Van der Waals dominam as ligações entre os planos fazendo do grafite um material

com propriedades de dureza muito baixa quando comparado ao diamante, por exemplo, e de ação lubrificante (ROBERTSON, 2002, LIFSHITZ, 1999).

Os filmes DLC (carbono tipo diamante) são materiais amorfos que eventualmente podem incluir uma fase microcristalina (GRILL e MEYERSON, 1994). Como o próprio nome indica, tais filmes apresentarão algumas propriedades semelhantes ao do diamante, mas também algumas particularidades que o tornam únicos.

Tanto o diamante quanto os filmes DLC crescem a partir de hidrocarbonos contendo gases. A deposição do diamante normalmente requer elevada temperatura do substrato enquanto que a deposição do DLC pode ser feita com a temperatura do substrato abaixo de 325° C. Entretanto, a temperatura não é o principal fator diferencial na síntese desses dois materiais. A elevada temperatura do substrato por si só não é suficiente para obter filmes de diamante por deposição de vapor químico (CVD). A técnica CVD a partir de hidrocarbonos em substratos com elevada temperatura resulta na formação de um carbono grafitico termodinamicamente estável. Para haver crescimento de um filme de diamante, o substrato e a superfície onde haverá o crescimento do filme têm de ser exposta a um meio contendo elevada concentração de átomos de hidrogênio e/ou oxigênio, cujo propósito é prevenir a formação de fases de não-diamante. O DLC tem que crescer em baixas temperaturas para prevenir a grafitização, e sob condições de bombardeamento de íons. Inclusive, a incorporação de hidrogênio nos filmes DLC é importante para se obter propriedades semelhantes a do diamante (GRILL e MEYERSON, 1994).

II.7 - Carbono Amorfo (DLC)

Os filmes de DLC foram produzidos pela primeira vez em 1969 por AISEMBERG e CHABOT (1971), que foram os pioneiros no uso de espécies energéticas para deposição. Tais filmes podem ser definidos como materiais amorfos metaestáveis que contêm uma mistura de carbono sob a forma hibridizada sp^3 , sp^2 e sp^1 . Não possuem em sua estrutura uma ordenação de longo alcance (como os materiais cristalinos), mas podem apresentar uma ordenação de médio alcance. O material pode ser depositado em substratos com temperatura inferior a 325°C e o bombardeamento de íons, no filme que está crescendo, é necessário para que se obtenha propriedades semelhantes ao do diamante. Além disso, muitos filmes de DLC contêm uma significativa quantidade de hidrogênio (GRILL e MEYERSON, 1994).

Enquanto o diamante e seus filmes são materiais com propriedades fixas e bem definidas, as propriedades dos filmes DLC variam entre as encontradas no diamante, no grafite e nos polímeros de hidrocarbono (GRILL e MEYERSON, 1994) como ilustra a figura 15 (GRILL, 1998).

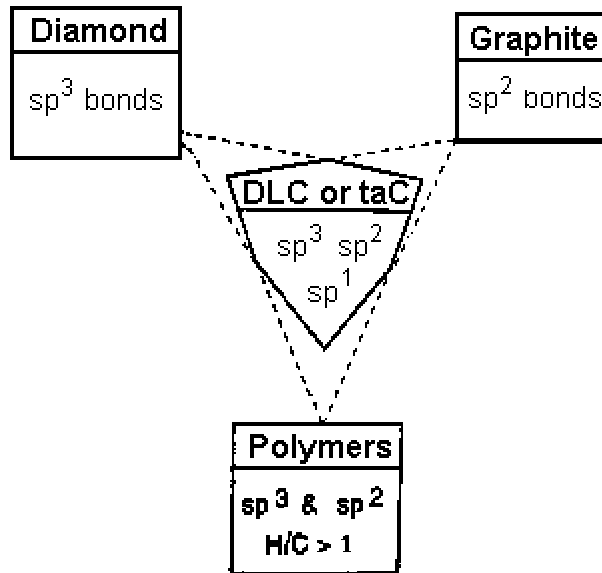


Figura 15 – Propriedades dos filmes DLC (GRILL, 1998).

Dentre as várias propriedades dos filmes DLC, ROBERTSON (2003) e GRILL (1999) citam uma elevada dureza mecânica, elevado módulo de elasticidade, uma baixa rugosidade superficial, inércia química tanto em meio alcalino quanto ácido, elevada resistividade elétrica, instabilidade térmica (acima de 325°C) e também é semi-condutor. A tabela 1 (DAMASCENO, 2000) mostra algumas propriedades do carbono amorfo, grafite e diamante.

Tabela 1 – Propriedades do diamante, carbono amorfo e grafite (DAMASCENO, 2000).

	Diamante	Carbono amorfo	Grafite
Estrutura Cristalina	Cúbica a = 3,567 Å	Amorfa, mistura de hibridações sp ³ e sp ²	Hexagonal a=4,7 Å e c=6,79 Å
Densidade (g / cm ³)	3,51	1,8 – 2,0	2,26
Estabilidade Química	Inerte, ácidos inorgânicos	Inerte, ácidos e solventes inorgânicos	Inerte, ácidos inorgânicos
Dureza (Vickers Kg/mm ²)	7000 – 10000+	900 – 3000	-----
Índice de refração	2,42	1,8 – 2,2	2,15 (c); 1,8 (⊥c)
Transparência	UV – VIS – IR	VIS – IR	Opaco
Gap ótico (eV)	5,5	2,0 – 3,0	-----
Resistividade (Ω cm)	> 10 ⁶	10 ¹⁰ - 10 ¹³	0,4 (c); 3,28 (⊥c)
Constante dielétrica	5,7	4 – 9	2,6 (c); 3,28 (⊥c)
% sp ³	100	a-C 1 – 90 a-C:H, duro 30 – 60 a-C:H, macio 50 – 80	0
% H	-----	a-C 0 a-C:H, duro 10 – 40 a-C:H, macio 40 – 65	-----

GRILL (2003) também destaca o baixo coeficiente de atrito dos filmes DLC e afirma que devido a sua inércia química e elevada resistência ao desgaste e corrosão, estes aparecem como um material ideal para recobrir implantes, sendo recentemente considerados como um revestimento biocompatível.

II.8 - Conteúdo de Hidrogênio

Grande parte dos filmes DLC contém uma significativa quantidade de hidrogênio (a-C:H ou carbono amorfo hidrogenado), dependendo do material precursor. Para vários métodos de deposição, o conteúdo de hidrogênio varia entre menos de 10% até 60%. Embora filmes de DLC livres de hidrogênio (a-C) e ainda assim extremamente duros possam ser produzidos, a incorporação deste se faz necessária quando se objetivam propriedades ópticas e elétricas semelhantes ao do diamante (GRILL, 1999a)

O conteúdo total de hidrogênio determina a estrutura do filme em um nível atômico (a razão entre sp³ e sp² de átomos de carbono coordenados), e assim as propriedades físicas do filme (GRILL, 1999b).

KAPLAN *et al.* (1985) descobriram que a razão sp^3 : sp^2 aumenta com o aumento da concentração de hidrogênio. Também verificaram que os filmes DLC contendo menos do que 50% de hidrogênio eram mais duros do que aqueles que continham teores superiores a esse valor. De acordo com ANGUS e JANSEN (1988), para se obter propriedades semelhantes àsquelas encontradas no diamante, os filmes depositados a partir de hidrocarbonos devem incluir uma concentração de hidrogênio entre 17% e 61%.

Sendo assim, o hidrogênio é importante para a formação e estabilização das ligações sp^3 e a perda deste componente através do aquecimento a altas temperaturas causa o colapso da estrutura levando a formação de uma fase grafitica dominada por ligações do tipo sp^2 (GRILL e MEYERSON, 1994).

A figura 16 representa o diagrama ternário de fases, a estrutura e composição dos filmes de DLC a partir das concentrações de carbono sp^3 , carbono sp^2 e hidrogênio (ROBERTSON, 1997). A composição e estrutura dos filmes no diagrama ternário é determinada pela técnica utilizada para a deposição do filme e a variação de seus parâmetros. O filme DLC contém uma significativa fração sp^3 nas ligações de carbono, proporcionando assim propriedades físicas e mecânicas atraentes que são de alguma forma semelhantes ao diamante. Os filmes DLC hidrogenados contém uma fração sp^3 menor do que 50% enquanto que os não hidrogenados contém 85% ou mais da fração sp^3 nas ligações (GRILL, 1998).

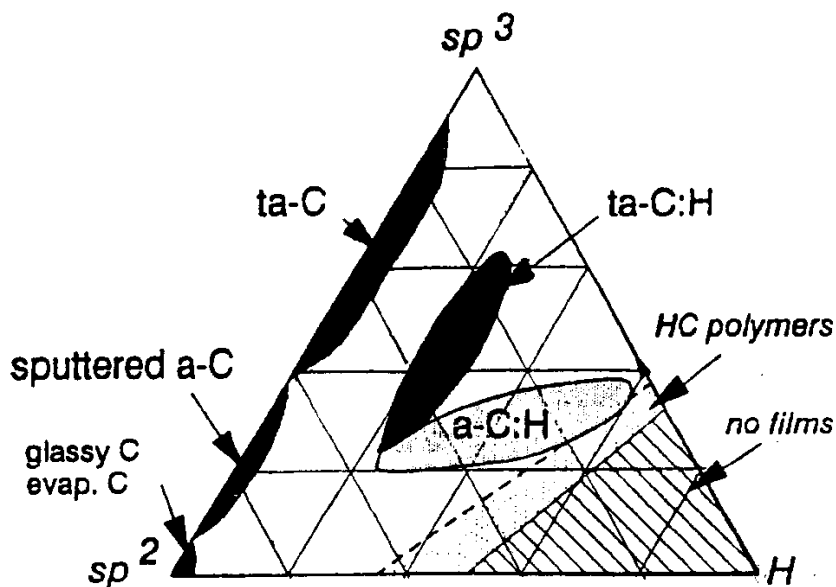


Fig.16 – Diagrama de fases ternário dos filmes DLC (ROBERTSON, 1997).

Na indústria atual os filmes hidrogenados apresentam maior utilização até porque houve maior desenvolvimento nas pesquisas desse grupo (LIFSHITZ, 1998). Apesar de a-C:H apresentarem elevada porção sp^2 , demonstram propriedades semelhantes ao diamante. A sua grande vantagem está no fato de se apresentarem como uma alternativa mais barata já que podem ser produzidos a baixas temperaturas.

A primeira descrição da estrutura do DLC hidrogenado (figura 17) foi de uma simples rede de ligações covalentes do carbono numa hibridização tetragonal (sp^3) e trigonal (sp^2), com coordenação local, e algumas ligações terminadas com hidrogênio. O carbono hibridizado na forma sp^1 pode ocorrer em pequenas quantidades (ANGUS *et al.*, 1991).

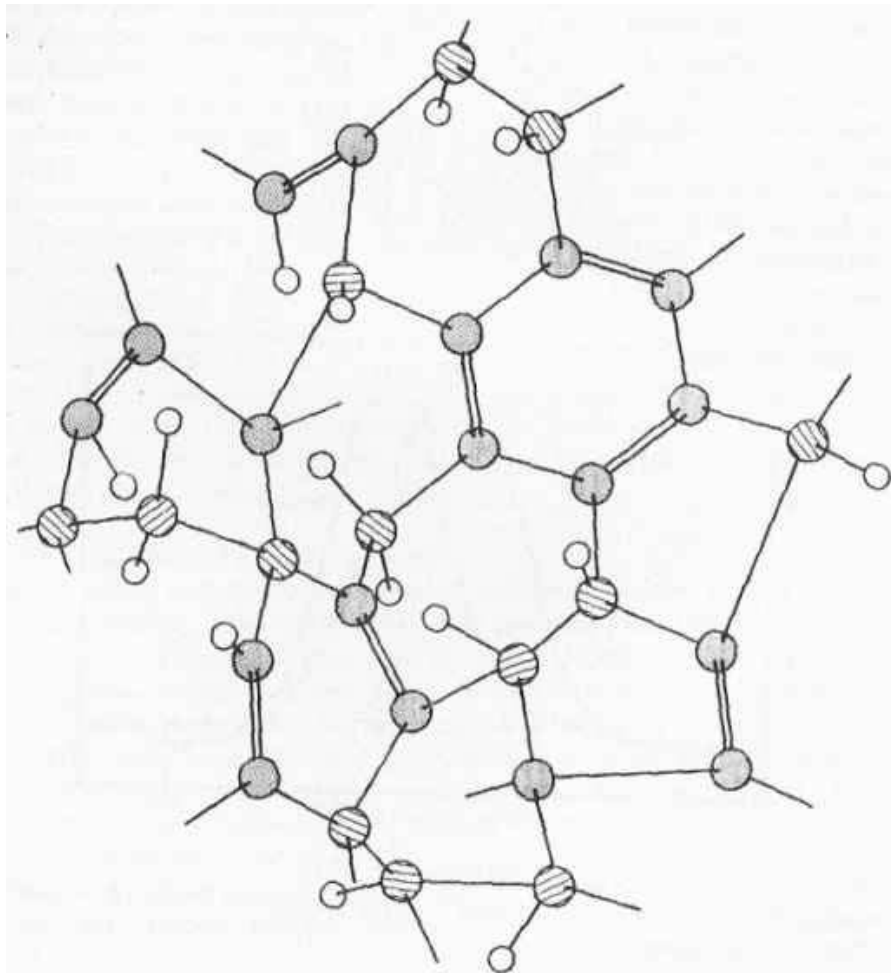


Figura 17 – Esquema representando a estrutura do DLC (ANGUS *et al.*, 1991).
⊗ Carbono Hibridizado sp^3 , ○ Átomo de Hidrogênio, ● Carbono Hibridizado sp^2

ROBERTSON (1995) propôs um modelo estrutural para o a-C e para o a-C:H, demonstrando que o arranjo mais estável dos sítios sp^2 é como “grupamentos” compactos num anel hexagonal, embebidos por uma matriz amorfa sp^3 .

Pouco tempo depois ROBERTSON (1995) propôs modificações para o seu modelo (figura 18) tendo em vista que o intenso bombardeio iônico durante a deposição do filme levaria a uma desordem estrutural do mesmo, limitando assim a formação de grandes aglomerados de sítios sp^2 . Ele propôs que os filmes de a-C:H sejam formados por pequenos aglomerados aromáticos e cadeias de sítios sp^2 , ao invés de grandes “ilhas” dispersas de sítios.

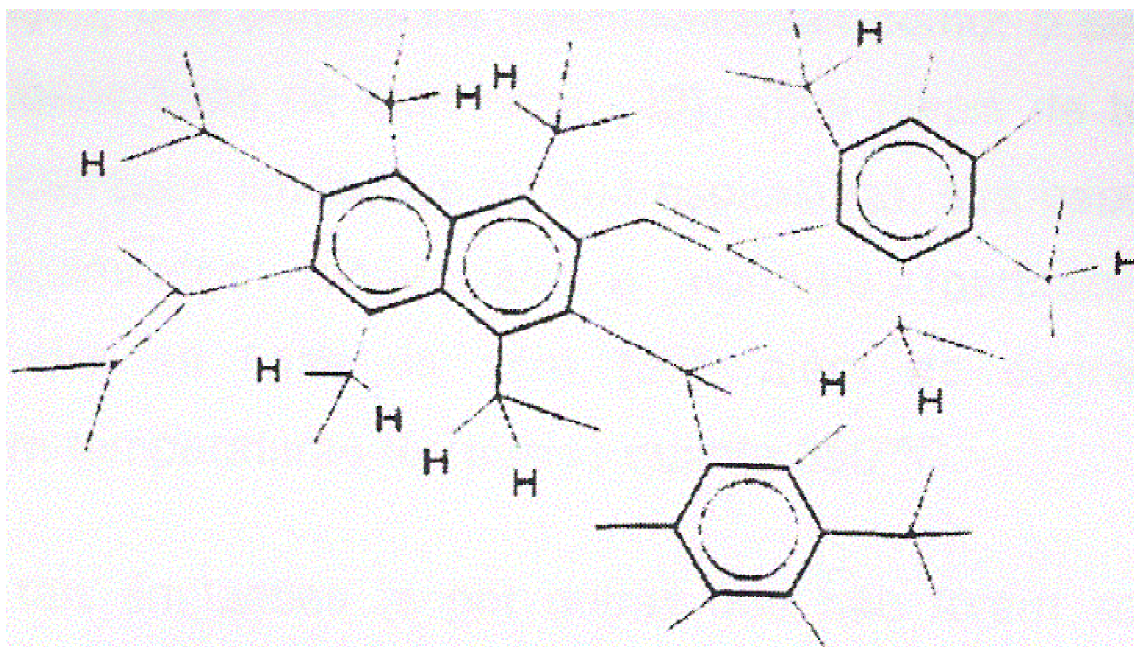


Figura 18 – Modelo estrutural do DLC modificado por ROBERTSON (ROBERTSON, 1995)

II.9 - Propriedades Mecânicas

Segundo GRILL (1998) e LIFSHITZ (1999) os filmes de a-C:H são caracterizados por apresentarem elevada dureza (10-30 GPa) com módulo de elasticidade de 6 a 10 vezes maior, porém elevada tensão interna compressiva (0,5 a 7 GPa). As propriedades estão diretamente correlacionadas a fração sp^3 do carbono nos filmes.

A dureza nos filmes não hidrogenados (ta-C ou a-C) pode atingir valores ainda mais elevados, na ordem de 40-80 GPa e seu módulo de elasticidade pode alcançar

valores superiores a 900 GPa. A tensão interna também tem seu valor aumentado podendo chegar a 13 GPa o que limita a espessura máxima do filme, que deve ser inferior a 1 μm .

O controle de tais tensões é de grande importância já que filmes muito tensionados caracterizam-se por baixa adesão, podendo assim haver a delaminação. Como tais filmes são quimicamente inertes, a adesão a determinados substratos não se mostra satisfatória fazendo com que uma intercamada (entre o substrato e o filme) esteja sendo utilizada para melhorar a adesão (GRILL, 1999, FONTAINE *et al.*, 2001).

LIFSHITZ (1999) e FONTAINE *et al.* (2001) afirmam que tal tensão residual também pode ser reduzida pela incorporação de átomos de N, Si, O ou outros metais ao filme.

II.10 - Incorporação de silício (DLC-Si)

A incorporação de silício nos filmes DLC tem despertado bastante interesse dos pesquisadores já que demonstra grande potencial para resolver alguns dos maiores problemas dos filmes puros de DLC; a elevada tensão interna residual de natureza compressiva (DAMASCENO *et al.*, 2000, DAMASCENO *et al.*, 2002).

De fato, os filmes DLC-Si apresentam baixa tensão residual interna, elevada taxa de deposição, boa adesão para a maioria dos substratos incluindo ligas metálicas, aço e vidros, elevada dureza, melhor estabilidade térmica, reduzida perda de hidrogênio e grafitação, baixo coeficiente de atrito independente da umidade relativa, resistência a oxidação e a corrosão. Essa gama de propriedades faz com que esse material seja um promissor candidato para um elevado número de aplicações tecnológicas como recobrimentos metalúrgicos e protetores.

Os filmes hidrogenados DLC-Si (a-C:H) têm realmente exibido baixa tensão residual, enquanto que mantém aproximadamente constante a dureza mecânica. Uma possível explicação para essa redução na tensão interna compressiva é a mudança nas propriedades microestruturais do filme.

De fato, BAIA NETO *et al.* (1997) afirmam que a incorporação de átomos de silício induzem a redução na razão sp^2/sp^3 de ligações de carbono, há redução na densidade e no tamanho dos defeitos grafiticos. Sugerem que o material apresenta um aumento na quantidade de vazios, e com isso há diminuição na sua densidade. Isso porque sendo os átomos de silício maiores do que os de carbono, quando há substituição

de carbono pelo silício nas ligações há também uma mudança na estrutura, havendo formação de mais vazios.

BAIA NETO *et al.* (1997) demonstraram que apesar de ter havido aumento da fração sp^3 nos filmes DLC-Si não houve aumento na dureza mecânica provavelmente pelo fato de se ter obtido um material menos compacto e/ou porque as ligações carbono-carbono foram substituídas por ligações mais fracas de silício-carbono na formação da estrutura amorfa. A figura 19 mostra um gráfico relacionando dureza e concentração de silano.

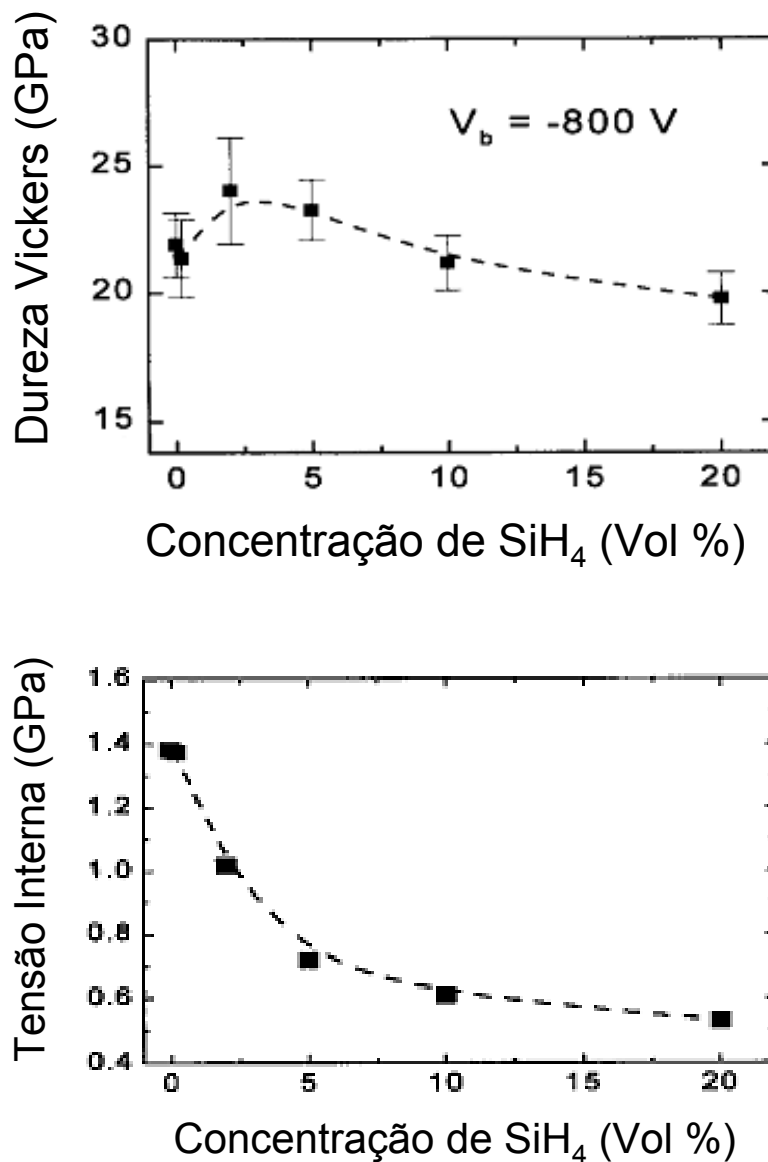


Figura 19 – Dureza versus concentração de silano (DAMASCENO *et al.*, 2000)

DAMASCENO *et al.* (2000) mostraram ser possível a obtenção de filme DLC-Si com elevada dureza (maior do que 20 GPa), baixa tensão (0,5 GPa) e elevada taxa de deposição (maior do que 40 nm / minuto) pela técnica PECVD, com uma mistura de gás metano (CH₄) e silano (SiH₄).

Um outro efeito importante na incorporação de Si em filmes de DLC é a inibição dos processos de grafitação e perda de hidrogênio com a temperatura, fazendo com que os filmes de DLC com adição de silício tenham maior estabilidade térmica (VASSEL *et al.*, 1997 e BAIA NETO *et al.*, 1997).

II.11 - Propriedades Tribológicas

A Tribologia é a ciência que estuda o atrito e o desgaste (ou abrasão) que ocorre entre superfícies deslizantes e ambos sofrem fortes influências das propriedades mecânicas como dureza, densidade e tensão residual (DONNET e GRILL, 1997).

Uma variedade de fatores contribuem para a fricção e para a abrasão, sendo a primeira controlada principalmente pela formação e quebra das ligações na interface entre as superfícies deslizantes. Já a abrasão é controlada pela quebra das ligações. Sendo assim, apesar de o filme de DLC apresentar elevada inércia química, seu comportamento tribológico é fortemente controlado pela química da superfície.

Dentre todas as propriedades mencionadas, as propriedades mecânicas e principalmente as tribológicas são as de maior valia para o uso do DLC como lubrificante sólido (recobrimento) nos parafusos de conexões protéticas. Isso porque o filme possui um baixo coeficiente de atrito e assim durante o torque do parafuso uma mais elevada pré-carga pode ser alcançada.

Os modelos inicialmente elaborados para explicar o comportamento tribológico dos filmes de carbono amorfo eram baseados em suas propriedades mecânicas e na energia de superfície (DIMIGEN e KLAGES, 1991).

Entretanto, mais recentemente GRILL (1999b) e JARROT *et al.*, (2003) demonstraram que em todos os meios o comportamento tribológico do filme de DLC é controlado por uma camada de transferência formada durante a fricção.

Quando um material é liberado de uma superfície, por desgaste ou abrasão, ele pode ficar solto na interface das superfícies deslizantes ou ainda se unir a uma das faces (a que não possui o recobrimento) formando assim a camada de transferência. Esta geralmente altera as propriedades tribológicas da superfície que a recebeu, como mostra

a figura 20, mudando as características tribológicas das superfícies deslizantes, já que um novo par de material se formou (HOLMBERG e MATTHEWS, 1994).

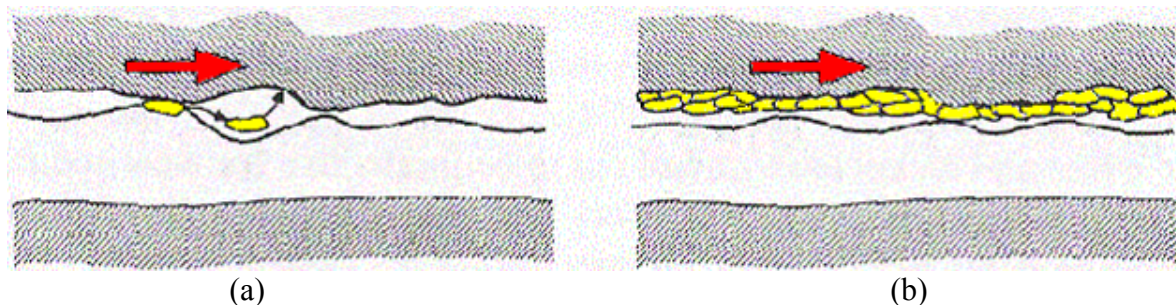


Figura 20 – Formação da camada de transferência a) material que se desprende de uma das superfícies; b) material se aderindo a outra superfície.

LIU *et al.* (1996) demonstraram pelo método Raman que a camada de transferência é semelhante ao carbono hibridizado sp^2 (grafite). Os autores argumentam que a formação da camada de transferência é devido ao desprendimento de hidrogênio da superfície, causado pelo aquecimento localizado devido a fricção, desestabilizando as ligações sp^3 . Sob uma determinada carga, uma deformação por cisalhamento pode ocorrer, transformando as ligações sp^3 (típicas do diamante) em sp^2 (típicas do grafite).

Já GRILL (1997) afirma que tal camada de transferência é formada pela transformação induzida por fricção da camada mais superficial do filme DLC em um material de baixa tensão de cisalhamento. Essa transformação que ocorre durante a fricção, pode ser o resultado do aquecimento resultante, causado por efeitos térmicos e de esforços gerados durante o deslizamento. A resistência ao cisalhamento da camada de transferência e sua adesão às superfícies deslizantes podem ser afetadas pelo meio, pela carga de contato e pela velocidade do deslizamento. Sendo assim, o hidrogênio pode favorecer a formação da camada de transferência e seu efeito lubrificante, porém a água e o oxigênio podem restringí-los.

Os valores encontrados por DONNET (1997) para o coeficiente de atrito do DLC no vácuo variava de 0,007 a 0,4 enquanto que no ar ambiente em uma umidade relativa de $20\% < RH < 60\%$ variou de 0,05 a 1,00. Entretanto, o mais comum é que esses valores oscilem entre 0,007 a 0,02 no vácuo e 0,1 a 0,4 em ar ambiente. Essas alterações no valor do coeficiente de fricção são causadas pelas variações na estrutura e composição dos filmes (GRILL, 1999a).

O hidrogênio passiva as ligações insaturadas nos filmes de DLC hidrogenados permitindo apenas uma fraca interação entre o DLC e seu par, ou seja, a superfície na qual faz o deslizamento. Quando o hidrogênio é perdido através do aquecimento, as ligações agora insaturadas proporcionam uma forte interação entre as superfícies em contato, resultando em um aumento da fricção em vácuo, similar a reportada tanto para o diamante quanto para o grafite. Foi demonstrado que a remoção do hidrogênio através do aquecimento do filme acima de 550°C causou um aumento do coeficiente de atrito no vácuo. Recentemente também foi demonstrado que para se obter baixo coeficiente de atrito no vácuo é necessário um conteúdo de hidrogênio maior do que 40% (GRILL, 1997).

Segundo GRILL e MEYERSON (1994) para que um filme seja considerado como uma camada protetora é necessário que este tenha boa adesão ao substrato, podendo assim demonstrar uma elevada resistência ao desgaste ou abrasão. É importante que essa força adesiva seja maior do que a tensão interna do filme, evitando assim a delaminação.

Uma boa adesão dos filmes de DLC foi verificada em substratos de silício, quartzo, carbono, titânio. Porém em outros, como os de aço, houve uma pobre adesão sendo necessária a utilização de uma intercamada antes da deposição do filme, que pode ser de alumínio, silício ou cromo (GANGOPADHYAY *et al.*, 1997).

II.12 - Deposição dos filmes DLC

Segundo DAMASCENO (2002), há dois grupos de técnicas para deposição dos filmes DLC: a deposição física por vapor (PVD – physical vapor deposition) e a deposição química por vapor (CVD – chemical vapor deposition).

A deposição física por vapor (PVD) ocorre sem que haja alguma reação química na superfície do substrato ou na fase gasosa. Nessa categoria estão as técnicas de evaporação (resistiva e por feixe de elétrons) e sputtering (colisão).

Já as técnicas CVD são feitas com a utilização de materiais voláteis que reagirão quimicamente com outros gases, produzindo um sólido não volátil, que se depositará sobre o substrato. Estas podem ser exemplificadas por técnicas a base de filamento aquecido ou por técnica de deposição química assistida por plasma (PACVD), podendo este ser gerado por rádio frequência (rf-PACVD). Dentre os precursores usados para deposição de DLC na técnica PACVD estão os hidrocarbonetos em geral (acetileno, butano, metano) silano para silício, dentre outros gases (GRILL e MEYERSON, 1994).

A grande maioria das técnicas de deposição também utiliza algum tipo de bombardeamento iônico do filme durante a deposição fornecendo ao filme características de estrutura e densidade (GRILL e MEYERSON, 1994).

A tabela 2 (DAMASCENO, 2002) demonstra algumas técnicas de deposição dos filmes de DLC, citando também algumas características dos filmes resultantes, de acordo com o tipo de precursor (gasoso ou sólido) envolvido no processo.

Tabela 2 – Principais técnicas de deposição/produção dos filmes de carbono amorfo e algumas de suas características (DAMASCENO, 2002)

	Pressão (Torr)	Gases	Alvo sólido	Fonte de impurezas	Conteúdo de H (at. %)
<i>Processos partindo de gases hidrocarbonetos</i>					
PACVD	0,01-0,5	CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₆ H ₆ , C ₄ H ₁₀	-	Gases, paredes do reator.	10-40 (duro) 40-65 (macio)
Feixe (direto) de íons	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁵	CH ₄ , CO, CO ₂ , C ₂ H ₂ , C ₄ H ₁₀ -Ar	-	Filamento, gases, paredes do reator.	0-30
Íon plating	~0,1	C ₆ H ₆	-	Grade, gases, paredes do reator.	<1
Arco	~0,75		-	Gases, paredes do reator.	~1
<i>Processos partindo de carbono sólido</i>					
Sputtering	< 5x10 ⁻³	Ar, Ar ⁺ H ₂ , Ar ⁺ CH ₄	Grafite	Gases, paredes do reator, alvo.	<9
Sputtering por feixe de íons	< 10 ⁻³	Ar, Ar ⁺ H ₂	Grafite	Gases, paredes do reator, alvo.	<1
Laser ablation	< 10 ⁻⁶		Grafite	Pó, paredes do reator.	<1
Arco sob vácuo	10 ⁻⁴		Grafite	Alvo.	<1

III – Materiais e Métodos

Foram usados 27 parafusos sextavados de titânio para plataforma de conexões protéticas de 4,1 e 4,3 mm de diâmetro (lote 17316/041004), 24 conexões protéticas de titânio comercialmente conhecidas como munhão personalizado com plataforma de 4,1 mm para implantes de 5,0 mm de diâmetro de plataforma (lote 15004/260704) e 24 análogos de implante para conexão protética com diâmetro de plataforma de 4,1 mm de titânio (lote 16814/140904), todos da marca Neodent® Implante Osteointegrável, como mostram as figuras 21a (antes do torque) e a figura 21b (após ter sido efetuado o torque).

Os análogos de implante são componentes que têm as mesmas características dos implantes, diferindo destes por não apresentarem roscas externas que têm por função permitirem a fixação no osso. São usados em laboratório na etapa da fabricação do trabalho protético, como orientação ao técnico sobre as dimensões da plataforma do implante e também o seu posicionamento em boca.



Figura 21a – Componentes antes de receberem o torque



Figura 21b – Conjunto único após ter recebido o torque

Foram utilizados 27 parafusos divididos em 3 grupos de 9: grupo sem recobrimento (SR) – ou grupo controle, que não recebeu recobrimento, grupo DLC – que recebeu recobrimento com DLC e grupo DLC-Si – que recebeu recobrimento com DLC-Si.

Os parafusos que foram recobertos foram limpos previamente, ficando imersos em água deionizada em ebulição por 10 minutos e depois submetidos a 2 ciclos de ultrassom em álcool isopropílico P.A. (20 minutos no total). A secagem foi feita por ar comprimido.

Posterior à etapa de limpeza, foi realizada a deposição e para tal os parafusos foram fixados em um suporte de alumínio na posição vertical (figura 22). O suporte, por sua vez, foi colocado no interior do reator apoiado sobre o eletrodo (catodo) do sistema de deposição.



Figura 22 – Suporte utilizado para deposição de carbono amorfo nos parafusos

Após cada deposição o suporte foi lixado (lixa d'água 200 – 3M) e limpo (mesma seqüência usada para limpeza dos parafusos) para remoção de qualquer vestígio de recobrimento de DLC, antes da realização de nova deposição.

A técnica usada foi a deposição química a vapor assistida por plasma a rádio frequência (rf-PACVD) que consiste na deposição dos filmes a partir da decomposição/dissociação das moléculas de um gás em um reator que possui um

eletrodo alimentado por um gerador de rádio frequência. Ao se introduzir o gás no reator a uma pressão adequada ocorre a formação do plasma pela aplicação da rádio frequência, uma vez que, qualquer partícula no interior do reator que seja, eventualmente, portadora de carga será acelerada em direção ao eletrodo com a polaridade oposta. Os elétrons acelerados poderão colidir com as outras partículas neutras e, se houver energia cinética suficiente, ionizá-las, gerando assim íons e espécies neutras que irão bombardear o substrato e produzir o filme. A figura 23 apresenta um diagrama esquemático de um sistema de deposição por rf-PACVD (DAMASCENO *et al.*, 2002).

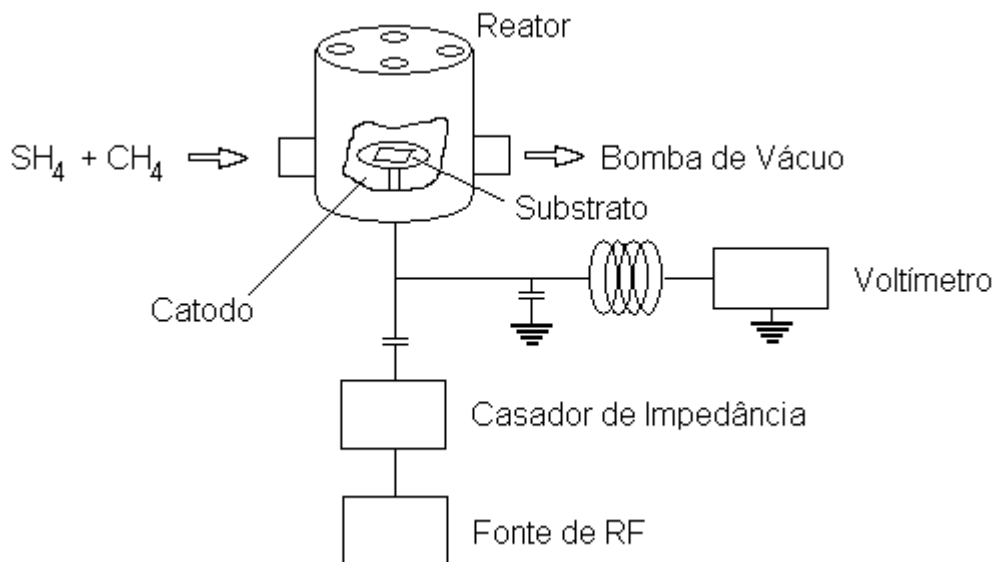


Figura 23 - Diagrama esquemático rf-PACVD (DAMASCENO *et al.*, 2002).

Também conhecida como descarga luminescente autopolarizada (self-bias glow discharge), a técnica rf-PACVD utiliza placas planas e paralelas e é muito utilizada tendo em vista que permite uma deposição mais uniforme do filme em todas as partes do substrato. Trata-se de uma técnica que possui como principais vantagens: a economia na obtenção dos recobrimentos, a possibilidade em se utilizar variados tipos e formas de substratos, e a sua alta taxa de deposição, além do que, também permite que sejam feitas reações químicas em temperaturas muito abaixo daquelas utilizadas em processos convencionais de CVD, evitando a grafitação do filme (GRILL e MEYERSON, 1994).

Na tabela 3 estão descritos os parâmetros de deposição.

Tabela 3 – Parâmetros de deposição utilizados.

Parâmetros de deposição					
Grupos	Temperatura Substrato	Pressão Reator	Tempo Deposição	Self-bias	Gás
DLC	Ambiente	0.015 Torr	240 min	-400 V	metano
DLC-Si	Ambiente	0.015 Torr	120 min	-400 V	95% metano e 5% silano

Previamente à deposição, em ambos os grupos foi realizado vácuo durante cerca de 5 horas. Após isto, foi realizado plasma de argônio por 20 minutos de forma a promover a remoção de óxidos e a limpeza superficial das amostras (figura 24).

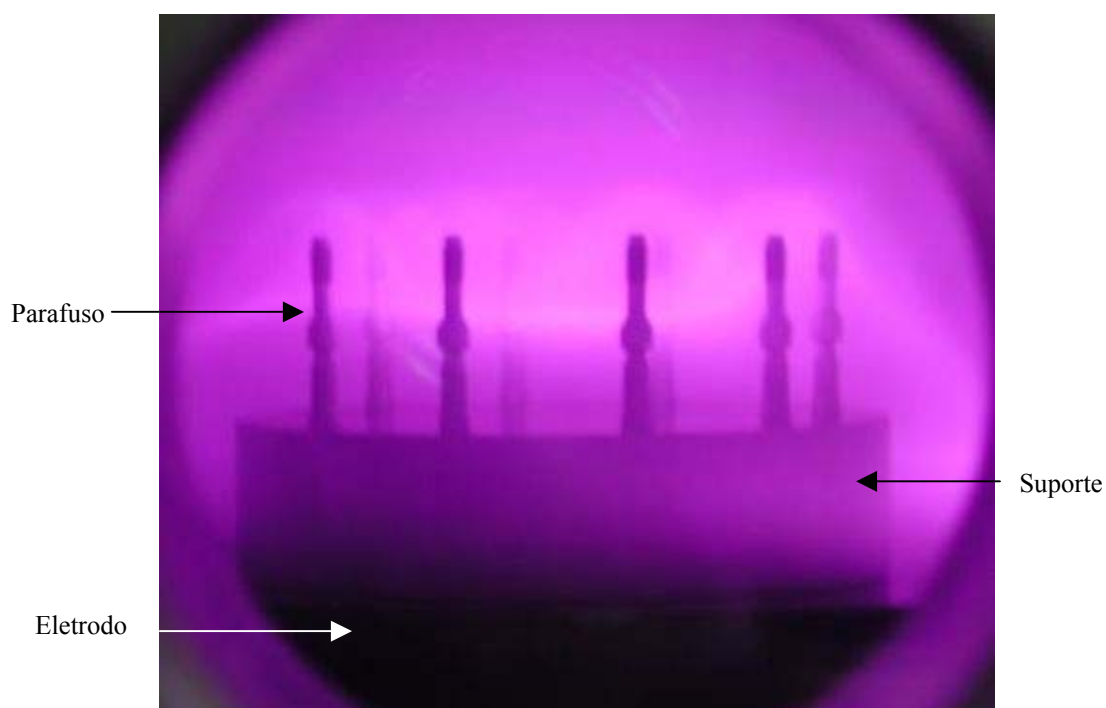


Figura 24 - Parafusos submetidos ao plasma de argônio na câmara de deposição.

Com objetivo de promover uma boa adesão dos filmes aos parafusos, foi utilizada uma intercamada de silício amorfo (a-Si) de cerca de 20 a 30 nm de espessura. A tabela 4 mostra os parâmetros utilizados no pré-tratamento das amostras.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no pré-tratamento dos parafusos que receberam recobrimento.

Parâmetros de pré-tratamento					
Tratamento	Temperatura	Pressão	Tempo	Bias	Gás
Limpeza a plasma	Ambiente	0.015 Torr	20 min	-800 V	argônio
Intercamada de adesão	Ambiente	0.015 Torr	3 min	-500 V	SiH ₄

Todas as etapas descritas foram executadas na câmara de deposição disponível no laboratório de Superfícies e Filmes Finos do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE (figura 25).



Figura 25 - Câmara de deposição utilizada no recobrimento dos parafusos.

De cada grupo foi separado um parafuso (sem ter sido submetido a torque) para avaliação em MEV, ficando assim disponíveis 24 parafusos para os ensaios de torque.

A etapa seguinte, após ter sido depositado o recobrimento, foi efetuar os torques de apertamento e afrouxamento. Para garantir a imobilidade do conjunto - análogo do implante, conexão protética e parafuso - durante as aplicações dos torques, o análogo foi

fixado em uma base cúbica de resina acrílica incolor de 24 X 24 mm. Foi feito um orifício em seu centro com 10mm de profundidade, usando uma broca com 4 mm de diâmetro. Cada análogo foi fixado com cola de secagem rápida (Araldite®) nesse orifício, ficando com cerca de 2 mm expostos para fora da base de resina acrílica, facilitando assim a verificação do perfeito encaixe da conexão protética. Ainda para assegurar que o conjunto se manteria imóvel, a base cúbica foi fixada em uma morsa, como mostra a figura 26.

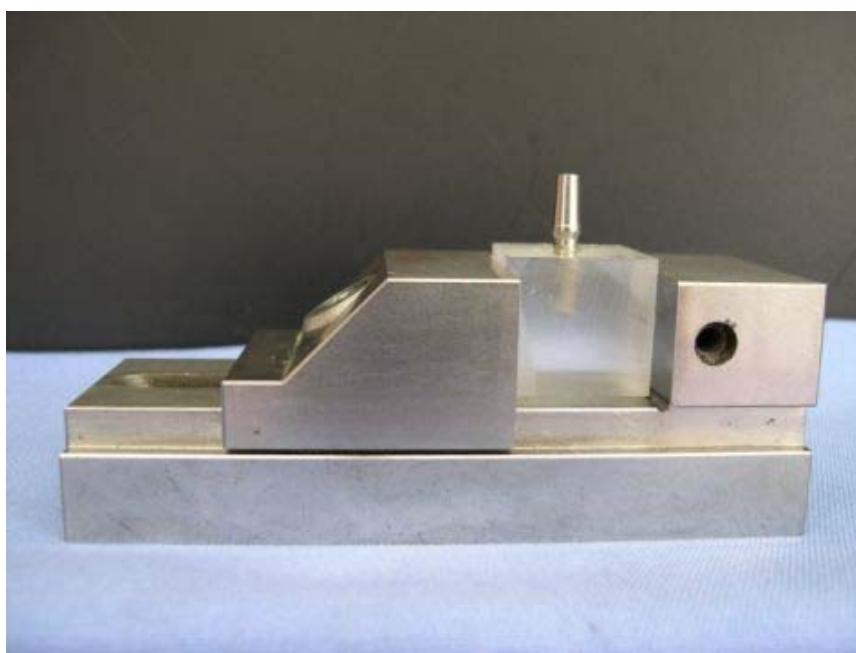


Figura 26 - Conjunto fixado em uma base cúbica de resina acrílica e esta em uma morsa.

Todos os ensaios de aplicação de torque foram executados pelo mesmo operador, na fábrica da Neodent em Curitiba. Primeiramente foram realizados alguns testes em um conjunto posteriormente desconsiderado (teste piloto) apenas com objetivo de treinamento no manejo do torquímetro digital. Estando o operador apto a manejar o aparelho, foram iniciados os testes.

O teste consistiu na aplicação de um torque de 32 N.cm (conforme definido pelo fabricante) em cada parafuso em seu análogo e conexão protética específicos, utilizando para isso uma chave hexagonal (1,2 mm, de aço inox temperado, Neodent®), conforme mostra a figura 27, adaptada em um torquímetro digital (Dillon®), mostrado na figura 28.



Figura 27 - Chave hexagonal usada para aplicação do torque no parafuso



Figura 28 - Torquímetro Digital Dillon® utilizado nos ensaios.

O conjunto número 1 de cada grupo foi escolhido, logo após ter recebido o 1º torque de apertamento, e removido da base cúbica de resina acrílica para posterior avaliação em MEV.

Logo após terem recebido o 1° torque de apertamento, os parafusos receberam o torque de afrouxamento e assim anotado o valor em N.cm. Esses procedimentos foram repetidos por 4 vezes em cada conjunto individualmente. Em um mesmo dia foram testados os grupos sem recobrimento e o grupo DLC. O grupo DLC-Si foi testado em outro dia, separadamente.

Mediante os valores dos torques de afrouxamento foram calculados os valores de pré-carga a partir da equação 8, como será mostrado no capítulo de Resultados, e assim foram feitas análises estatísticas.

Nesse trabalho, os testes estatísticos têm como objetivo comparar os efeitos na pré-carga média devido a dois fatores: recobrimento (com três níveis) e reutilização ou replicação (com cinco níveis). O fator reutilização é uma repetição da medida, ou seja, para cada parafuso (unidade amostral) há cinco repetições da medida da pré-carga.

Como existem dois fatores, a intenção inicial é avaliar se os fatores ou a interação entre eles causam um efeito ou uma variação na pré-carga média. A existência destes efeitos são testados estatisticamente comparando medidas de variância através do teste ANOVA .

Para analisar a pré-carga média foi utilizada uma função linear denominada Modelo (mostrada a seguir) dada pela soma de uma média geral, dos efeitos devido aos níveis de revestimento (Revest), de reutilização (T), dos efeitos da interação destes dois fatores e de um erro aleatório (MONTGOMERY, 1991). Estes efeitos podem ser positivos (representando aumento) ou negativos (representando diminuição) para a média. O erro aleatório representa a variabilidade intrínseca do processo, ou seja, as variabilidades durante as medições do torque devido a fatores não controlados como instrumento de medição, operador e metodologia.

Modelo:

$$y_{ijk} = \mu + Revest_i + T_j + (Revest T)_{ij} + e_{ijk} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, 3 \\ j &= 1, 2, 3, 4, 5 \\ k &= 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \end{aligned}$$

Onde:

y_{ijk} - k-ésima observação (pré-carga) do i-ésimo nível do fator Revest e j-ésimo nível do fator T.

μ - média geral

Revesti - efeito do i-ésimo nível do fator Revest.

Tj - efeito do j-ésimo nível do fator T.

(Revest T)ij - efeito da interação entre i-ésimo nível do fator Revest e j-ésimo nível do fator T.

eij - erro aleatório da k-ésima observação do i-ésimo nível do fator Revest e j-ésimo nível do fator T.

A partir dos resultados do teste ANOVA foi aplicado o teste DUNCAN para cada um dos fatores, ou seja, reutilização e recobrimento.

Para avaliação em MEV, um conjunto de cada grupo foi escolhido aleatoriamente, e após ter recebido o 5º torque de afrouxamento recebeu um 6º torque de apertamento de 32 N.cm, sendo posteriormente removido da base de resina acrílica. Os conjuntos escolhidos foram os de número 3, 4 e 5 dos grupos sem recobrimento, DLC e DLC-Si respectivamente.

O conjunto de número 2 do grupo DLC e o de número 6 do grupo de DLC-Si, após terem recebido o quinto torque de afrouxamento, foram removidos da base de resina acrílica para que seus componentes pudessem ser avaliados em MEV.

Todos os corpos de prova avaliados em MEV foram embutidos em resina epóxi (nº 331, Epotec, RJ, Brasil), e após transcorridas as 24 horas necessárias para sua completa polimerização foram desgastados no seu longo eixo até a metade, com a utilização de lixa d'água (3M, Brasil) na seguinte seqüência de granulação: 100, 220, 320, 400, 500 e 600. O polimento final foi dado com discos de pano e pasta de diamante até se obter uma superfície espelhada do metal, conforme mostra a figura 29.

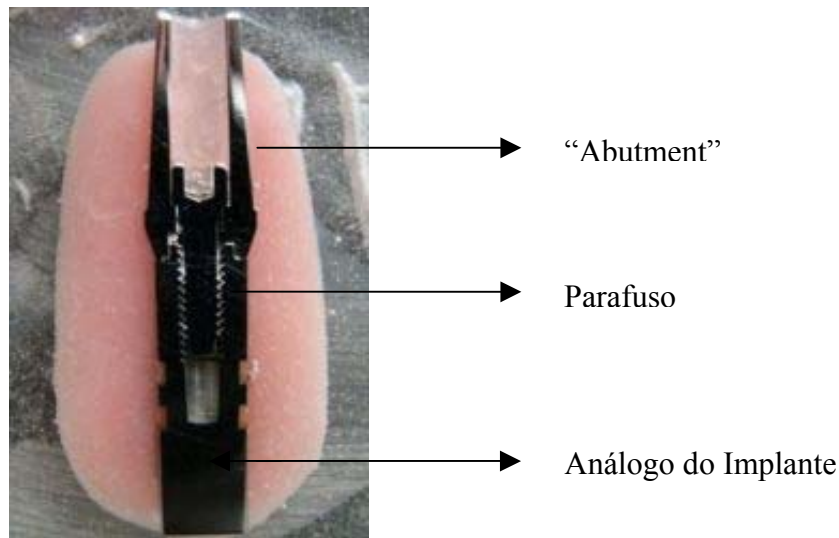


Figura 29 – Conjunto embutido, acabado e polido.

A avaliação em MEV dos parafusos consistiu na verificação se o recobrimento estava presente em toda sua superfície, antes de ser usado e após ter recebido o quinto torque de afrouxamento. Esse foi o critério usado para representar a uniformidade dos recobrimentos.

Foi estimada a espessura do recobrimento do grupo DLC e DLC-Si, sendo feitas seis medições para cada grupo, em parafusos que não receberam torque prévio. Após terem sido escolhidos os pontos nas fotografias do MEV de cada grupo, foi verificado o número de pixels contido no comprimento em micrômetros da régua de cada fotografia e assim feita uma regra de três determinando a espessura em micrômetros do recobrimento existente, mediante o número de pixels encontrado. Ou seja, se a régua tinha 10 micrômetros e isso equivalia a 10 pixels e tendo o recobrimento a espessura de 5 pixels, aplicando uma regra de três o valor do recobrimento naquele ponto é de 5 micrômetros.

Os conjuntos (conexão protética, parafuso e análogo do implante) foram analisados em MEV verificando o número total de filetes do parafuso em contato com a rosca do análogo do implante, bem como a localização exata desse contato e a comparação desse padrão após o primeiro e quinto torque de apertamento.

Em relação ao análogo do implante foi inspecionada em MEV a possível formação da camada de transferência após o sexto torque de afrouxamento.

Foi realizado EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) do parafuso, do análogo, da conexão protética e dos recobrimentos para análise de suas composições.

IV - Resultados

Os valores dos torques de afrouxamento estão nas tabelas 5, 6 e 7 e os valores obtidos para as pré-cargas, conforme descrito no capítulo de Materiais e Métodos, estão apresentados nas tabela 8, 9 e 10.

Tabela 5 - Medidas de afrouxamento dos parafusos do grupo sem recobrimento em N.cm.

Medidas de torque de afrouxamento dos parafusos sem recobrimento							
Parafuso	1	2	3	4	5	6	7
1o. Torque	29,6	26,0	28,2	30,2	27,2	29,0	24,7
2o. Torque	28,2	29,0	29,4	29,8	26,2	27,6	28,4
3o. Torque	27,8	28,8	29,6	30,0	28,0	27,6	28,0
4o. Torque	29,4	29,0	26,8	27,4	25,8	28,0	28,0
5o. Torque	27,2	27,4	29,8	27,0	24,9	28,1	28,2
Média	28,4	28,0	28,8	28,9	26,4	28,1	27,5

Tabela 6 - Medidas de afrouxamento dos parafusos do grupo DLC em N.cm

Medidas de torque de afrouxamento dos parafusos com DLC							
Parafuso	1	2	3	4	5	6	7
1o. Torque	26,2	23,5	25,4	25,3	24,1	27,0	25,8
2o. Torque	26,2	26,4	27,8	28,8	26,8	25,6	29,0
3o. Torque	22,5	27,4	27,6	26,4	23,9	25,1	26,8
4o. Torque	23,9	26,8	25,1	24,7	24,9	25,3	28,4
5o. Torque	25,4	25,6	27,8	23,9	28,4	26,0	27,8
Média	24,8	25,9	26,7	25,8	25,6	25,8	27,6

Tabela 7 - Medidas de afrouxamento dos parafusos do grupo DLC-Si em N.cm

Medidas de torque de afrouxamento dos parafusos com DLC-Si							
Parafuso	1	2	3	4	5	6	7
1o. Torque	27,0	27,8	25,7	25,4	27,1	24,1	25,4
2o. Torque	28,2	28,1	26,8	29,4	26,5	26,5	23,8
3o. Torque	26,5	28,7	25,5	24,5	28,6	26,7	25,1
4o. Torque	25,2	27,9	27,6	25,1	27,3	24,6	22,6
5o. Torque	25,7	26,9	28,1	26,2	27,2	25,8	25,1
Média	26,5	27,9	26,7	26,1	27,3	25,5	24,4

Tabela 8 – Valores das pré-cargas (em N) calculadas para o grupo sem recobrimento.

Pré-carga dos parafusos sem recobrimento								
Parafuso	1	2	3	4	5	6	7	Média
1o. Torque	188,50	471,24	298,45	141,37	376,99	235,62	573,34	326,50
2o. Torque	298,45	235,62	204,20	172,79	455,53	345,58	282,74	284,99
3o. Torque	329,87	251,33	188,50	157,08	314,16	345,58	314,16	271,52
4o. Torque	204,20	235,62	408,41	361,28	486,95	314,16	314,16	332,11
5o. Torque	376,99	361,28	172,79	392,70	557,63	306,31	298,45	352,31
Pré-carga média	279,60	311,02	254,47	245,04	438,25	309,45	356,57	

Tabela 9 – Valores das pré-cargas (em N) calculadas para o grupo DLC.

Pré-carga dos parafusos com DLC								
Parafuso	1	2	3	4	5	6	7	Média
1o. Torque	455,53	667,59	518,36	526,22	620,46	392,70	486,95	523,97
2o. Torque	455,53	439,82	329,87	251,33	408,41	502,65	235,62	374,75
3o. Torque	746,13	361,28	345,58	439,82	636,17	541,92	408,41	497,04
4o. Torque	636,17	408,41	541,92	573,34	557,63	526,22	282,74	503,78
5o. Torque	518,36	502,65	329,87	636,17	282,74	471,24	329,87	438,70
Pré-carga média	562,35	475,95	413,12	485,38	501,08	486,95	348,72	

Tabela 10 – Valores das pré-cargas (em N) calculadas para o grupo DLC-Si.

Pré-Carga dos parafusos com DLC-Si								
Parafuso	1	2	3	4	5	6	7	Média
1o. Torque	392,70	329,87	494,80	518,36	384,85	620,46	518,36	465,63
2o. Torque	298,45	306,31	408,41	204,20	431,97	431,97	644,03	389,33
3o. Torque	431,97	259,18	510,51	589,05	267,04	416,26	541,92	430,85
4o. Torque	534,07	322,01	345,58	541,92	369,14	581,19	738,27	490,31
5o. Torque	494,80	400,55	306,31	455,53	376,99	486,95	541,92	437,58
Pré-carga média	430,40	323,58	413,12	461,81	366,00	507,37	596,90	

Mediante as informações das tabelas 8, 9 e 10 foram obtidos gráficos relacionando a pré-carga com os torques de reutilização. As figuras 30, 31 e 32 apresentam as pré-cargas dos 5 torques (5 reutilizações) para cada tipo de recobrimento.

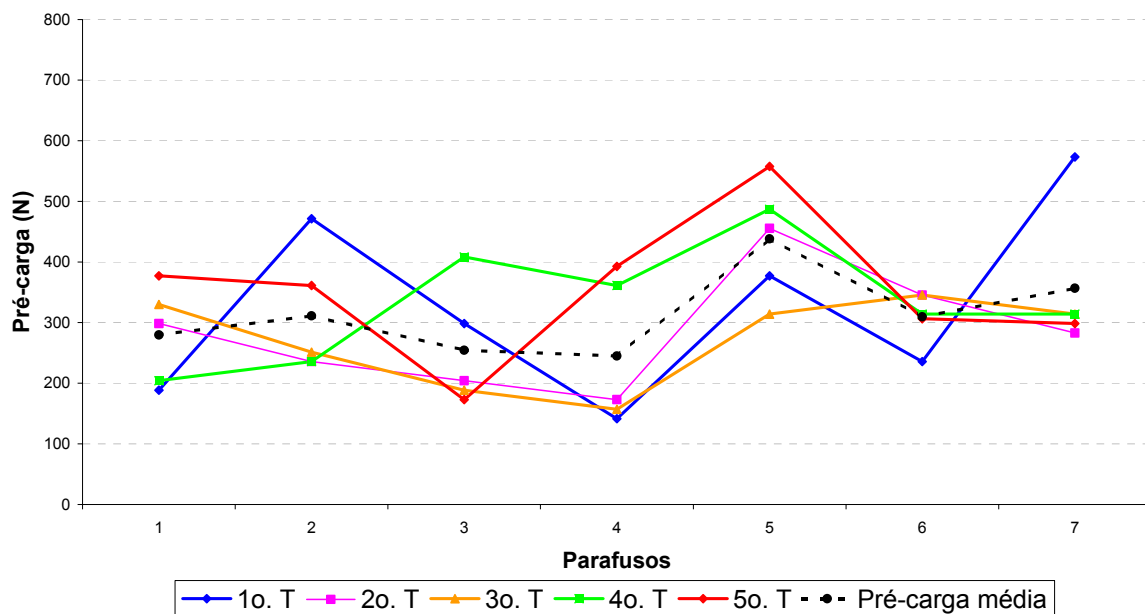


Figura 30 - Pré-carga de cada reutilização para cada parafuso do grupo sem recobrimento e valor médio.

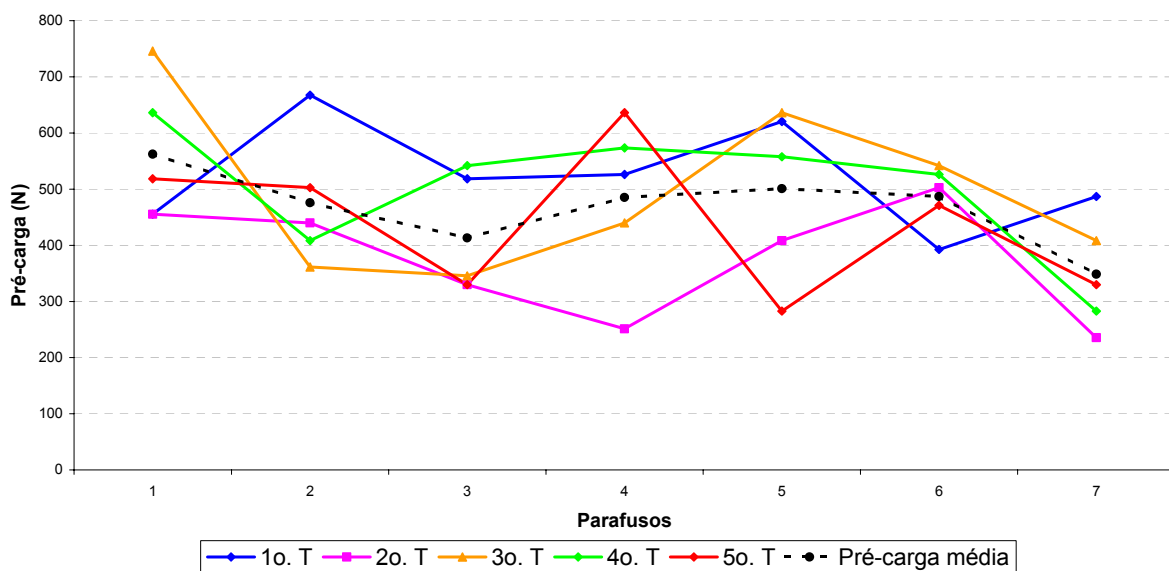


Figura 31 - Pré-carga de cada reutilização para cada parafuso do grupo DLC e valor médio.

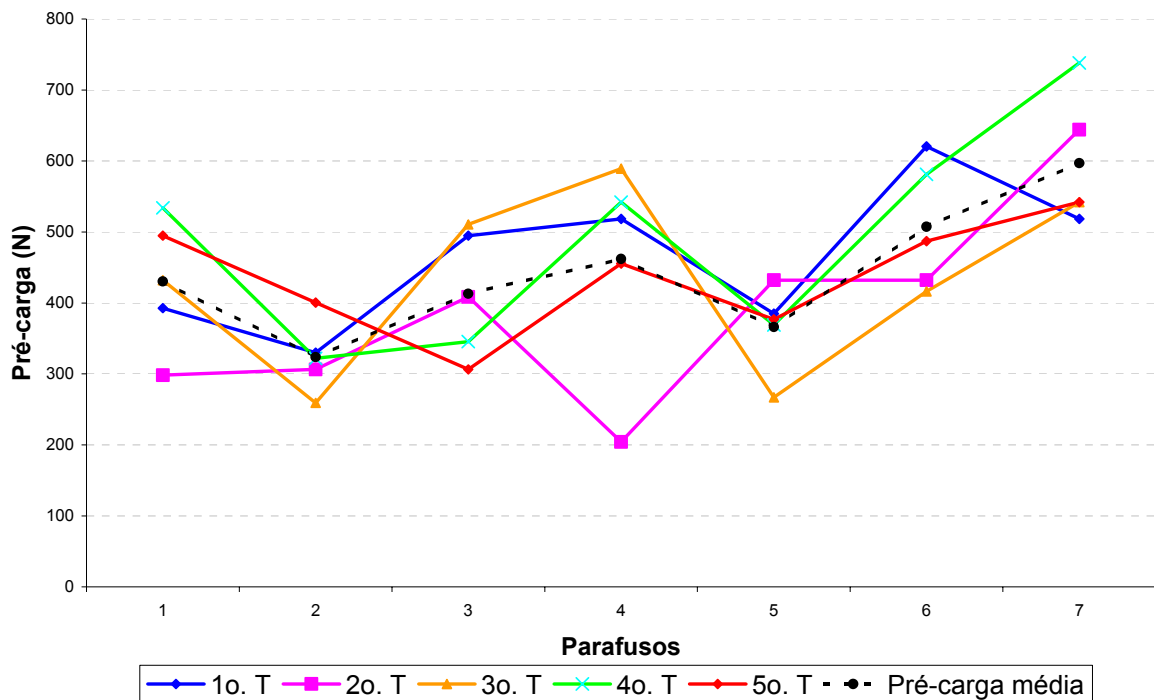


Figura 32 - Pré-carga de cada reutilização para cada reutilização do grupo DLC-Si e valor médio.

Tais gráficos sugerem a ausência de um padrão de comportamento sistemático do primeiro ao quinto torque, independente do grupo a que pertencem os parafusos.

Na tentativa de se definir se há a vantagem em se utilizar parafusos novos ou que já tenham recebido torques prévios, foram obtidos gráficos que apresentam as pré-cargas para a primeira e quinta utilização, bem como para a média geral dos 5 torques, conforme mostram as figuras 33, 34 e 35.

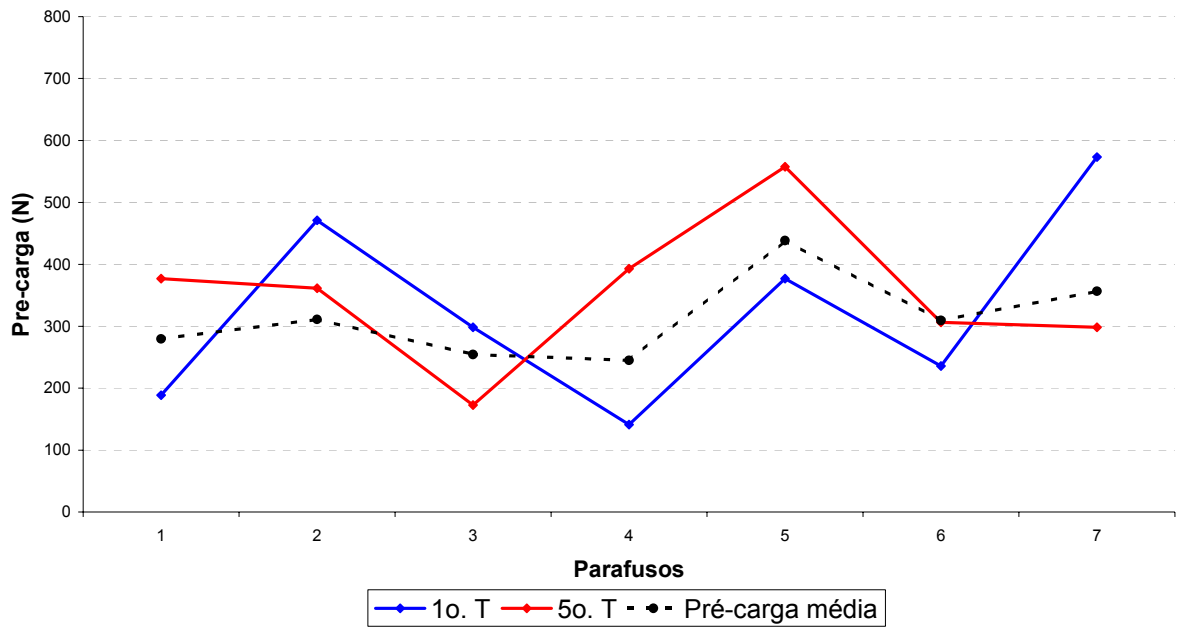


Figura 33 - Pré-carga para o primeiro e quinto torque de cada parafuso do grupo sem recobrimento e valor médio das 5 reutilizações.

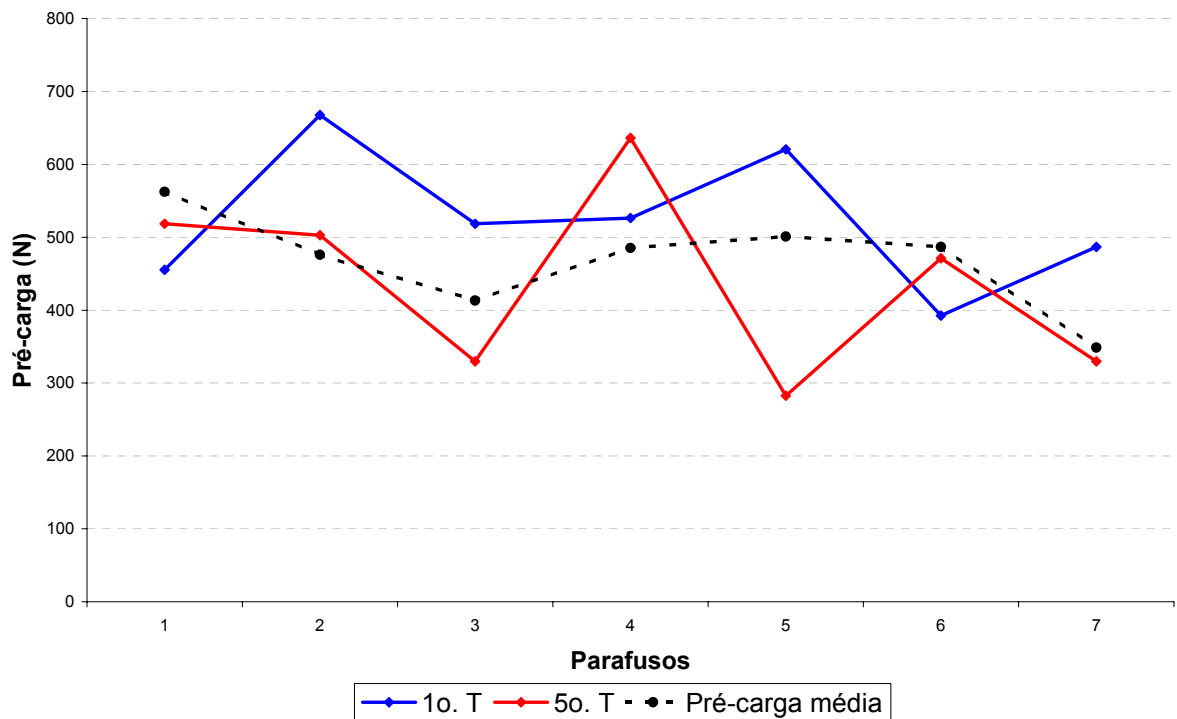


Figura 34 - Pré-carga para o primeiro e quinto torque de cada parafuso do grupo DLC e valor médio das 5 reutilizações.

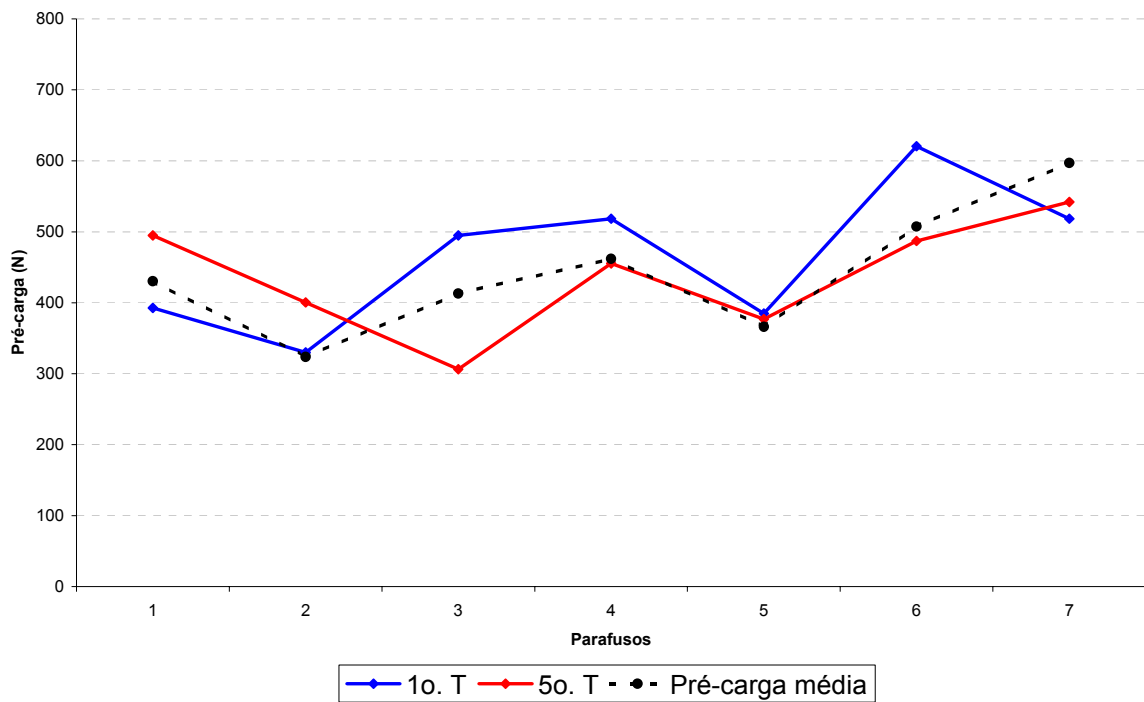


Figura 35 - Pré-carga do primeiro e quinto torque para cada parafuso do grupo DLC-Si e valor médio das 5 reutilizações.

Também foi verificado que não existe um comportamento sistemático nas pré-cargas calculadas no primeiro e quinto torques, independente do grupo a que pertencia o parafuso.

A figura 36 mostra a pré-carga média dos 5 torques para cada corpo de prova, dependendo do tipo de recobrimento recebido.

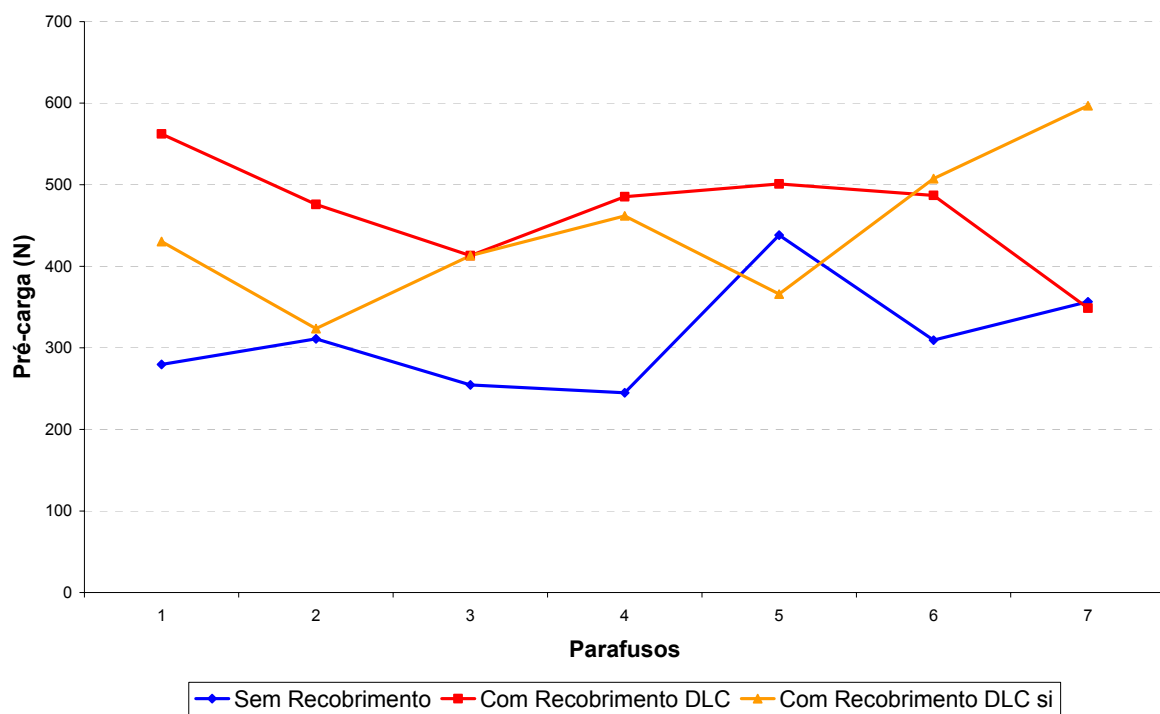


Figura 36 - Pré-carga média para cada grupo em relação à cada parafuso.

Já a figura 37 mostra o comportamento da pré-carga média para os 3 tipos de recobrimento

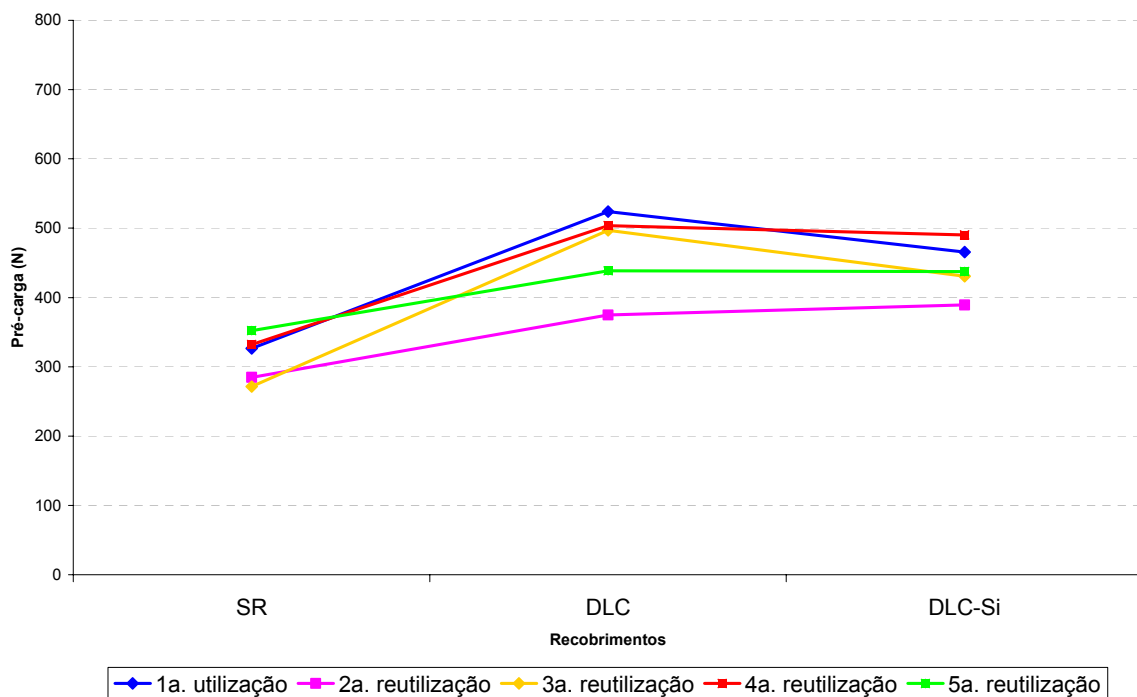


Figura 37 - Pré-carga média da reutilização por tipo de recobrimento

A tabela 11 demonstra as estatísticas descritivas, ou seja, o valor máximo e mínimo, além da média e mediana das pré-cargas para cada tipo de recobrimento.

Tabela 11: Estatísticas descritivas mostrando a variabilidade das pré-cargas

<i>Tipo de Recobrimento</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>
SR	141,37	573,34	313,49	314,16
DLC	235,62	746,13	467,65	471,24
DLC Si	204,20	738,27	442,74	431,97

Mediante as informações da figura 37 e da tabela 11 sugere-se uma ordenação decrescente em relação a pré-carga média nos 3 grupos; com recobrimento DLC, com recobrimento DLC-Si e sem recobrimento, respectivamente. No entanto, esta análise não é conclusiva, sendo necessário um teste estatístico que demonstre se estas diferenças são significativas.

IV.1 - Testes Estatísticos

O quadro resumo do teste ANOVA está representado na tabela 12.

Tabela 12 - Resultado da ANOVA

	Df	Soma Sq	Média Sq	F valor	Pr(>F)
T	4	117027.66	29256.915	2.8216264	0.0310849526
Revest	2	479419.56	239709.779	8.2861678	0.0005770831
T:revest	8	59472.59	7434.074	0.7169648	0.6760000000
Resíduos	72	746554.50	10368.813	0.0000000	0.0000000000

Onde as linhas representam as estatísticas referentes a cada fator e as colunas são representadas por:

Df – graus de liberdade

Soma Sq.- é a soma quadrática das diferenças entre a média de cada nível de um referido fator e a média geral.

Média Sq – é o quadrado médio resultante da Soma Sq dividido pelo respectivo Df.

F valor – é o valor da estatística F referente a cada fator e é resultante da divisão da Média Sq do fator pela Média Sq do resíduo.

Pr ($>F$) é a probabilidade de se obter um valor maior que F valor, também conhecido como p-valor.

Considerando um nível de significância de 5%, há evidência estatística de que pelo menos uma das médias difere tanto para os diferentes níveis de reutilização como de recobrimento (p-valor $< 0,05$). A interação entre reutilização e recobrimento não é significativa, ou seja, reutilização e recobrimento não interagem na pré-carga média, já que p-valor (0,676) foi maior do que 0,05.

Na tabela 13 estão as médias das pré-cargas de acordo com as reutilizações e os recobrimentos, onde se verifica que a segunda reutilização (torque 2) apresenta a menor média e a quarta reutilização (torque 4) apresenta a maior média. Considerando o tipo de recobrimento a menor média é a do nível sem recobrimento.

Tabela 13 - Média das pré-cargas de acordo com as reutilizações e os recobrimentos

Torque	DLC	DLC-Si	SR	Média Geral
1	523.9728	465.6289	326.5012	438.7010
2	374.7471	389.3331	284.9873	349.6892
3	497.0448	430.8470	271.5234	399.8051
4	503.7768	490.3129	332.1112	442.0670
5	438.7010	437.5790	352.3072	409.5290
Média Geral	467.6485	442.7402	313.4861	

Para verificar quais as médias que diferem por nível de reutilização e recobrimento separadamente aplicou-se o teste DUNCAN para cada um dos fatores (NETER *et al.*, 1990). O objetivo deste teste é a comparação das médias duas a duas.

Na tabelas 14 estão os valores de referência para comparação dos níveis de reutilização e na tabela 15 o resultado do teste DUNCAN para esse fator .

Tabela 14 - Valores de referência para o teste DUNCAN para níveis de reutilização.

Valores de referência	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$
R2	62,88	82,44
R3	66,22	85,77
R4	68,44	88,44
R5	69,77	90,22

Tabela 15 - Resultado do teste DUNCAN para as reutilizações

Reutilização	Diferenças entre pré-cargas médias	Significância
T4-T1	3,37 < R ₂	
T4-T5	32,54 < R ₃	
T4-T3	42,26 < R ₄	
T4-T2	92,38 > R ₅	* ****
T1-T5	29,17 < R ₂	
T1-T3	38,90 < R ₃	
T1-T2	89,01 > R ₄	* ****
T5-T3	9,72 < R ₂	
T5-T2	59,84 < R ₃	
T3-T2	50,12 < R ₂	

* Significante ao nível de 5%

**** Significante ao nível de 1%

Observa-se na tabela 15 que há diferença significativa de T2 (menor pré-carga média) em relação a T4 e T1 (maiores pré-carga média) tanto ao nível de 1% quanto ao de 5%. As demais combinações de pares não diferem significativamente.

Os valores de referência para o teste DUNCAN para o fator recobrimento estão na tabela 16.

Tabela 16 - Valores de referência para o teste DUNCAN para níveis de recobrimento

Valores de referência	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$
R2	48,70	63,85
R3	51,29	66,44

A tabela 17 mostra o resultado do teste DUNCAN para os níveis de recobrimento, onde se observa que não há diferença significativa entre os grupos com recobrimento, mas quando comparados os grupos com recobrimento com o grupo sem recobrimento há diferença estatisticamente significativa tanto para o nível de 1% quanto 5%.

Tabela 17 - Resultado do teste DUNCAN para os recobrimento

Recobrimento	Diferenças entre pré-cargas médias	Significância
DLC_DLC si	24,91 < R ₂	
DLC_SR	154,16 > R ₃	* ****
DLC Si_SR	129,25 > R ₂	* ****

* Significante ao nível de 5%

**** Significante ao nível de 1%

IV.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Conforme mencionado no capítulo de Materiais e Métodos, foram realizadas análises por MEV dos parafusos antes de serem utilizados e após o quinto torque de afrouxamento, dos análogos e dos conjuntos após primeiro e sexto torque de apertamento.

Em todas as imagens obtidas por MEV tanto o recobrimento de DLC quanto o de DLC-Si aparecem de cor clara (quando comparados com os demais materiais) devido à propriedade do carbono amorfo emitir muitos elétrons secundários.

Foram obtidas imagens do conjunto (análogo – parafuso – “abutment”) com aumento de 18X, 30X e 200X. No aumento de 18X foi verificado que todos os filetes da rosca do parafuso estavam em contato com seu sítio no análogo, tanto no primeiro torque quanto no sexto torque, independente do grupo a que pertencia o parafuso, conforme ilustra a figura 30.

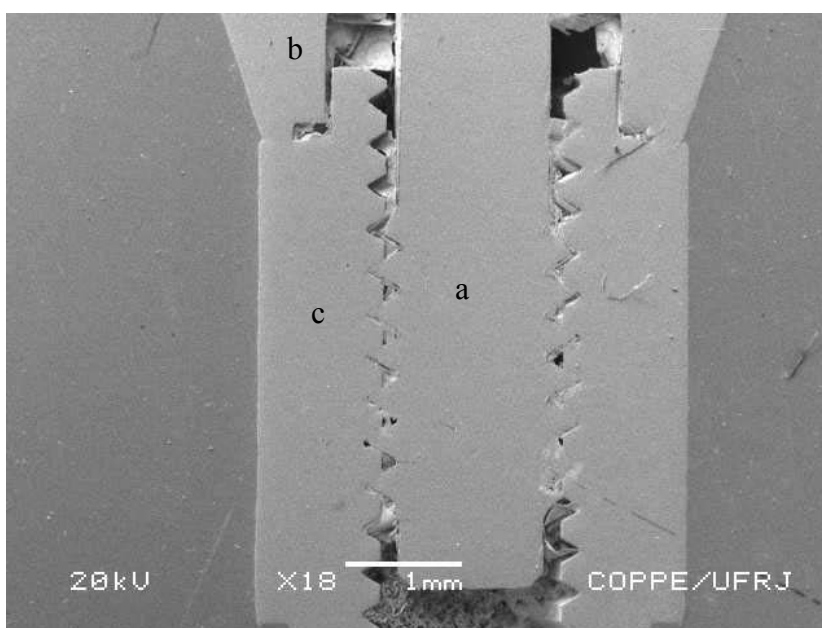


Figura 30 - Conjunto demonstrando contato em todas os filetes da rosca do parafuso (a) em seu sítio no análogo (c). O “abutment” está representado por (b).

Para verificar a exata localização desse contato foram obtidas imagens em 80X de aumento do conjunto (figura 31), demonstrando que este contato ocorre sempre na

parte superior do filete da rosca do parafuso em todos os três grupos, tanto no primeiro torque quanto no sexto.

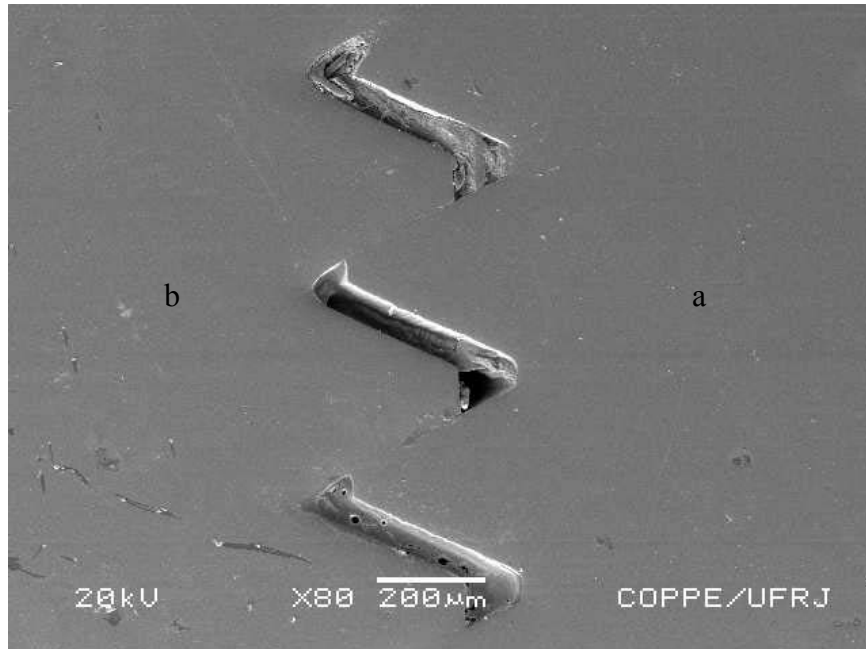


Figura 31 - Contato na parte superior do filete da rosca do parafuso. (a) parafuso com recobrimento de DLC e (b) análogo de implante.

Foram também obtidas imagens de 200X de aumento da região de contato dos filetes da rosca do parafuso e seu sítio no análogo, sugerindo que em alguns conjuntos houve uma superfície de contato mais efetiva (figura 32) e em outros menos efetiva (figura 33), independente de haver ou não recobrimento e de ser o primeiro ou o sexto torque de apertamento.

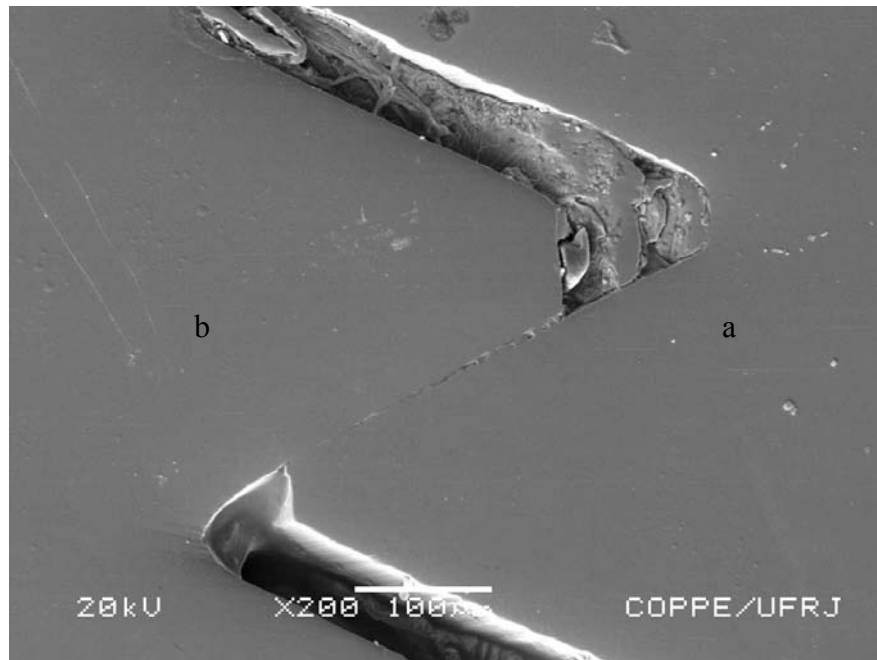


Figura 32 – Parafuso sem revestimento (a) e análogo de implante (b).

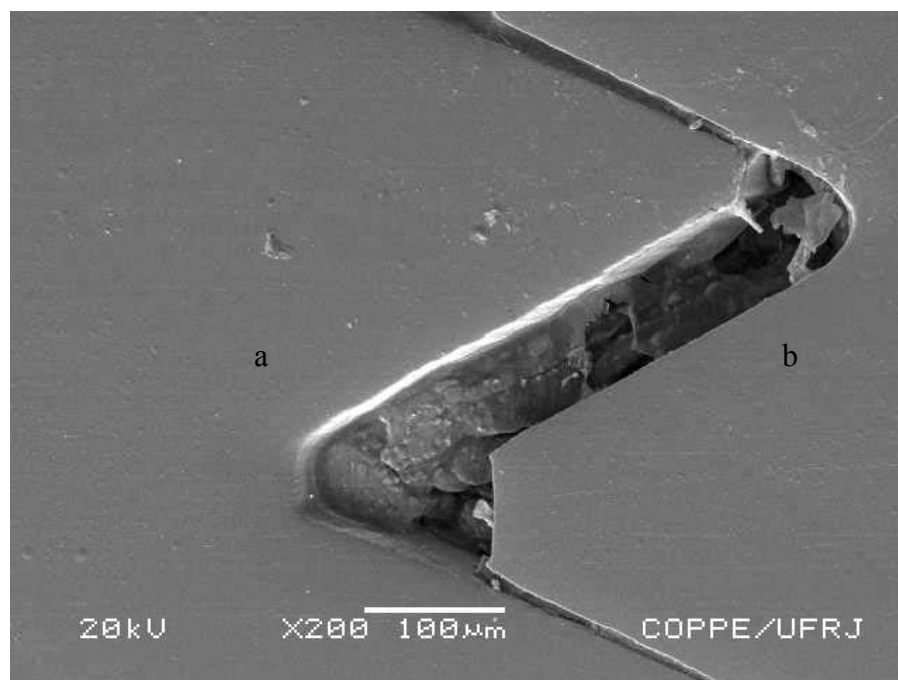


Figura 33 - Parafuso com revestimento de DLC-Si (a) e análogo de implante (b).

O critério usado para definir a uniformidade dos revestimentos nos parafusos foi a presença ou ausência destes antes de o parafuso receber o primeiro torque e após ter recebido o sexto torque de apertamento.

Observou-se que o recipiente usado durante o transporte dos parafusos do grupo DLC para serem testados na fábrica da Neodent, ficou com um resíduo de cor preta sugerindo que houve delaminação do recobrimento por falta de uma boa adesão deste nos parafusos.

Visualmente os parafusos do grupo DLC apresentaram um recobrimento pouco uniforme, com áreas sem DLC. Isso foi confirmado quando se levou o parafuso com DLC ainda sem torque, e após o quinto torque de afrouxamento ao MEV, conforme mostram as figuras 34 e 35, respectivamente.

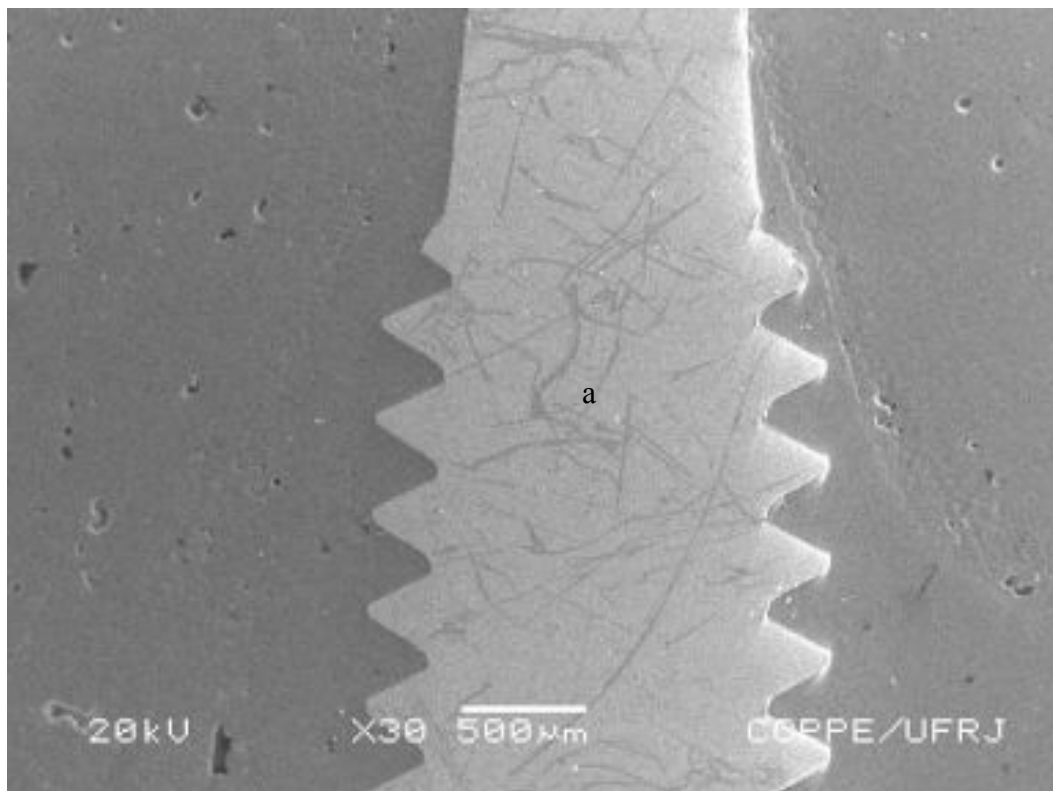


Figura 34 – Parafuso (a) com recobrimento de DLC presente na superfície do lado direito, mas não presente na superfície do lado esquerdo (parafuso sem ter recebido torque).

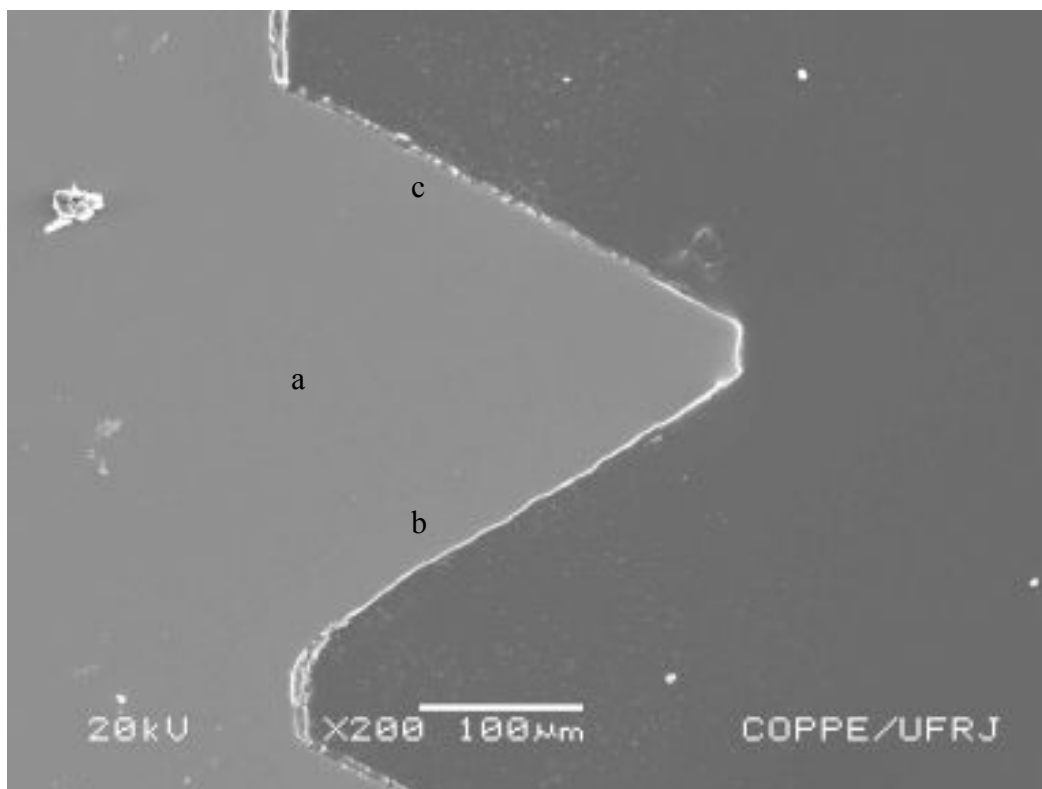


Figura 35 – Filete da rosca do parafuso com recobrimento de DLC (a) após ter recebido 5 torques de afrouxamento, demonstrando uma região com recobrimento uniforme (b) e outra com recobrimento pouco uniforme (c).

Já os parafusos de DLC-Si apresentaram uma maior uniformidade, já que visualmente demonstravam uma única cor (preta). Durante o transporte, nas mesmas condições em que foram levados os parafusos do grupo DLC, não foi observado nenhum resíduo do recobrimento no recipiente, sugerindo que houve melhor adesão do filme nos parafusos. Quando levados ao MEV esse padrão de uniformidade foi confirmado tanto no parafuso de DLC-Si sem ter recebido torque, quanto naqueles que receberam 5 torques de afrouxamento, como mostram as figuras 36 e 37, respectivamente.

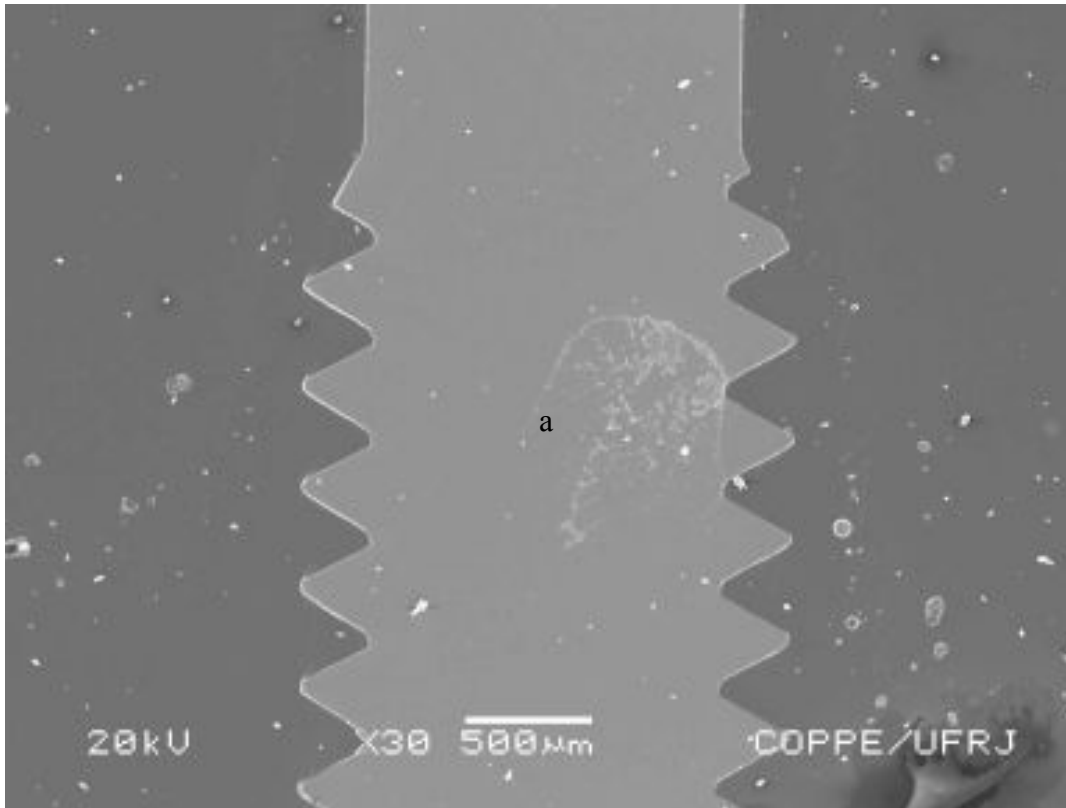


Figura 36 – Parafuso (a) sem ter recebido torque, com recobrimento de DLC-Si em toda a superfície.

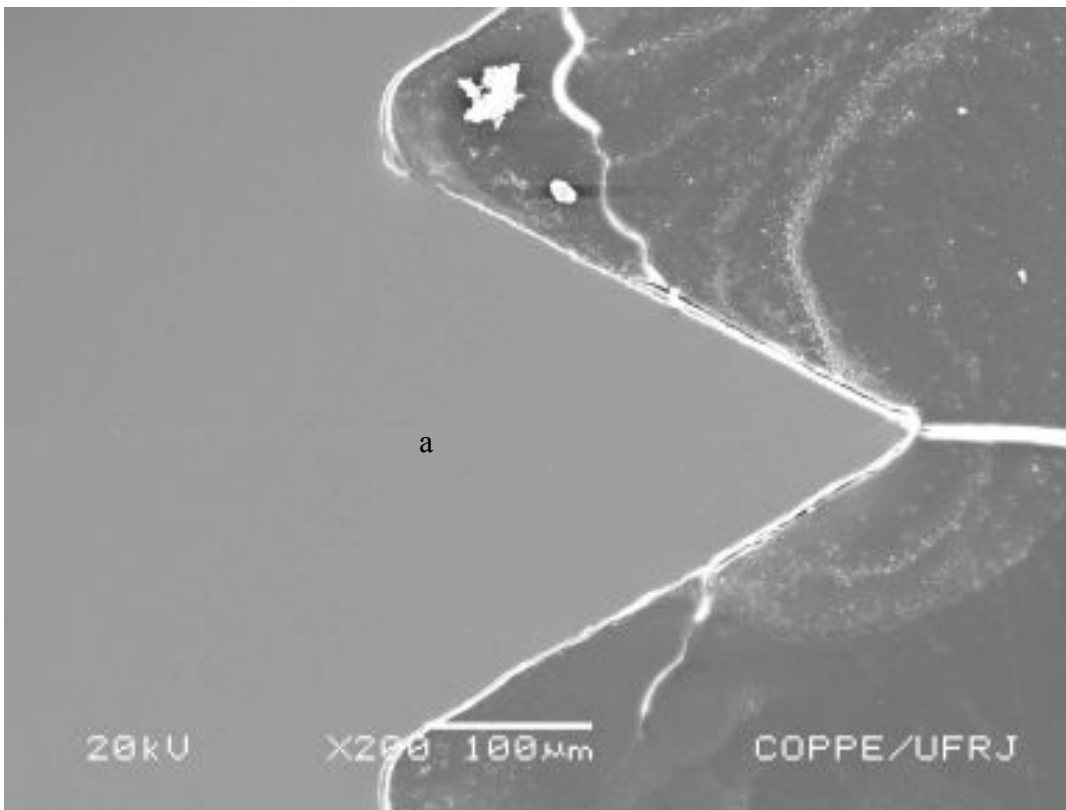


Figura 37 – Filete de rosca do parafuso com DLC-Si após ter recebido 5 torques de afrouxamento (a), demonstrando a presença do recobrimento em toda a superfície.

A figura 38 demonstra o aspecto dos parafusos após terem recebido o quinto torque de afrouxamento.



Figura 38 – Aspecto dos parafusos após quinto torque de afrouxamento: (a) sem recobrimento, (b) DLC e (c) DLC-Si.

Os pontos selecionados para a medição da espessura do recobrimento para o grupo DLC estão evidenciados nas figuras 39 e 40 e os pontos para o grupo DLC-Si estão nas figuras 41, 42 e 43.

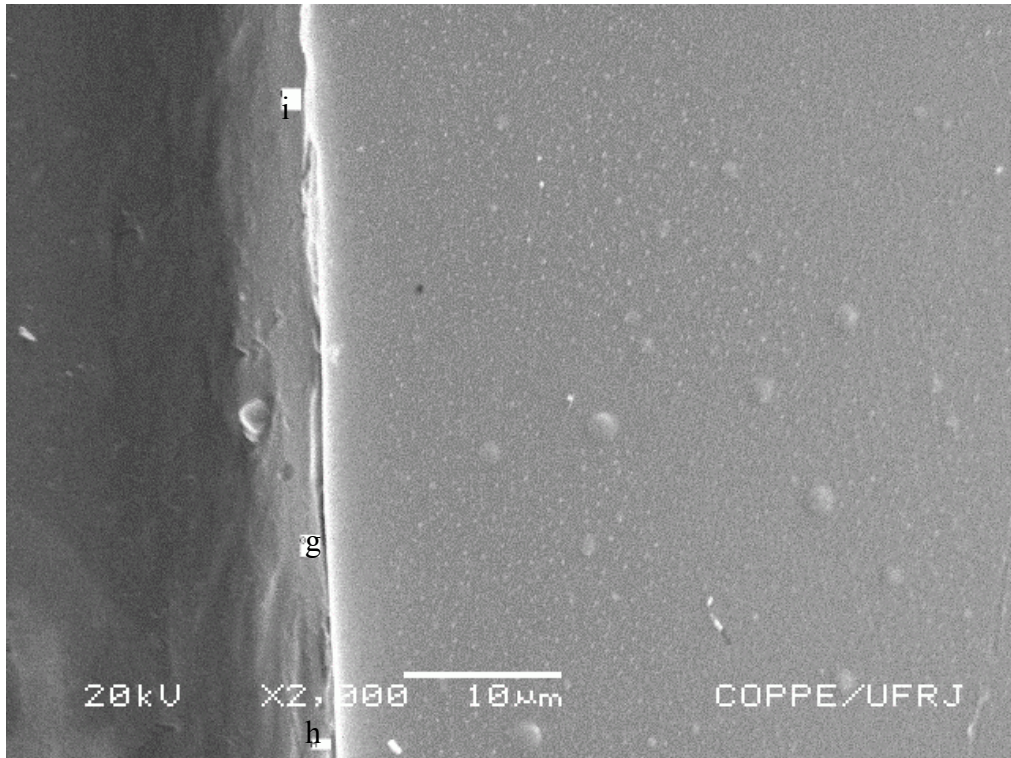


Figura 39 – Pescoço do parafuso do grupo DLC (lado direito) com os pontos (g, h, i) para medição da espessura do recobrimento.

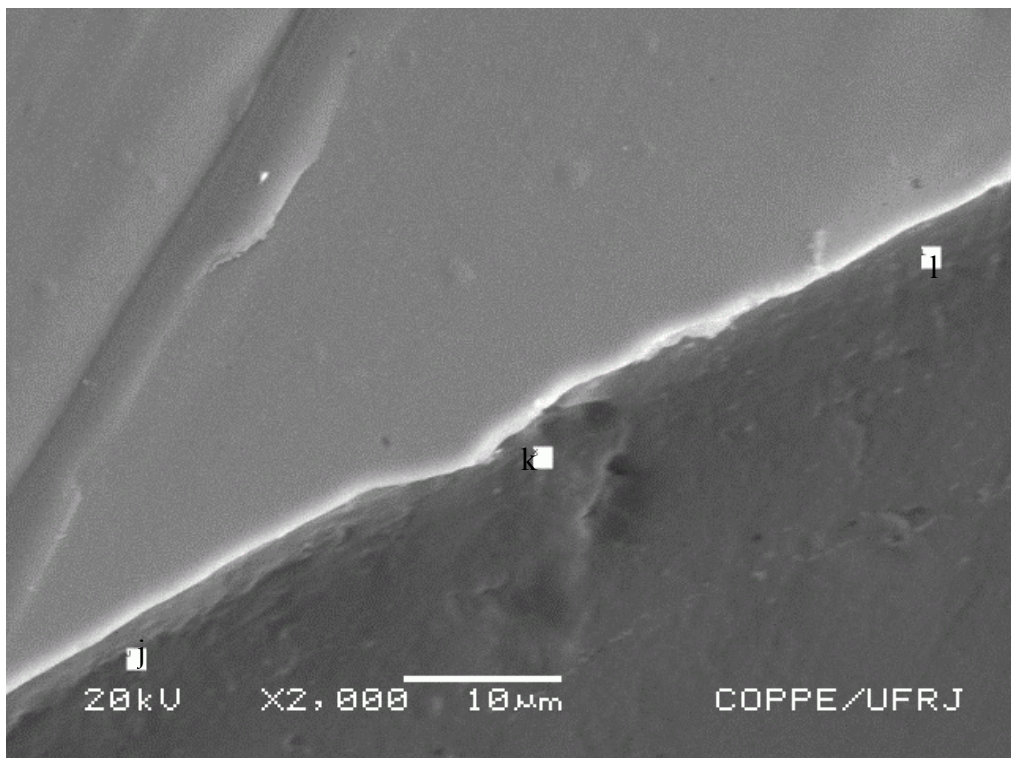


Figura 40 - Parte do filete de rosca do parafuso do grupo DLC (região superior da figura) com os pontos (j, k, l) para medição da espessura do recobrimento.

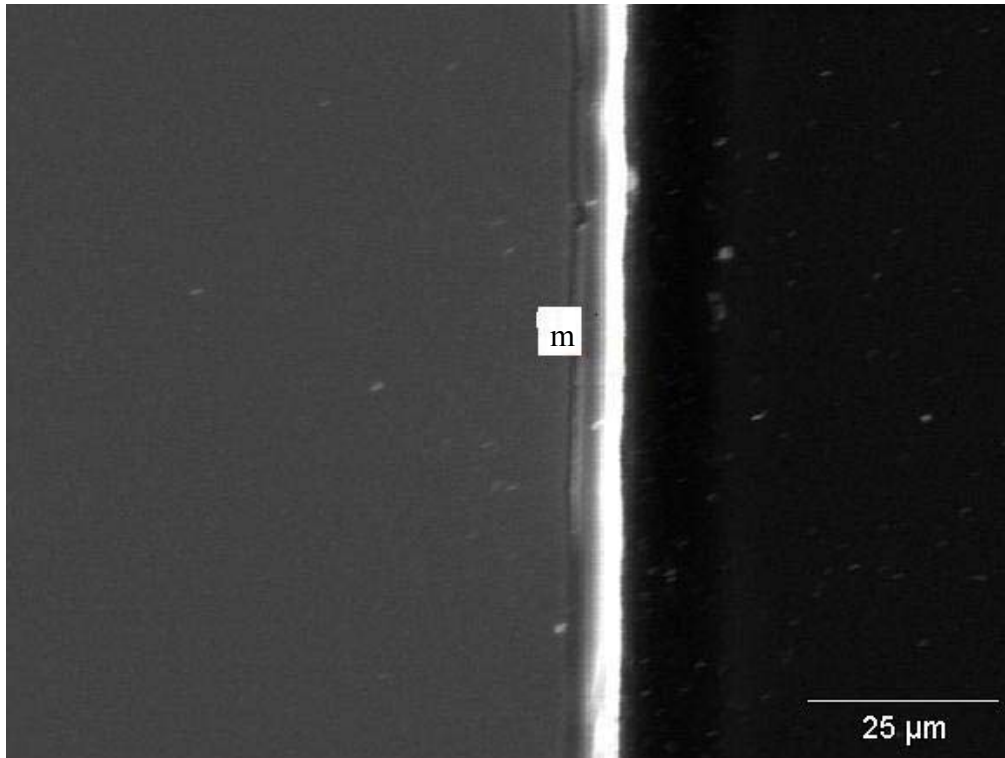


Figura 41 - Pescoço do parafuso do grupo de DLC-Si (lado esquerdo) com o ponto (m) para medição da espessura do recobrimento.

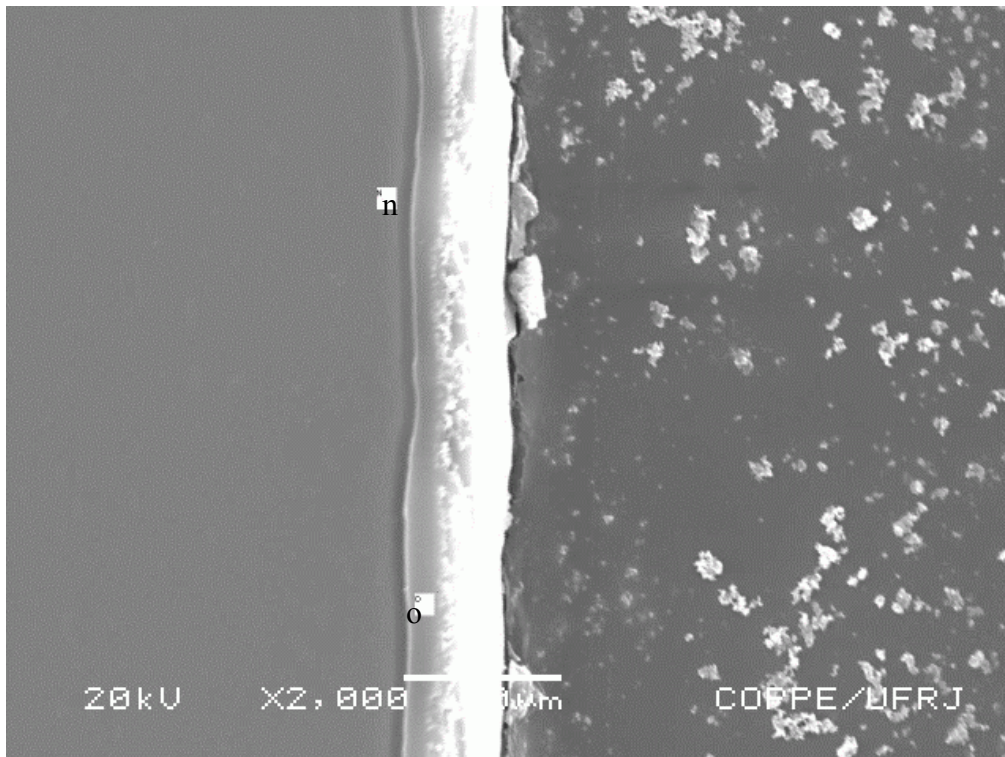


Figura 42 - Pescoço do parafuso do grupo de DLC-Si (lado esquerdo) com os pontos (n, o) para medição da espessura do recobrimento.

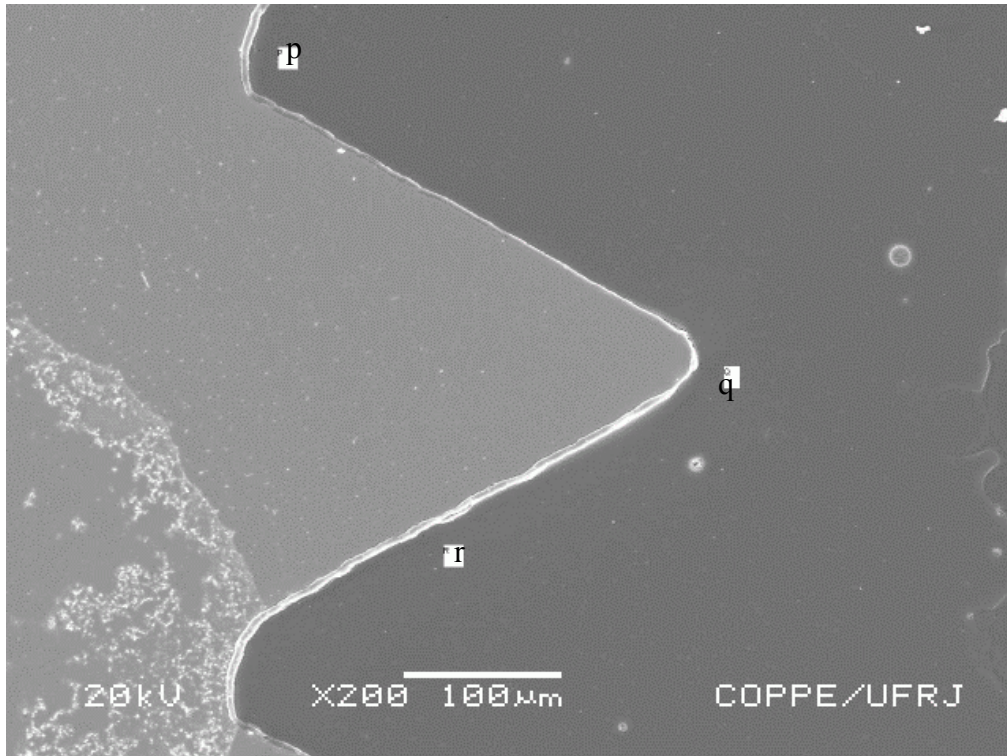


Figura 43 - Filete de rosca do parafuso do grupo de DLC-Si (lado esquerdo) com os pontos (p, q, r) para medição da espessura do recobrimento.

Na tabela 18 estão os valores encontrados da espessura do recobrimento para o grupo DLC e DLC-Si.

Tabela 18 - Valores da espessura (em microns) do recobrimento do grupo DLC e DLC-Si.

	DLC			DLC-Si		
Pontos	g	h	i	m	n	o
Pescoço	0,35	0,55	0,70	2,50	4,15	3,85
Pontos	j	k	l	p	q	r
Rosca	0,46	0,93	0,43	6,50	6,00	4,72

Foi realizado EDS para o análogo, parafuso e “abutment” demonstrando que todos são confeccionados a partir de uma liga de titânio (Ti-6Al-4V), conforme mostram as figuras 44, 45 e 46.

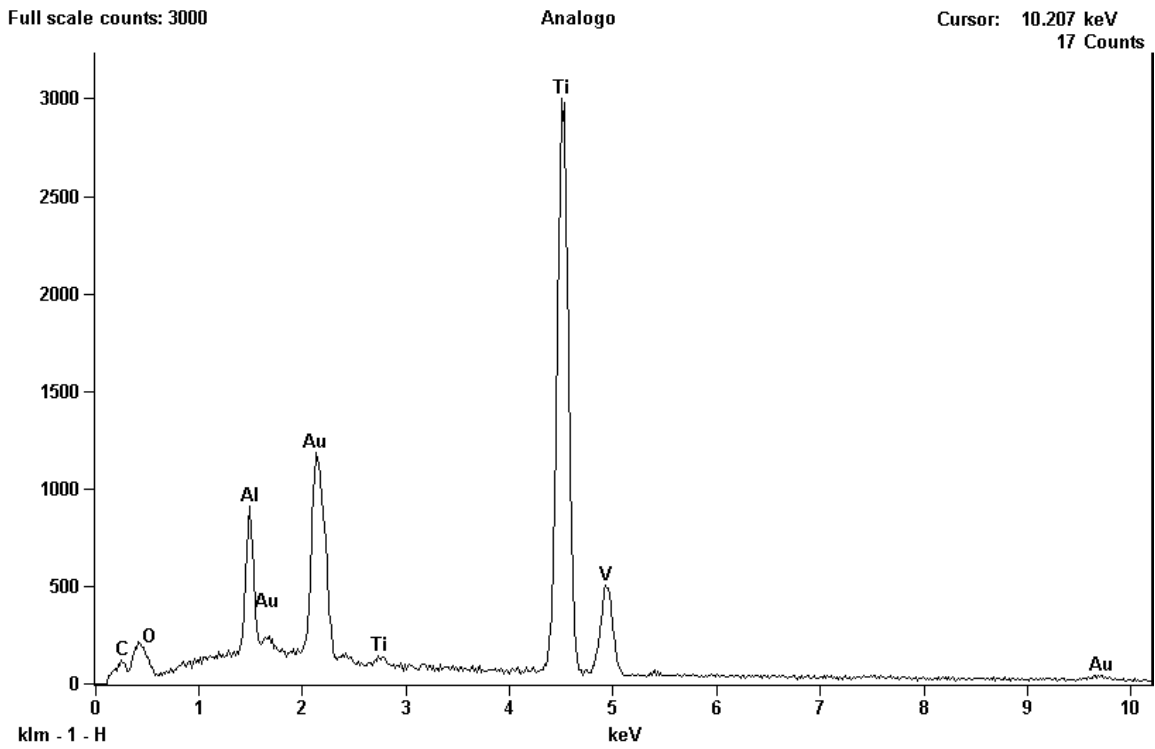


Figura 44 - EDS do análogo (conjunto 3 do grupo sem recobrimento)

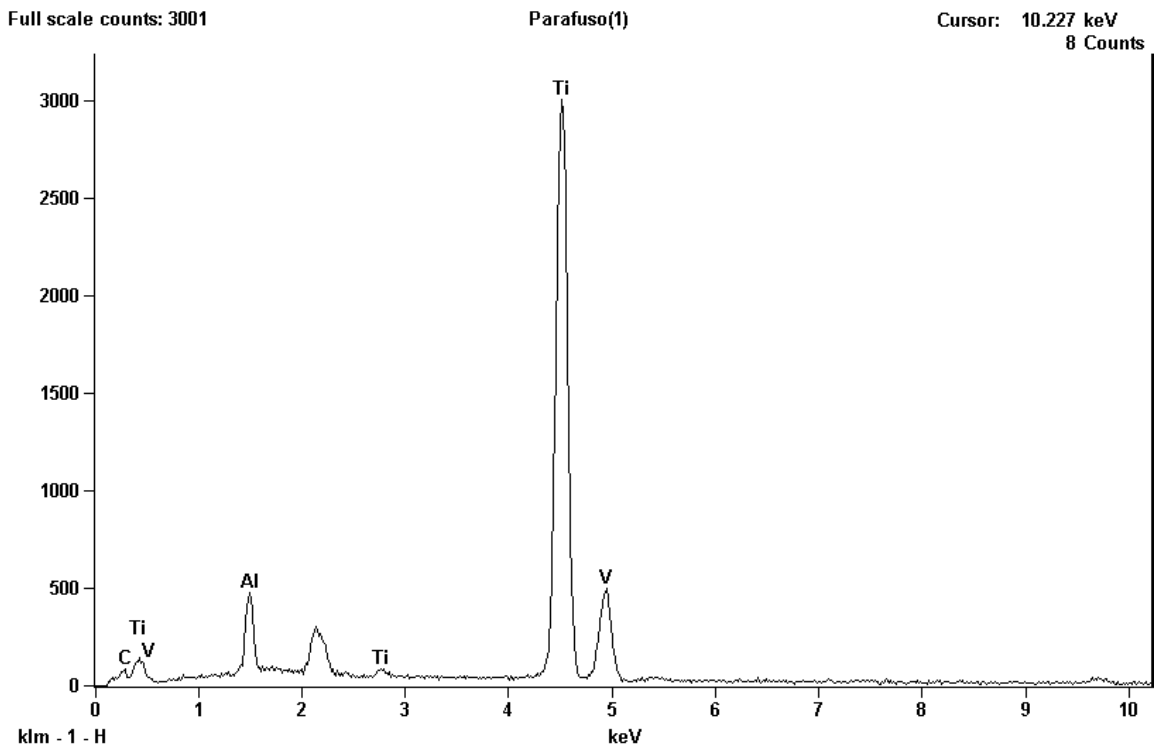


Figura 45 - EDS do parafuso (conjunto 3 do grupo sem recobrimento)

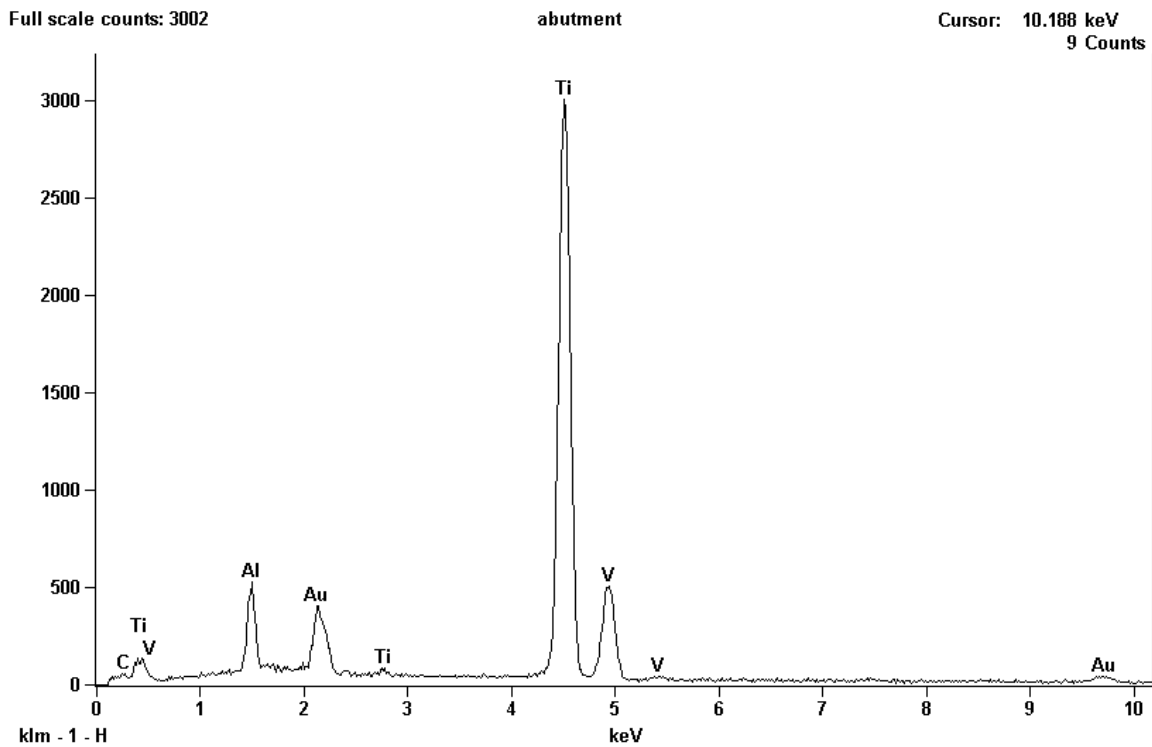


Figura 46 - EDS do “abutment” (conjunto 3 do grupo sem recobrimento).

Também foi realizado EDS da região interna da rosca do análogo do implante (onde a rosca do parafuso esteve em contato). Verificou-se uma maior quantidade de carbono e oxigênio, tanto no análogo que esteve em contato com o parafuso recoberto por DLC quanto no que esteve em contato com o parafuso recoberto por DLC-Si. Porém, no primeiro caso, a quantidade de carbono e oxigênio foi bem mais elevada, como demonstram as figuras 47 e 48.

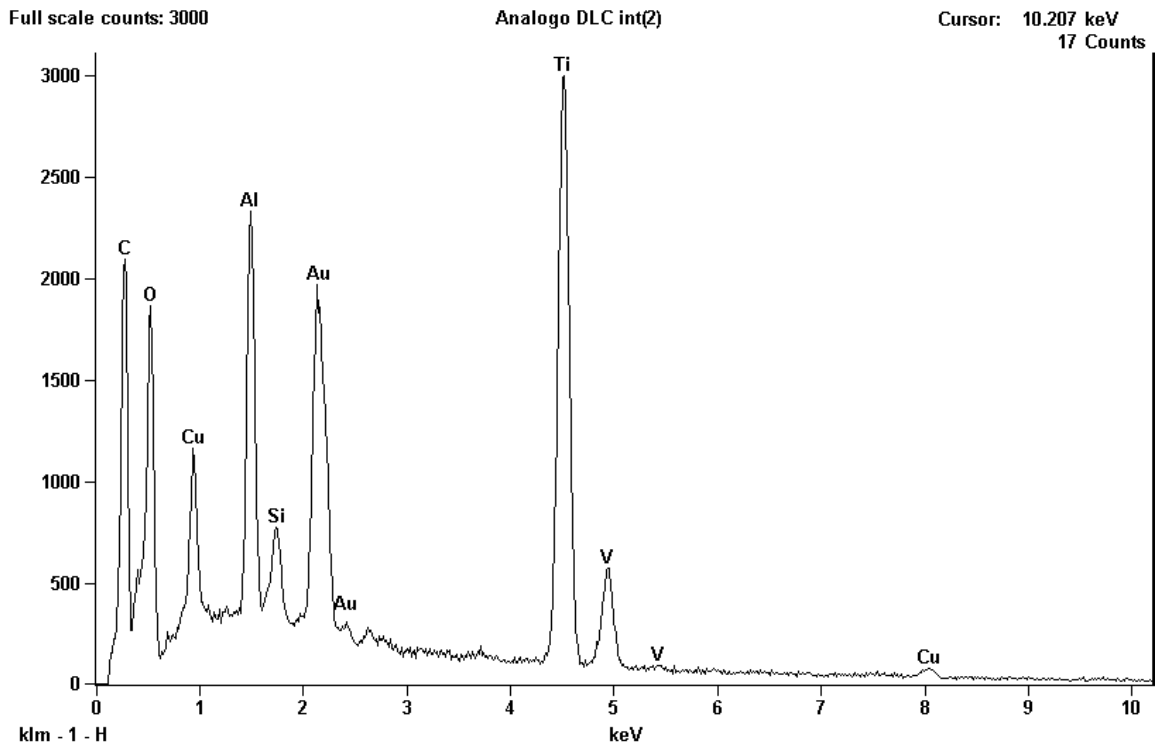


Figura 47 - EDS do análogo que esteve em contato com parafuso recoberto por DLC.

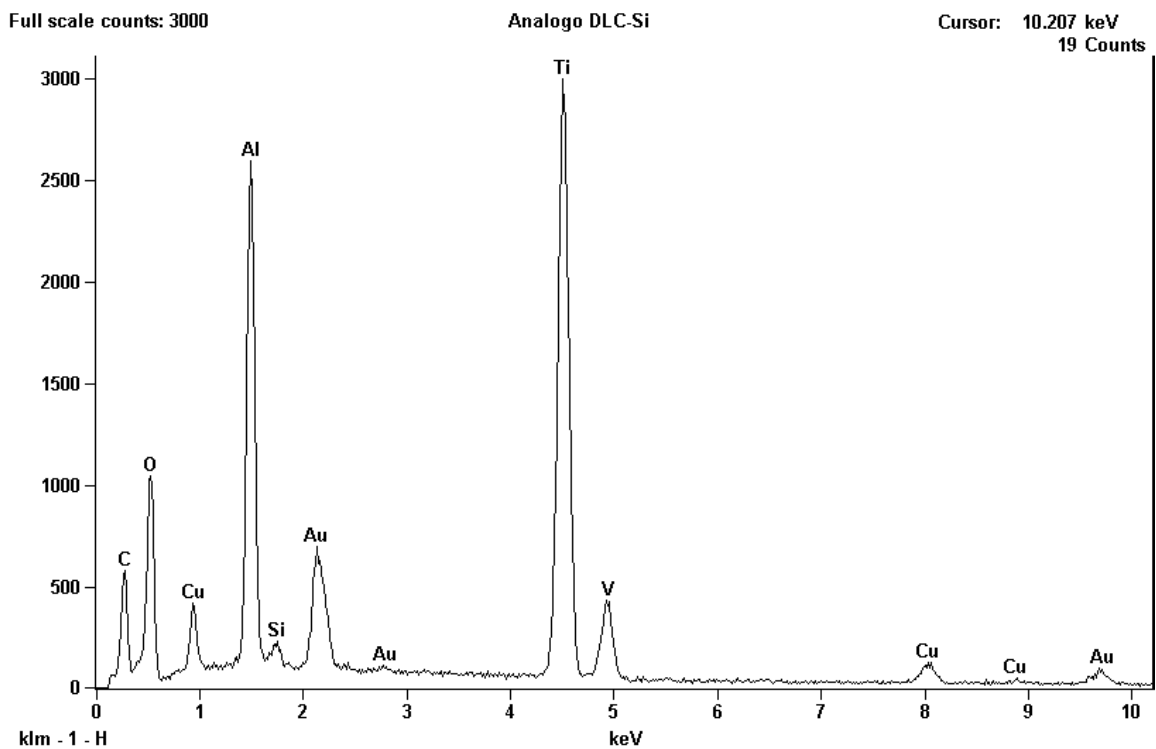


Figura 48 - EDS do análogo que esteve em contato com parafuso recoberto por DLC-Si.

V – Discussão

Nesse trabalho, tanto os parafusos que receberam recobrimento com DLC quanto com DLC-Si apresentaram pré-carga mais elevada, estatisticamente significativa, quando comparada com a pré-carga alcançada nos parafusos que não foram recobertos.

MARTIN *et al.* (2001) mostraram em seu estudo que os parafusos com recobrimento de carbono amorfo (Torq Tite, Nobel Biocare®) alcançaram uma pré-carga que variou de 723,0 N a 877,1 N. Para calculá-la também foi usada a equação 8 sendo usado o torque para apertamento de 32 N.cm.

Em contrapartida, nesse trabalho o valor mínimo e máximo da pré-carga alcançada no grupo DLC foi de 235,6N e 746,1 N respectivamente. O grupo DLC-Si apresentou pré-carga mínima de 204,2 N e máxima de 738,27 N.

Para entender a diferença dos valores encontrados para pré-carga, nesse trabalho em relação ao de MARTIN *et al.* (2001), é necessário ressaltar que os parafusos testados em cada estudo possuem geometria diferente e são de fabricantes diferentes. SAKAGUSHI e BORGERSEN (1995) afirmam que a pré-carga é dependente não só do atrito entre os componentes e propriedades do material, mas também do acabamento das interfaces (dependente do fabricante) e da geometria do parafuso.

Com relação a necessidade de se usar um parafuso novo ou que já tenha recebido torques prévios, os gráficos das figuras 30, 31, 32, 33, 34 e 35 deixam clara a ausência de um comportamento sistemático nas pré-cargas calculadas em cada reutilização.

Mediante os resultados encontrados, como o valor do primeiro torque foi estatisticamente superior ao do segundo, independente da presença e do tipo de recobrimento, a idéia de apertar o parafuso, desapertar e depois efetuar o torque recomendado pelo fabricante, prática comum na clínica odontológica, fica sem respaldo.

Houve diferença estatisticamente significativa entre o segundo torque e o quarto torque, sendo o quarto superior. Porém, quando se compara o quarto torque com o primeiro, não há diferença estatisticamente significativa.

Sendo assim, se mais torques tivessem sido dados e mais parafusos fossem testados nesse trabalho, talvez um resultado mais esclarecedor pudesse ter sido alcançado, em relação a necessidade de usar parafusos novos ou com torques prévios. Além disso, a escolha dos conjuntos a serem testados poderia ter sido feita em caráter mais aleatório. Como exemplo poderia ter sido realizado um sorteio do conjunto a ser

testado, independente do grupo a que pertencia, ao invés de seguir a seqüência usada (sem recobrimento, DLC e DLC-Si). Isso diluiria o efeito da exatidão do torquímetro que só foi calibrado antes dos testes e também a questão relacionada ao operador (cansaço).

TZENAKIS *et al.* (2002) concluíram que mais altas pré-cargas são alcançadas quando são usados parafusos de ouro que já receberam torques prévios. Já RAFFE *et al.* (2002) não detectaram alteração mesmo após 20 apertamentos e afrouxamentos de parafusos de ouro.

Segundo HAGIWARA e OHASHI (1994) o atrito que ocorre durante o primeiro torque de apertamento e afrouxamento do parafuso é maior do que nos ciclos seguintes. Os autores acreditam que a seqüência inicial de apertamento e afrouxamento remove as irregularidades das roscas sempre presentes em uma superfície usinada.

Já no trabalho de MARTIN *et al.* (2001), o coeficiente de atrito nos parafusos com recobrimento aumentou após sucessivos ciclos de apertamento e afrouxamento quando comparados com os parafusos sem recobrimento. Esse aumento foi atribuído ao fato de o recobrimento ter se desgastado após sucessivos torques.

Se forem analisadas e comparadas as tabelas com os valores de afrouxamento dos parafusos (tabelas 5, 6 e 7) e as tabelas com os valores das pré-cargas (tabelas 8, 9 e 10) verifica-se que os parafusos sem recobrimento apresentam como média geral para o afrouxamento o valor de 28,01 N.cm e pré-carga média de 313,48 N. Já os parafusos com recobrimento de DLC apresentam como média de afrouxamento 26,02 N.cm e pré-carga média de 467,64 N. Os parafusos com DLC-Si mostram um valor médio de afrouxamento de 26,34 N.cm e pré-carga média de 442,74 N.

Isso sugere que a necessidade de um torque mais elevado para afrouxar o parafuso (grupo sem recobrimento) está relacionada à uma pré-carga mais baixa.

Ainda não se sabe o limite exato em que a redução do coeficiente de atrito seja tão significativa a ponto de promover o afrouxamento do parafuso, sendo necessários estudos mais aprofundados.

Fazendo-se uso do modelo de dois estágios de afrouxamento do parafuso descritos por BICKFORD (1981) sugere-se que os parafusos com recobrimento (logo menor coeficiente de atrito) demorariam mais a alcançar o primeiro estágio de afrouxamento. Porém sendo este uma vez alcançado, logo entrariam no segundo estágio. Já nos parafusos sem recobrimento, o primeiro estágio de afrouxamento seria mais facilmente

alcançado quando comparado aos parafusos recobertos, mas a passagem do primeiro estágio para o segundo seria mais demorada.

Nas avaliações feitas em MEV, verificou-se contato de todos os filetes da rosca do parafuso em seu sítio no análogo (em todos os grupos, independente de ser o primeiro ou sexto torque de apertamento), conforme mostra a figura 30.

Também foi observado um padrão comum para os 3 grupos independente de ser primeiro ou sexto torque de apertamento: contato dos filetes da rosca do parafuso com a rosca do análogo sempre na região superior do filete da rosca do parafuso (figura 31).

Ficou demonstrado que o recobrimento, seja de DLC ou DLC-Si, não melhorou o contato dos filetes da rosca, pois as imagens em MEV revelaram que ainda havia espaçamento na suposta região de contato de parafusos recobertos (figura 33). Enquanto isso, em parafusos sem recobrimento foram verificadas áreas efetivas de contato (figura 32).

Com relação a uniformidade dos recobrimentos depositados nos parafusos, o critério usado – presença ou ausência de recobrimento nos parafusos antes de receber torque e após o quinto torque de afrouxamento – foi pouco elucidativo. Isso porque, como já dito no capítulo de Resultados, os parafusos com DLC já não apresentavam uniformidade antes mesmo de serem testados. Após os testes não se comprovou se houve desgaste ou delaminação do recobrimento de DLC, constatando apenas a falta de uniformidade, já presente antes dos ensaios.

No caso dos parafusos recobertos com DLC-Si a uniformidade, baseada no critério deste trabalho, foi detectada antes e após os ensaios.

Foi verificada uma maior espessura nos recobrimentos do grupo DLC-Si, tanto na região do pescoço quanto na região da rosca, quando comparados com os do grupo DLC. Provavelmente, devido ao maior tempo de deposição (4 horas) no grupo DLC houve a formação de um filme mais espesso, com maior tensão interna compressiva, favorecendo a delaminação e contribuindo para que uma menor espessura ficasse aderida ao parafuso. Em contrapartida, o grupo DLC-Si apresentou um recobrimento não só mais uniforme como também mais espesso. Como citado no capítulo de Revisão Bibliográfica, de acordo com DAMASCENO *et al.* (2000) a incorporação de silício nos filmes DLC diminui a elevada tensão interna residual de natureza compressiva que tem como consequência a delaminação por falta de adesão do filme ao substrato.

O EDS realizado tanto no análogo do grupo DLC quanto no de DLC-Si sugeriu que houve formação da camada de transferência já que foi verificado um aumento na

quantidade de carbono no análogo de ambos os grupos, após o quinto torque de afrouxamento. Porém, a existência dessa camada não pôde ser comprovada nas avaliações feitas em MEV.

Comparando o EDS do análogo do grupo DLC e DLC-Si percebe-se que a quantidade de carbono detectada é superior no análogo em contato com parafuso com DLC.

Apesar de não ter havido diferença estatisticamente significante entre a pré-carga alcançada nos parafusos recobertos por DLC e DLC-Si, estes últimos apresentaram um aspecto a olho nu superior, o que provavelmente facilitaria sua aceitação comercial. Além disso, o tempo de deposição para obter os parafusos do grupo DLC-Si foi de duas horas, exatamente a metade do tempo para obtenção do grupo DLC.

A análise dos resultados sugere que a uniformidade do recobrimento não seja tão importante para se alcançar uma pré-carga mais elevada. Talvez apenas uma pequena quantidade de carbono amorfo já seja suficiente para otimizar os tais valores. Porém, mais estudos seriam importantes para determinar o quanto de recobrimento seria o suficiente para aumentar essa pré-carga.

VI - Conclusões

A análise dos resultados desse trabalho demonstrou que:

A utilização de recobrimento com carbono amorfo em parafusos de titânio para conexões protéticas acarretou um aumento na pré-carga.

Não houve diferença estatisticamente significativa na pré-carga alcançada no grupo DLC e grupo DLC-Si. Em contrapartida, houve diferença estatisticamente significativa da pré-carga alcançada nos grupos com recobrimento em relação ao grupo sem recobrimento.

Não houve diferença estatisticamente significativa entre a pré-carga alcançada entre o primeiro e quinto torque. Porém entre o primeiro e o segundo torque; e entre o segundo e quarto torque houve diferença estatisticamente significativa.

Mediante a avaliação em MEV, os recobrimentos com DLC e DLC-Si não alteraram o padrão de contato entre rosca do parafuso e rosca do análogo do implante.

Não houve boa adesão do recobrimento de DLC com o parafuso de titânio. Já o recobrimento com DLC-Si apresentou boa adesão ao parafuso de titânio.

Análise por EDS realizada na rosca do análogo do implante dos grupos DLC e DLC-Si sugere que houve a formação da camada de transferência durante os ensaios realizados, de forma mais pronunciada no primeiro caso.

VII -Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros:

Os conjuntos poderiam ser submetidos ao carregamento cíclico, simulando com maior precisão o que de fato acontece durante a mastigação.

Comparar a espessura dos recobrimentos obtidos com a espessura dos recobrimentos em parafusos já existentes no mercado.

Medir o coeficiente de atrito para os 3 grupos (através do “scratch test”, por exemplo) e através da equação 7 verificar se o torque preconizado pelo fabricante ainda seria de 32 N.cm, mediante os valores da pré-carga média obtida nesse trabalho para cada grupo.

VIII - Referências Bibliográficas

AISEMBERG, S., CHABOT, R., 1971, *J. Appl. Phys.* v. 42, pp. 29-53,.

ALLINGER, N. L., CAVA, M. P., DE JONGH, D. C., et al., 1976, Química Orgânica, LTC.

AL RAFFE, M. A., NAGY, W. W., FOURNELLE, R. A., et al., 2002, "The Effect of Repeated Torque on the Ultimate Tensile Strength of Slotted Gold Prosthetic Screws." *J Prosthet Dent.*, v. 88, n. 2, pp. 176-182.

ANGUS, J. C., JANSEN, F. J., 1998, *Vac. Sci. Technol. A* 6, 1778.

ANGUS, J. C., WANG, Y., SUNKARA, M., 1991. In: *Annual Review of materials Science*, v. 21, Palo Alto, CA, p. 221.

BAIA NETO, A. L., SANTOS, R. A., FREIRE, F. L., et al., 1997, "Relation between mechanical and structural properties of silicon-incorporated hard a-C:H films". *Thin Solid Films*, v. 293, pp. 206-211.

BASTEN, C. H. J., NICHOLS, J. I., DALY, C. H., et al., 1996, "Load Fatigue Performance of Two Implant-Abutment Combination". *Int J Oral Maxillofact Implants*, v. 11, n. 4, pp. 522-528.

BICKFORD, J. H., 1981, *An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*. 1 ed. New York, Marcel Dekker.

BICKFORD, J. H., 1995, *An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*, 3 ed. New York, Marcel Dekker,.

BINON, P. P., 1994, "Screw Joints, Components, and other Intimate Relationships". *J Prosthet Dent*, v.72, pp. 625.

- BINON, P. P., 1996, "The Effect of Implant/Abutment Hexagonal Misfit on Screw Joint Stability". *Int J Prosthodont*, v. 9, pp. 149-160.
- BINON, P. P., 1998 "Evaluation of the Effectiveness of a Technique to Prevent Screw Loosening". *J Prosthet Dent*, v. 79, n. 4, pp. 430-432.
- BINON, P. P., 2000, "Implants and Components: Entering the New Millennium". *Int J Oral Maxillofact Implants*, v. 15, n. 1, pp. 76-94.
- BURGUETE, R. L., JOHNS, R., KING, T., et al., 1994, "Tightening Characteristics for Screwed Joints in Osseointegrated Dental Implants". *J Prosthet Dent*, v. 71, n. 6, pp. 592-9.
- CALLISTER, W. D., 2002, *Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução*, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC.
- CAMARGO JR., S. S., NETO, A. L. B., SANTOS, R. A., 1998, "Improved High Temperature Stability of Si Incorporated in a-C:H films". *Diamond and Related Materials*, v. 7, pp. 1155-1162.
- CARLSON, B., CARLSSON, G.E., 1994, "Prosthetic Complications in Osseointegrated Dental Implant Treatment". *Int J Oral Maxillofact Implants*, v. 9, pp. 90-94.
- CATÁLOGO DE PRODUTOS NEODENT - IMPLANTE OSTEOINTEGRÁVEL, 2005, pp. 21.
- CAVAZOS, E., BELL, F. A., 1996, "Preventing loosening of implant abutment screws". *J Prosthet Dent*, v. 75, n. 5, pp. 566-9.
- CIBIRKA, R. M., NELSON, S. K., LANG, B. R., et al., 2001, "Examination of the Implant-Abutment Interface after Fatigue Testing". *J Prosthet Dent*, v. 85, n. 3, pp. 268-75.

- DAMASCENO, J. C., CAMARGO JR, S. S., FREIRE JR, F. L., et al., 2000, "Deposition of Si-DLC Films with High Hardness, Low Stress and High Deposition Rates". *Surface & Coatings Technology*, v.133-134, pp. 247-252.
- DAMASCENO, J. C., Camargo, S. S., Cremona, M., 2002, "Deposition and Evaluation of DLC-Si Protective Coatings for Polycarbonate Materials". *Thin Solid Films*, v. 420-421, pp. 195-199
- DAMASCENO, J. C., 2002, *Recobrimentos Protetores para policarbonato baseado em carbono amorfo com silício e oxigênio incorporados*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- DIMIGEN, H., KLAGES, C.P., 1991, *Surface and Coating Technology*, v. 49, pp. 543.
- DONNET, C., GRILL, A., 1997, "Friction Control of Diamond-like carbon coatings". *Surface and Coatings Technology*, v. 94-95, pp. 456-462.
- ELIAS, C. N., FIGUEIRA, D. C., 2003, "Torque para Soltar Parafusos de Próteses sobre Implante". *Revista Brasileira de Odontologia*, v. 60, n. 5, pp. 343-345
- FONTAINE, J., DONNET, C., GRILL, A., et al., 2001, "Tribiochemistry between Hydrogen and Diamond-like carbon films". *Surface and Coatings Technology*, v. 146-147, pp. 286-291.
- GANGOPADHYAY, A. K., WILLERMET, P. A., VASSEL, W. C., et al., 1997, "Amorphous Hydrogenated Carbon Films for Tribological Applications II. Films Deposited on Aluminium Alloys and Steel". *Tribology International*, v. 30, n. 1, pp. 19-28.
- GRILL, A., 1997, *Surf. Coat. Technol.*, v. 94-95, pp. 507.
- GRILL, A., 1999a, "Diamond-like carbon: State of the Art". *Diamond and Related Materials*, v. 8, pp. 428-434.

- GRILL, A., 1999b, "Plasma-deposited diamondlike carbon and Related Materials". *IBM Journal of Research and Development*, v. 43, n. 1-2, pp. 147-161.
- GRILL, A., 2003, "Diamond-like carbon Coatings as Biocompatible Material - an Overview", *Diamond and Related Materials*, v. 12, pp. 166-170.
- HAACK, J. E., SAKAGUCHI, R. L., SUN, T., et al., 1995, "Elongation and Preload Stress in Dental Implant Abutment Screws". *Int J Oral Maxillofac Implants*, v. 10, n. 5, pp. 529-536.
- HAGIWARA, M., OHASHI, N., 1994, "A New Tightening Technique for Threaded Fasteners". *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 116, pp. 64-69.
- HENRY, P. J., LANEY, W. R., JEMT, T., et al., 1996, "Osseointegrated Implants for Single-Tooth Replacement: A Prospective 5-Year Multicenter Study". *Int J Oral Maxillofac Implants*, v. 11, n. 4, pp. 450-455
- HOLMBERG, K., MATTHEWS, A., 1994, *Coatings Tribology – Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering*, 1 ed., Amsterdam, D. Dowson.
- HOYER S. A., STANFORD, C. M., BURANADHAM, S., et al., 2001, "Dynamic Fatigue Properties of the Dental Implant Abutment Interface: Joint Opening in Wide-diameter versus Standard-diameter Hex-type Implants". *J Prosthet Dent.*, v. 85, n. 6, pp. 599-607.
- JÖRNEUS, L., JENT T., CARLSSON, L, 1992, "Loads and Designs of Screw Joints for Single Crows Supported by Osseointegrated Implants". *Int J Oral Maxillofac Implants*, v. 7, pp. 353-359.
- JARRAT, M., STALLARD, J., RENEVIER, D.G., et al., 2003, "An Improved Diamond-like Carbon Coating with Exceptional Wear Properties". *Diamond and Related Materials*, v. 12, pp. 1003-1007.

- KAPLAN, S., JANSEN, F., MACHONKIN, M., 1985, *Appl. Phys. Lett.*, v. 47, pp. 750.
- KHRAISAT, A., STEGAROIU, R., NOMURA, S., et al., 2002, "Fatigue Resistance of two Implant/Abutment Joint Designs" . *J Prosthet Dent*, v. 88, n. 6, pp. 604-10.
- KEATING, K., 1999, "Conectando Abutments à Implantes Dentais". *Dentista Irlandês*, v. 4, pp. 15-21.
- LANG, L. A., WANG, R., MAY, K. B., 2002, "The Influence of Abutment Screw Tightening on Screw Joint Configuration" *J Prosthet Dent* , v. 87, n. 1, pp. 74-9.
- LEE, J., KIM, Y., KIM, C., et al., 2002, "Wave Analysis of Implant Screw Loosening Using an Air Cylindrical Cyclic Loading Device", *J Prosthet Dent*, v. 88, n. 4, pp. 402-8.
- LIFSHITZ, Y., 1999, "Diamond-like Carbon - Present Status". *Diamond and Related Materials* v. 8, pp. 1659-1676.
- LIU, Y., ERDEMIR, A., MELETIS, E. I., 1996, *Surf Coat Technol*, v. 82, pp. 48-56.
- MARTIN, W. C., WOODY, R. D., MILLER, B. H., et al., 2001, "Implant Abutment Screw Rotations and Preloads for Four Different Screw Materials and Surfaces". *J Prosthet Dent*, v. 86, n. 6, pp. 24-32.
- MATTHEWS, A., ESKILDSEN, S. S., 1994, *Diamond and Related Material* v. 3, pp. 902-911.
- MC GLUMPHY, E., 1994, "Keeping Implant Screws Tight: Are we Beyond Retrievability?". Proceedings of the Fourth International Symposium on Implant Dentistry: Focus on Esthetics, *J Prosthet Dent*, v. 72, n. 6, pp. 628.
- MÖLLERSTEN, L., LOCKOWANDT, P., LINDEN, L. A., 1997, "Comparison of Strength and Failure Mode of Seven Implant Systems: an *in vitro* test". *J. Prosth Dent*, v. 78, pp. 582-91.

- MONTGOMERY, D. C., 1991, "Design and Analysis of Experiments". 3 ed., New York, Wiley.
- NETER, J., WASSERMAN, W., KUTNER, M., 1990, "Applied Linear Statistical Models". 3 ed., HomeWood, Illinois, Richard D. Irwin, Inc.
- ORDINE, A. P., MARGARIT, I. C. P., MATTOS, O. R., et al., 2000, "Correlation between Physical and Eletrochemical Analysis of SiC Thin Films" *7th International Symposium on Eletrochemical Methods in Corrosion Research, EMCR2000*, Budapeste, May 28 - 1 June.
- ORDINE, A., ACHETE, C. A., MATTOS, et al., 2000, "Magnetron Sputtered SiC Coatings as Corrosion Protection Barriers for Steels". *Surface Coatings and Technology* v. 00, pp. 1-5.
- PATTERSON, E. A., JOHNS, R. B., 1992, "Theoretical Analysis of the Fatigue Life of Fixture Screws in Osseointegrated Dental Implants". *Int J Oral Maxillofac Implants* v.7, n. 1, pp. 26-34.
- RANGERT, B., JEMT, T., JÖRNEUS, L., 1989, "Forces and Moments on Branemark Implants". *Int J Oral Maxillofact Implants*, v. 4, pp. 241-247.
- ROBERTSON, J., 1991, *Progr. Solid State Chem.*, v. 21, pp. 199.
- ROBERTSON, J., 1995, "Structural Models of a-C and a-C:H". *Diamond and Related Materials*, v. 4, pp. 297-301.
- ROBERTSON, J., 1997, *Philos. Mag. B. Phys. Condens. Matter Stat. Mech. Electron. Opt. Magn. Prop.* UK 76, 335.
- ROBERTSON, J., 2002, *Material Science and Engineering*, v. 37, pp. 129-281.
- ROBERTSON, J., 2003, "Improving the Properties of Diamond-like Carbon". *Diamond and Related Materials*, v. 12, pp. 79-84.

- SAKAGUCHI, R. L., BORGERSEN, S. E., 1995, "Nonlinear Contact Analysis of Preload in Dental Implant Screws". *Int J Oral Maxillofac Implants* v. 10, n. 3, pp. 295-302.
- SHELLER, H., KLINEBERG, I., MOORE, P. S., et al., 1998, "A 5-Year Multicenter Study on Implant-Supported Single Crown Restorations". *Int J Oral Maxillofac Implants* v. 13, n. 2, pp. 212-218.
- SHIGLEY, J. E., MITCHELL, L.D., 1983, *Mechanical Engineering Design*, 4 ed., Hamburgo, McGraw-Hill International Book Company .
- SONES, A. D., 1989, "Complications with Osseointegrated Implants". *J Prosthet Dent*, v. 62, pp. 581-5.
- TAYLOR, T. D., 1998, "Prosthetic Problems and Limitations Associated with Osseointegration". *J Prosthet Dent*, v.79, n. 1, pp.74-78.
- TSAI, H., BOGY, D.B. J., 1987, *Vac.Sci. Technol.*, v. 5, pp. 3287.
- TZENAKIS, G. K., NAGY, W. W., FOURNELLE, R. A., et al., 2002, "The Effect of Repeated Torque and Salivary Contamination on the Preload of Slotted Gold Implant Prosthetic Screws". *J Prosthet Dent*, v. 88, n. 2, pp. 183-191.
- WALTON, J. N., MACENTEE, M. I., 1997, "A Prospective Study on the Maintenance of Implant Prostheses in Private Practice". *Int J Prosthodont*, v. 10, pp. 453-8.
- ZARB, G. A., SCHMITT, A., 1990, "The Longitudinal Clinical Effectiveness of Osseointegrated Dental Implants: The Toronto Study. Part III: Problems and Complications Encountered". *J Prosthet Dent*, v. 64, n. 2, pp. 185-94.