

## CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussão

Foram realizados ensaios de deslizamento pino-contra-disco/placa, com dois tipos de movimento (rotativo e oscilatório), com e sem aditivo, com e sem contaminante e em dois níveis de carregamento, totalizando 16 variações de ensaio.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de:

- Desgaste das amostras metálicas
  - Perda de dimensão linear
  - Morfologia superficial
  - Desgaste dimensional em área
  - Perfilometria e rugosidade
- Atrito
- Potencial de contato

Para complementar o presente estudo, procedeu-se à análise do óleo por ferrografia analítica, ferrografia quantitativa e espectrometria de emissão óptica, e também à filtragem das partículas de amostras de óleo ensaiadas<sup>31</sup>, com o objetivo de caracterizar quantitativamente o ferro presente no óleo em função das variações de ensaio estudadas, bem como as partículas originadas do desgaste das amostras metálicas. Os resultados obtidos estão apresentados no ANEXO C (espectrometria e ferrografia) e ANEXO D (filtragem de partículas).

A Tabela 4-1 mostra os códigos dos ensaios realizados e as respectivas repetições de cada condição.

Vale lembrar que também foram realizados ensaios com o óleo *OB 100*, para fins de comparação dos seus resultados com os do óleo *Vítrea 100*, ambos não aditivados, cujos resultados estão apresentados nos ANEXOS A e B. De uma maneira geral, foi possível constatar que os resultados com esse óleo foram muito similares aos dos ensaios com o óleo *Vítrea 100*. Assim sendo, apresentam-se a seguir apenas os resultados dos ensaios com o óleo *Vítrea 100*, para a condição não aditivada.

---

<sup>31</sup> As análises por espectrometria e ferrografia foram realizadas pela empresa Tribolab e a filtragem, no Centro de Pesquisa da Petrobrás - CENPES.

**Tabela 4-1: Diagrama com as condições de ensaio estudadas, mostrando os códigos e as repetições realizadas em cada condição.**

condição	SA	CA	SA	CA
Mo  óleo <b>sem</b> contaminante	PP1	PP2	DD1	DD3
	PP3	PP6	DD2	DD4
	PP4	PP7	DD5	DD7
	PP5	PP9	DD6	DD8
	PP8			
Mo  óleo <b>com</b> contaminante	PPc1	PPc3	DDc1	DDc3
	PPc2	PPc4	DDc2	DDc4
	PPc5	PPc6		
Se  óleo <b>sem</b> contaminante	P1	P4	D1	D3
	P2	P5	D2	D4
	P3	P6	D6	D5
	P7	P9	D7	D8
	P8			
Se  óleo <b>com</b> contaminante	Pc3	Pc5	Dc1	Dc2
	Pc4	Pc6	Dc3	Dc4
	Pc7	Pc8	Dc5	Dc6
	Pc9	Pc10		

*Índice c: contaminado com abrasivo*

*Mo: menor carregamento; Se: maior carregamento*

*P: pino-sobre-placa; D: pino-sobre-disco*

*SA: com óleo sem aditivo; CA: com óleo aditivado*

## 4.1 Desgaste

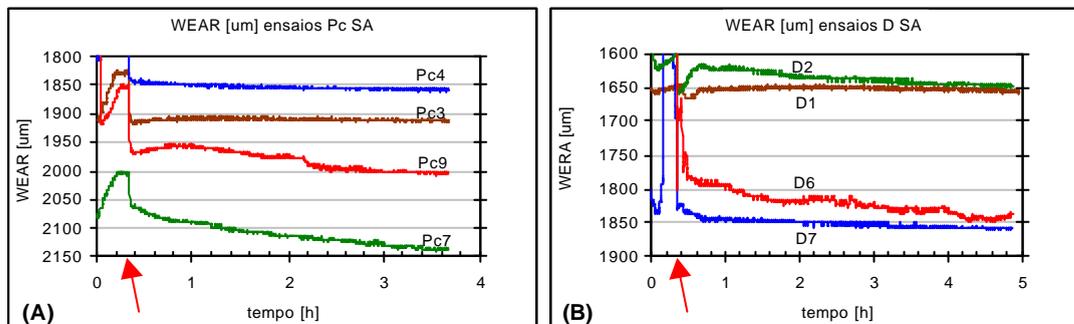
Para a avaliação do desgaste, é importante ressaltar que o nível das perdas de material foi em geral muito pequeno, visto que todos os pinos ensaiados não apresentaram perda de massa mensurável através de balança analítica com resolução de 0,0001 g. Além disso, não foi possível constatar evidências de perda de massa dos contra-corpos na maioria das condições de ensaio.

### 4.1.1 Desgaste medido pelo sensor WEAR

No equipamento TE67, existe um sensor de posição vertical do pino, denominado “WEAR”. Subtraindo a posição inicial da posição final, é possível

conhecer o deslocamento vertical médio do pino no ensaio. O deslocamento vertical seria provocado pelo desgaste combinado do pino e do contra-corpo, influenciado pela dilatação devido à ação térmica no contato. O máximo deslocamento que pode ser medido pelo sensor num ensaio é de aproximadamente 5.000  $\mu\text{m}$ .

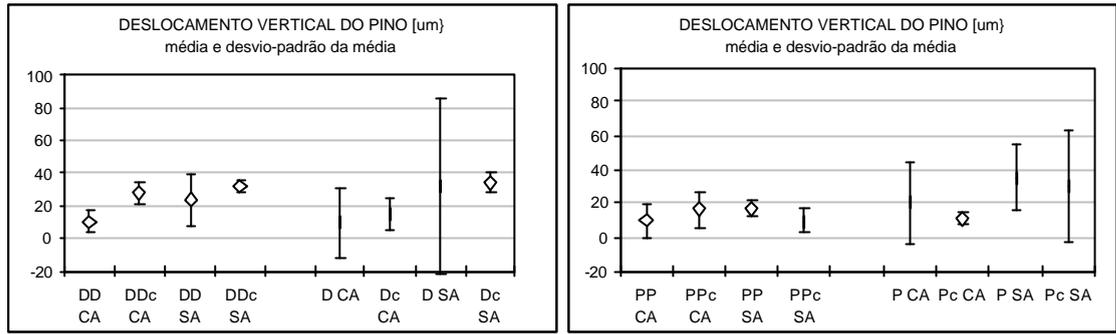
A Figura 4-1 mostra gráficos da posição vertical do pino ao longo dos ensaios Pc SA (oscilatório com óleo não aditivado contaminado) e Dc SA (rotativo com óleo não aditivado não contaminado). Os valores do eixo vertical estão mostrados crescentemente para baixo, de modo a se visualizar a evolução da posição vertical diretamente. Observando os ensaios realizados sob mesma condição, nota-se que o comportamento da posição do pino diferiu de ensaio para ensaio. Nos instantes iniciais do ensaio (fase de aquecimento), o contato entre o pino e o contra-corpo ocorreu na velocidade do ensaio e sob um carregamento normal equivalente ao peso do conjunto de fixação, por volta de 4,5 N. Os gráficos também mostram que o pino sofreu uma queda brusca na etapa do início do carregamento mecânico do ensaio. Na fase de assentamento, atribuída à etapa subsequente ao carregamento, nota-se até mesmo uma subida na posição do pino em alguns ensaios.



Obs.: A seta indica o instante do início do carregamento mecânico (~0,33 h)

**Figura 4-1:** Gráficos da posição vertical do pino (WEAR) ao longo dos ensaios (A) Pc SA e (B) D SA.

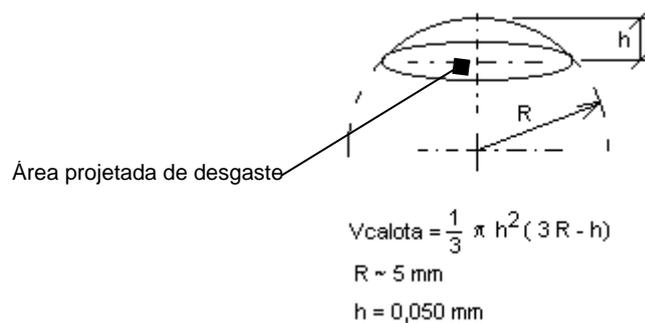
A Figura 4-2 mostra o valor médio e o desvio-padrão do deslocamento vertical do pino, a partir do instante inicial do carregamento até o final, em função da condição de ensaio.



**Figura 4-2: Média e desvio-padrão do deslocamento vertical do pino em função da condição de ensaio.**

A Figura mostra que o deslocamento foi disperso e nenhuma tendência pode ser observada em função da condição de ensaio. Uma análise estatística dos resultados dessa Figura mostrou que os resultados foram significativamente iguais, para um nível de significância estatística ( $\alpha$ ) de 5%<sup>32</sup>. Por outro lado, é possível notar um deslocamento relativamente pequeno, de até 80  $\mu\text{m}$ , com médias menores que 50  $\mu\text{m}$ .

Um cálculo aproximado do volume de desgaste do pino foi realizado a partir do resultado do deslocamento linear do pino. Admitiu-se que todo o desgaste linear fosse devido apenas ao pino e igual ao deslocamento medido pelo sensor WEAR. Considerou-se um valor de 50  $\mu\text{m}$  de desgaste linear e o volume foi aproximado para o de uma calota esférica de raio 5 mm, como mostrado na Figura 4-3.



**Figura 4-3: Modelo para cálculo do volume aproximado de desgaste do pino.**

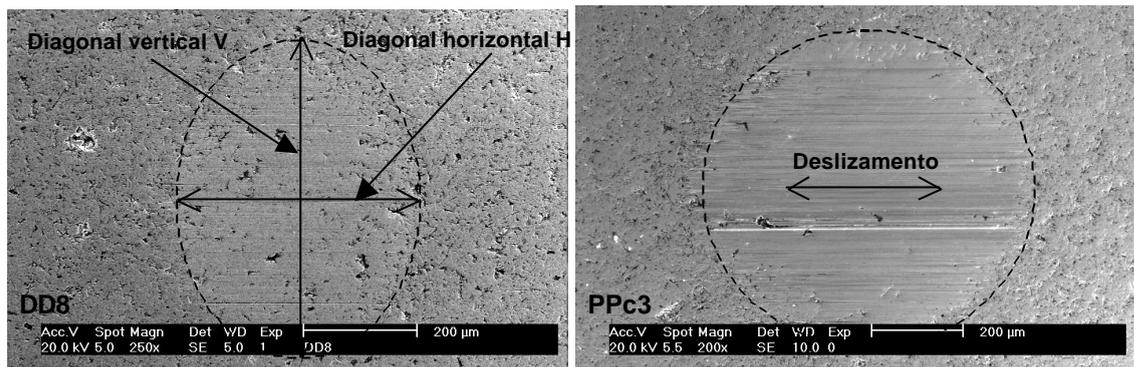
<sup>32</sup> Para essa análise estatística, bem como para as demais subseqüentes, utilizou-se o método da análise de variâncias para a comparação de várias médias, conforme COSTA NETO (1977), pag.153.

A aproximação volumétrica é válida para desgastes do pino muito pequenos, ou seja, que estejam concentrados na extremidade do pino, cujo raio tem um valor aproximado de 5 mm (conforme mostrado na Figura 3-7 do Cap. 3). Com essa aproximação, tem-se um volume de desgaste por volta de  $0,04 \text{ mm}^3$ . Observando que esse volume foi obtido de uma superestimação, ainda assim o mesmo é muito pequeno, comparado a valores de desgaste a seco de metais em condições de carregamento, velocidade e duração similares aos adotados neste trabalho. Nos ensaios a seco realizados por CHEN e ALPAS (2000), por exemplo, podem ser vistos volumes de desgaste da ordem de  $40 \text{ mm}^3$ , ou seja, cerca de 10.000 vezes superior. Essa observação indica que todas as condições selecionadas no presente estudo foram tais que o filme de lubrificante esteve atuando de maneira significativa na interface.

O modelo acima seria prático e simples para o cálculo do desgaste volumétrico do pino nos ensaios realizados. Entretanto, ao se aproximar o desgaste do pino ao volume de uma calota esférica, incorre-se em erros, que estão discutidos a seguir.

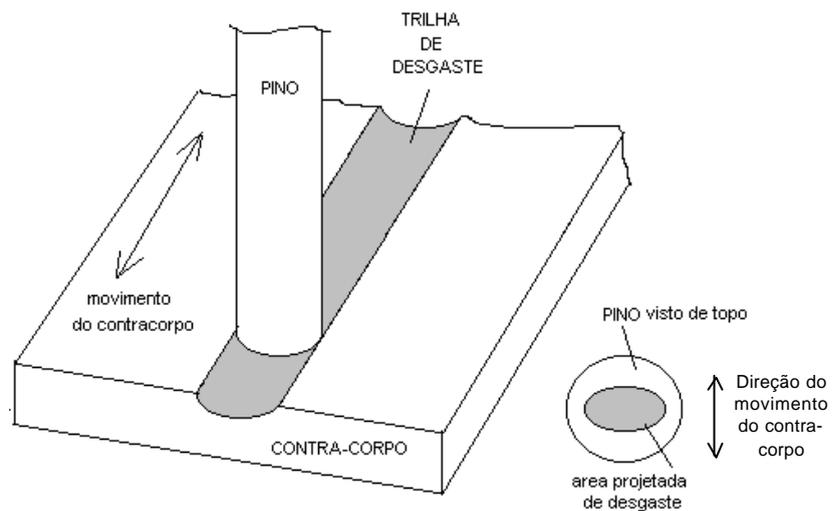
#### **4.1.2 Considerações sobre o cálculo do volume de desgaste do pino**

O pino utilizado nos ensaios tem forma cilíndrica com extremidade arredondada de raio central de aproximadamente 5 mm. Se o desgaste ocorresse de maneira a gerar uma área plana sobre o pino, o volume de desgaste do pino seria igual ao de uma calota esférica de raio 5 mm. Com a área plana e com o desgaste linear vertical ou a área projetada de desgaste, o desgaste volumétrico poderia ser facilmente estimado pelo modelo apresentado na Figura 4-3. Entretanto, verificou-se em alguns pinos ensaiados, que a área projetada de desgaste do pino adquire a forma de uma elipse ao invés de um círculo. A Figura 4-4 mostra o aspecto da área projetada de desgaste de dois pinos, uma em que a área foi elíptica (pino DD8) e outra mais circular (pino PPc3).



**Figura 4-4:** Aspecto geral de duas superfícies de pino após ensaiados, observados em MEV, imagem de elétrons secundários. A linha tracejada delimita a área de desgaste.

A forma elíptica deve estar relacionada ao desgaste do contra-corpo, tal que, quanto mais profundo esse desgaste, maior será a faixa de contato das laterais transversais do pino com a superfície desgastada do contra-corpo. Nesse caso, o desgaste do pino deve ser pequeno. A Figura 4-5 ilustra esquematicamente uma situação em que há o aprofundamento na trilha do contra-corpo e a ocorrência da elipse no pino.



**Figura 4-5:** Formação do sulco na trilha de desgaste sobre o contra-corpo, resultando em uma área de desgaste do pino elíptica.

Assim, quanto mais elíptica for a área no pino, maior será a profundidade da trilha formada no contra-corpo, com um desgaste pequeno do pino. Nesse caso, a área de desgaste do pino não pode ser plana. Por outro lado, quanto mais circular for a área

no pino, maior o desgaste no pino e menor no contra-corpo. Nesse caso, a área no pino é plana.

Com essas considerações, observa-se que, ao se calcular o volume de desgaste com base no modelo apresentado na Figura 4-3, incorre-se em um erro não sistemático. Assim sendo, procedeu-se apenas à medição da área projetada de desgaste no pino para a avaliação quantitativa do desgaste nas condições de ensaio estudadas.

Nos itens a seguir, apresenta-se as análises microscópicas das regiões afetadas pelo desgaste e a descrição das áreas tomadas para as quantificações do desgaste.

### **4.1.3 Morfologia microscópica das superfícies**

As superfícies ensaiadas foram observadas com microscópio óptico e com MEV. Um procedimento de limpeza ultrassônica com álcool e secagem com ar à temperatura ambiente foi realizado previamente à observação microscópica. Os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

#### **4.1.3.1 Microscopia óptica**

Neste item, são descritos os aspectos gerais das superfícies encontrados em cada condição de ensaio. A observação microscópica foi realizada sempre com o mesmo tipo de lentes.

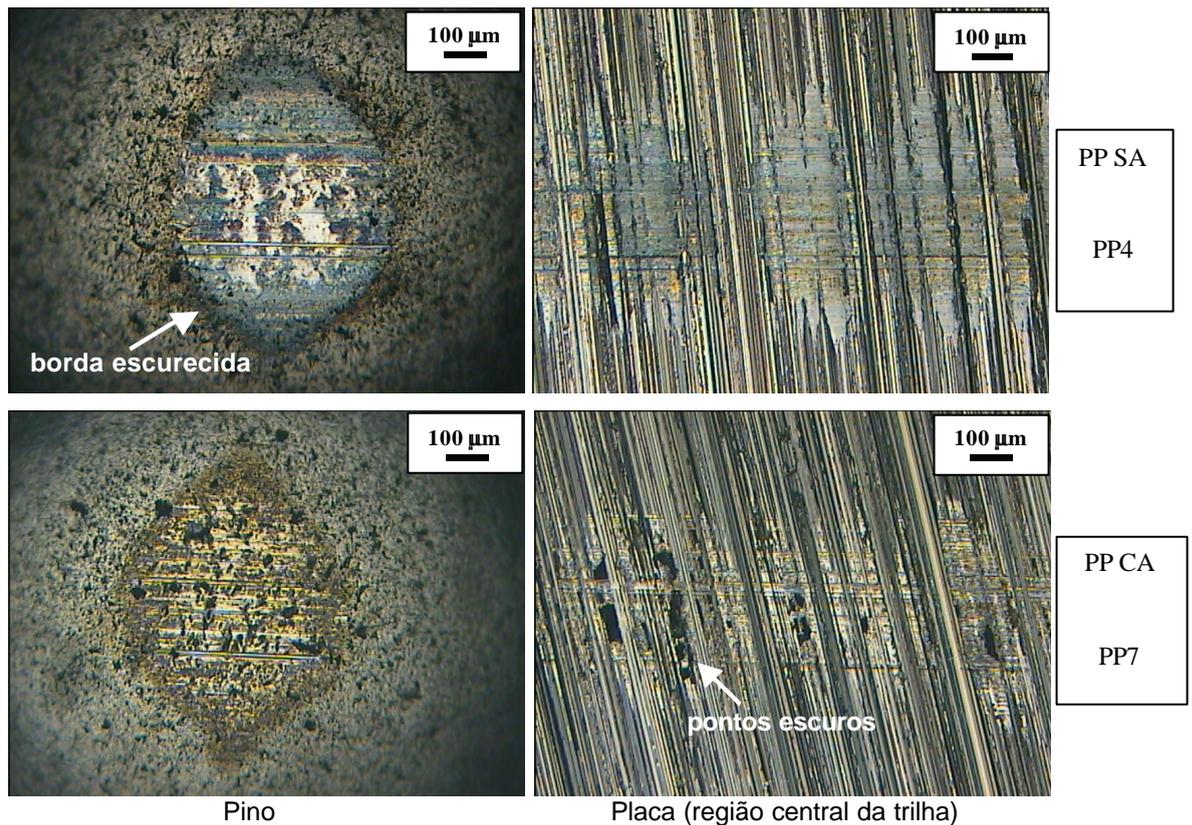
As microfotografias de todas as amostras ensaiadas estão apresentadas no ANEXO A. Observando esses resultados, foi possível notar que, de maneira geral, houve boa repetibilidade nas morfologias das amostras de uma mesma condição de ensaio. Exceções foram vistas com as superfícies resultantes dos ensaios oscilatórios P SA e Pc SA, e rotativos DD SA e DDc CA. A principal característica para a falta de repetibilidade esteve relacionada com a desigualdade na proporção do riscamento severo (presença de sulcos mais escurecidos e mais largos). Esse fato pode indicar uma característica de instabilidade do contato, principalmente para a manifestação dos fenômenos relacionados com mecanismos de corte por partículas duras, que parecem ser favorecidos nas condições de ensaio P e DD.

Para comparação das morfologias observadas, tomou-se microfotografias representativas de cada condição de ensaio e adotou-se uma divisão para a apresentação das Figuras, conforme visto na Tabela 4-2. As Figuras estão apresentadas a seguir.

**Tabela 4-2: Figuras relativas às microfotografias e respectivas condições de ensaio.**

No. da Figura	Codificação	Condição de ensaio
Figura 4-6	PP SA PP CA	menor carregamento (Mo) óleo não contaminado
Figura 4-8	DD SA DD CA	
Figura 4-7	PPc SA PPc CA	menor carregamento (Mo) óleo contaminado
Figura 4-9	DDc SA DDc CA	
Figura 4-10	P SA P CA	maior carregamento (Se) óleo não contaminado
Figura 4-11	D SA D CA	
Figura 4-12	Pc SA Pc CA	maior carregamento (Se) óleo contaminado
Figura 4-13	Dc SA Dc CA	

CA: óleo aditivado; SA: óleo sem aditivo

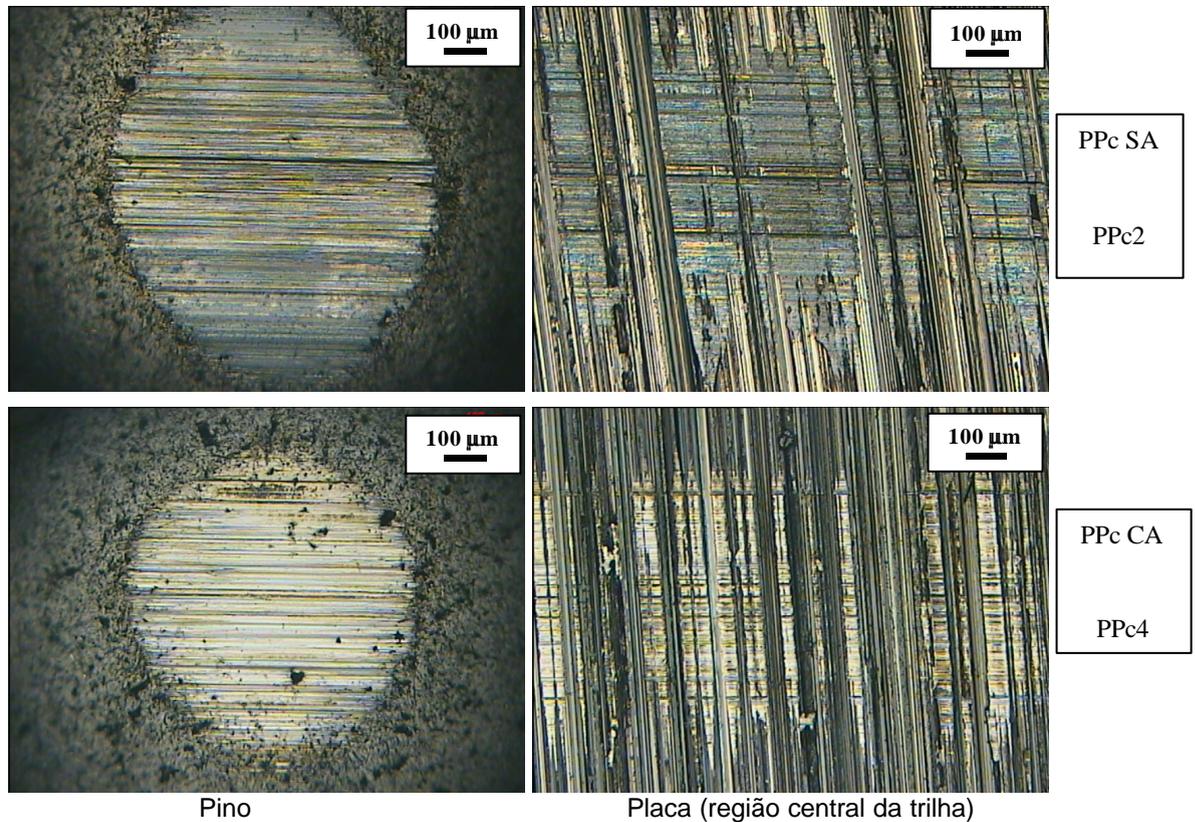


**Figura 4-6: Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição PP.**

Nos resultados dos ensaios oscilatórios PP (Figura 4-6), notam-se áreas desgastadas distintas, basicamente devido à diferença de coloração. A área do pino do

ensaio PP SA apresentou uma coloração em tons de cinza, o que pode estar relacionado à presença de um filme de óxido na superfície. Tal aparência acinzentada não ocorreu na área do pino do ensaio PP CA. Isso pode ser um indicativo de que a aditivação do óleo pode ter inibido a oxidação da superfície do pino na área de contato, embora o desgaste em termos de área afetada tenha sido similar em ambos os pinos. Nota-se também que a borda da área de contato dos pinos se apresentou escurecida, o que concorda com a hipótese de ocorrência do fenômeno de oxidação na região do contato.

Já nas trilhas das placas, nota-se que as linhas do acabamento inicial ainda permanecem na região desgastada, o que indica que o desgaste nesse nível de carregamento foi relativamente pequeno. É possível notar na trilha do ensaio PP CA a formação localizada de regiões escuras e distribuídas de maneira a acompanhar as linhas do acabamento inicial. Esse fato evidencia a presença de um efeito triboquímico localizado nas asperezas da superfície. O modo de atuação em pontos localizados é característico de aditivos EP na formação de filmes triboquímicos de baixo atrito [HUTCHINGS, 1994].

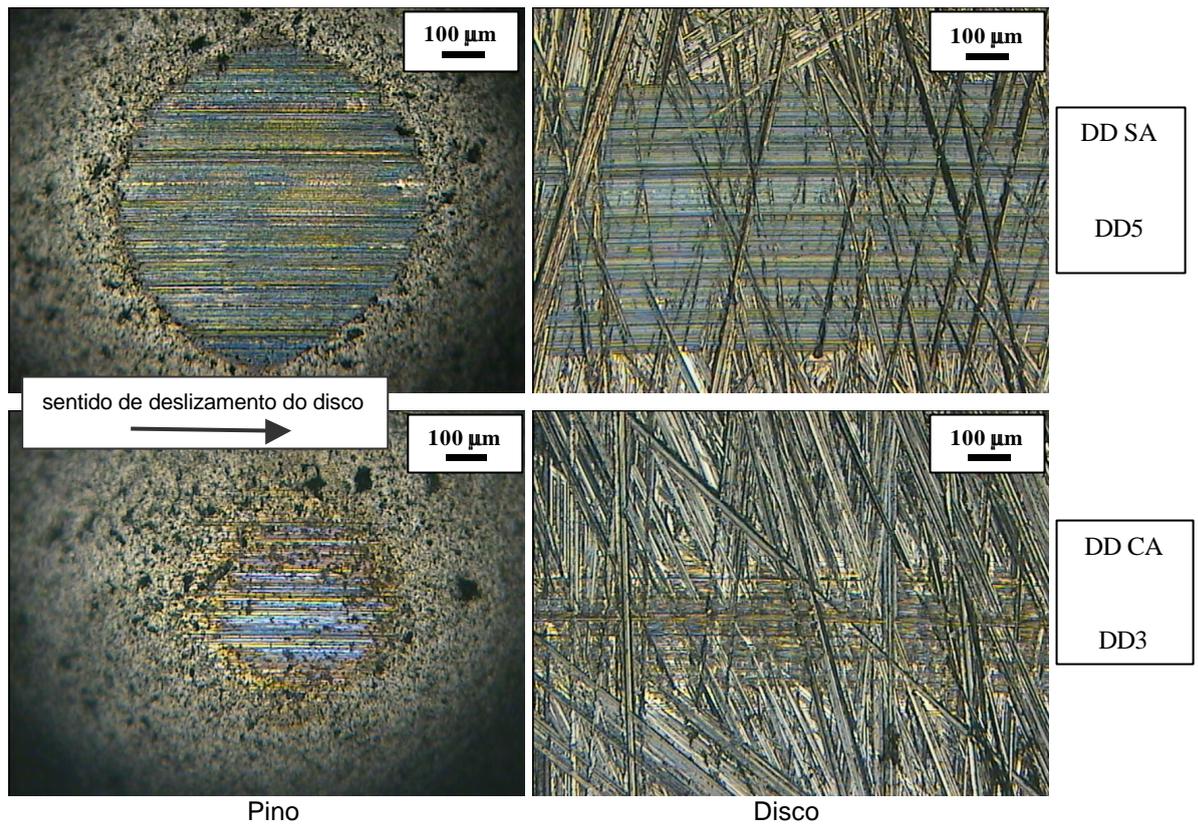


**Figura 4-7:** Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição PPc.

Quanto aos ensaios oscilatórios com óleo contaminado PPc (Figura 4-7), é possível notar que a presença do contaminante abrasivo no óleo provocou uma aparência sensivelmente diferente nas superfícies dos pinos, se comparadas às observadas nos ensaios PP (Figura 4-6). Os pinos da Figura 4-7 apresentaram riscos mais evidentes, comparado aos pinos dos ensaios PP, e aparecem intercalados com áreas com aspecto brilhante, bem evidente no pino do ensaio PPc CA. Isso foi relacionado à ocorrência de um mecanismo similar ao polimento metalográfico, causado pelo contaminante abrasivo. Pode-se observar também que a presença do abrasivo levou a um aumento na área de desgaste do pino.

Quanto às placas, nota-se de modo geral que a largura do sulco aumentou com a contaminação, porém o desgaste ainda foi pequeno, sendo ainda possível observar a permanência das linhas do acabamento inicial na trilha de desgaste. Uma outra observação do efeito da contaminação do óleo é vista comparando a trilha da placa dos ensaios PP CA e PPc CA: nota-se que o uso do contaminante no óleo suprimiu a formação dos pontos escurecidos. Além disso, comparando a área do pino desses ensaios, nota-se que a presença do contaminante levou a um desgaste bem maior, mesmo sendo o óleo aditivado. Ambos os fatos indicam que o efeito triboquímico do óleo aditivado foi significativamente reduzido com a contaminação. Porém, ainda assim, é possível observar que houve efeito da aditivação com o óleo contaminado, visto pela menor área do pino do ensaio PPc CA, comparado com PPc SA.

A diferença entre os resultados de morfologia do pino da condição sem e com contaminante no óleo e as indicações da atuação de um mecanismo similar ao polimento metalográfico na condição contaminada, evidenciam que o contaminante abrasivo esteve presente na interface nos ensaios com óleo contaminado.



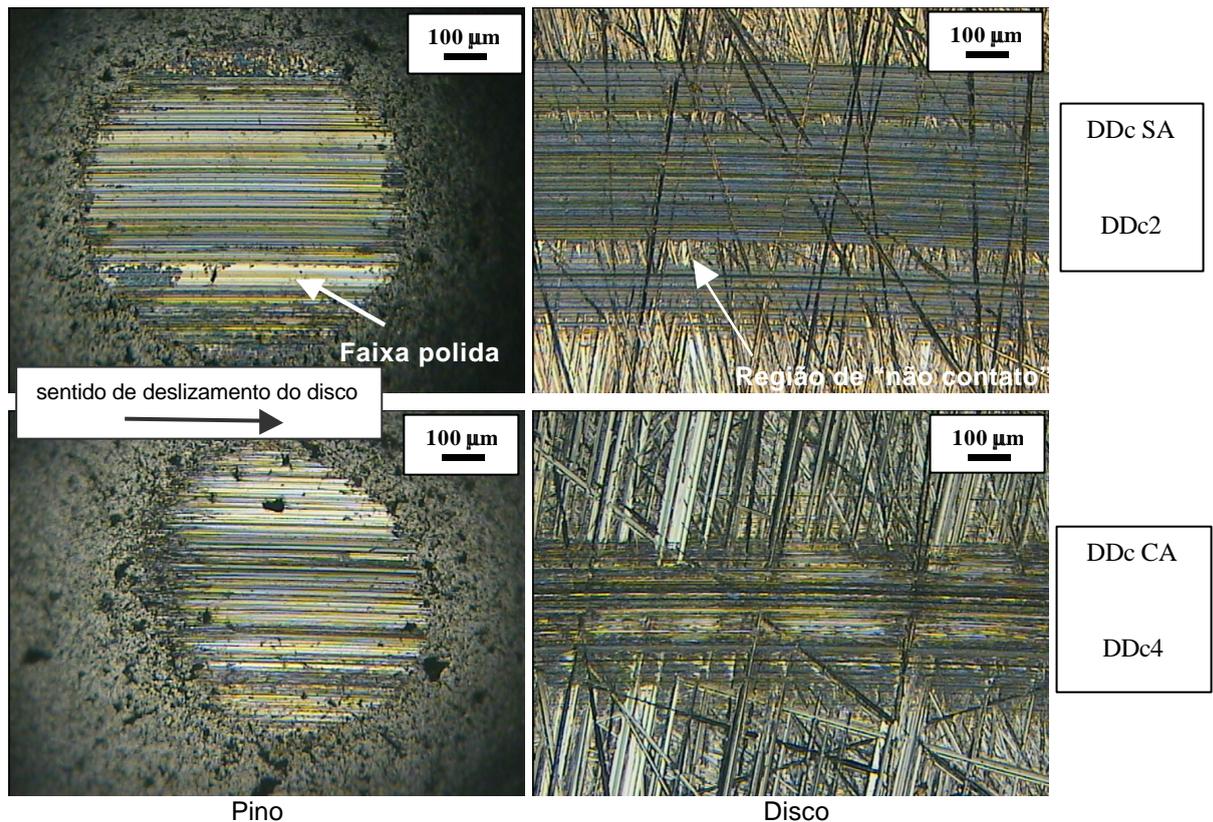
**Figura 4-8: Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição DD.**

Nos pinos dos ensaios rotativos DD (Figura 4-8), nota-se que as áreas de desgaste foram distintas, principalmente quanto ao tamanho, diferentemente do visto com os ensaios oscilatórios PP (Figura 4-6). No ensaios rotativo, o uso da aditivção no óleo resultou em uma área afetada muito menor, tanto do pino como do disco, o que evidencia uma atuação eficiente do aditivo anti-desgaste no ensaio DD CA.

Na área do pino do ensaio DD SA nota-se um riscamento homogêneo na direção do deslizamento, indicando a atuação preponderante de um mecanismo de abrasão, o que foi diferente do pino do ensaio oscilatório PP SA (Figura 4-6), cuja área se apresentou acinzentada e quase sem riscos.

Quanto aos discos, nota-se que, similarmente às placas dos ensaios PP (Figura 4-6), as linhas do acabamento inicial ainda permanecem na região desgastada, indicando que o desgaste também foi pequeno. Comparando os resultados dos ensaios com óleo aditivado, ou seja disco CA da Figura 4-8, com placa CA da Figura 4-6, nota-se que o efeito do aditivo nessas superfícies foi distinto, já que a observação de pontos escuros

ocorreu apenas na placa. Essa constatação mostra que a atuação triboquímica do óleo aditivado nos ensaios rotativos foi diferente dos ensaios oscilatórios, visto também que o efeito do uso do aditivo na redução da área de desgaste do pino foi mais evidente no ensaio rotativo do que no oscilatório. Uma observação importante é que a rugosidade inicial dos discos era significativamente menor e mais aleatória que a das placas. Esse fato pode ter contribuído para a diferença na atuação do aditivo nas superfícies.



**Figura 4-9: Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição DDc.**

Quanto aos resultados com óleo contaminado, DDc (Figura 4-9), observa-se que, como nos ensaios oscilatórios, o uso do abrasivo no óleo nos ensaios rotativos aumentou a ocorrência de riscos, bem como a evidência de áreas claras e brilhantes nas superfícies dos pinos, se comparado aos resultados da Figura 4-8. Observa-se também um aumento do desgaste causado pelo uso do contaminante, porém apenas para a condição com óleo aditivado (DD CA comparado com DDc CA).

Nota-se que os discos ainda apresentam linhas do acabamento inicial na região afetada pelo desgaste, evidenciando o baixo desgaste.

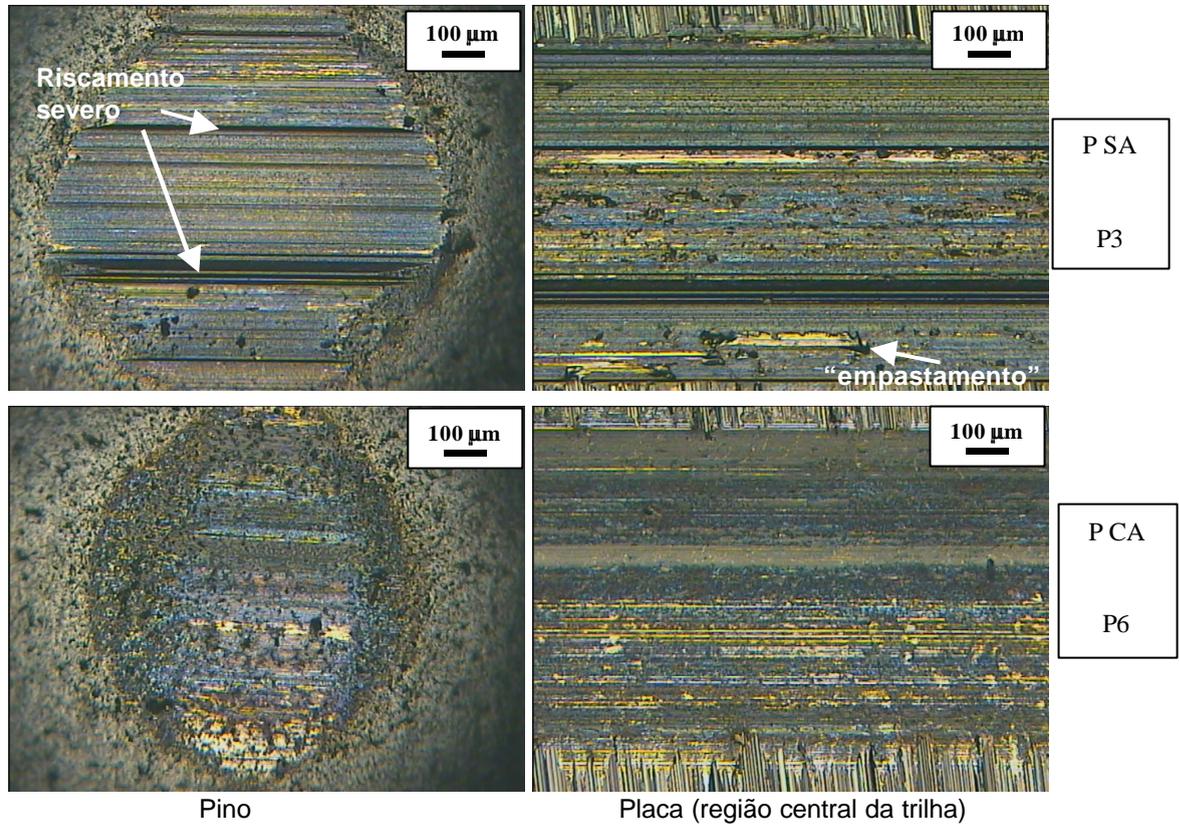
Uma observação a ser considerada é que nos ensaios com óleo contaminado, algumas regiões dentro da trilha de desgaste dos contra-corpos foram vistas como se o contato físico com o pino não houvesse ocorrido durante o ensaio, como visto na superfície do disco DDc2 SA. É possível também notar que essa região correspondeu a uma faixa de superfície polida no pino. Esse fato pode indicar a atuação de um mecanismo de incrustação de abrasivos no contra-corpo, provocando o desgaste por um mecanismo similar ao polimento metalográfico no pino.

Foi notado que, tanto nos ensaios PPc (Figura 4-7) como DDc (Figura 4-9), o efeito da presença do contaminante no desgaste das amostras foi positivo. Algumas hipóteses para a entrada, permanência e atuação do abrasivo na interface de contato foram discutidas. Lembrando que o abrasivo tinha uma distribuição de tamanhos com ampla dispersão e tamanho médio de 15  $\mu\text{m}$ , é possível que houvesse um processo de cominuição dos abrasivos maiores durante o ensaio, diminuindo-os de tamanho e tornando-os capazes de entrar na interface de contato. O arraste de um abrasivo para a interface de contato depende do atrito entre o abrasivo e o metal e da sua angulosidade.

Uma outra hipótese é a de incrustação do abrasivo no contra-corpo, conforme mencionado anteriormente. O contra-corpo possui uma dureza menor (48 HRC ~ 480 HV) em relação ao abrasivo quartzo (~ 1.000 HV) e ao pino (63 HRC ~ 770 HV). Uma vez incrustado no contra-corpo, o abrasivo procederia ao riscamento do pino. Entretanto, nas análises efetuadas por microscopia eletrônica de varredura, não foi possível notar evidências de incrustações de quartzo no contra-corpo. Lembrando, por outro lado, que o acabamento inicial dos discos e placas tinha reentrâncias relativamente altas, um outro mecanismo de atuação do abrasivo poderia ocorrer de forma que tais reentrâncias tenham servido para ancoragem temporária do abrasivo durante o ensaio, provocando o polimento nos pinos.

Já nos ensaios com maior carregamento, P (Figura 4-10) e D (Figura 4-11), nota-se que o desgaste foi mais acentuado, comparado aos resultados dos ensaios com menor carregamento apresentados nas Figuras anteriores. O desgaste mais acentuado é evidenciado pela observação de uma maior área de desgaste do pino e pela ausência de sulcos do acabamento inicial nos contra-corpos. Nota-se até mesmo a formação de uma rugosidade característica da superfície desgastada, sendo possível visualizar que alguns

dos sulcos (ou riscos) mais acentuados ocorrem igualmente no pino e no respectivo contra-corpo. Detalhes descritivos estão apresentados a seguir.



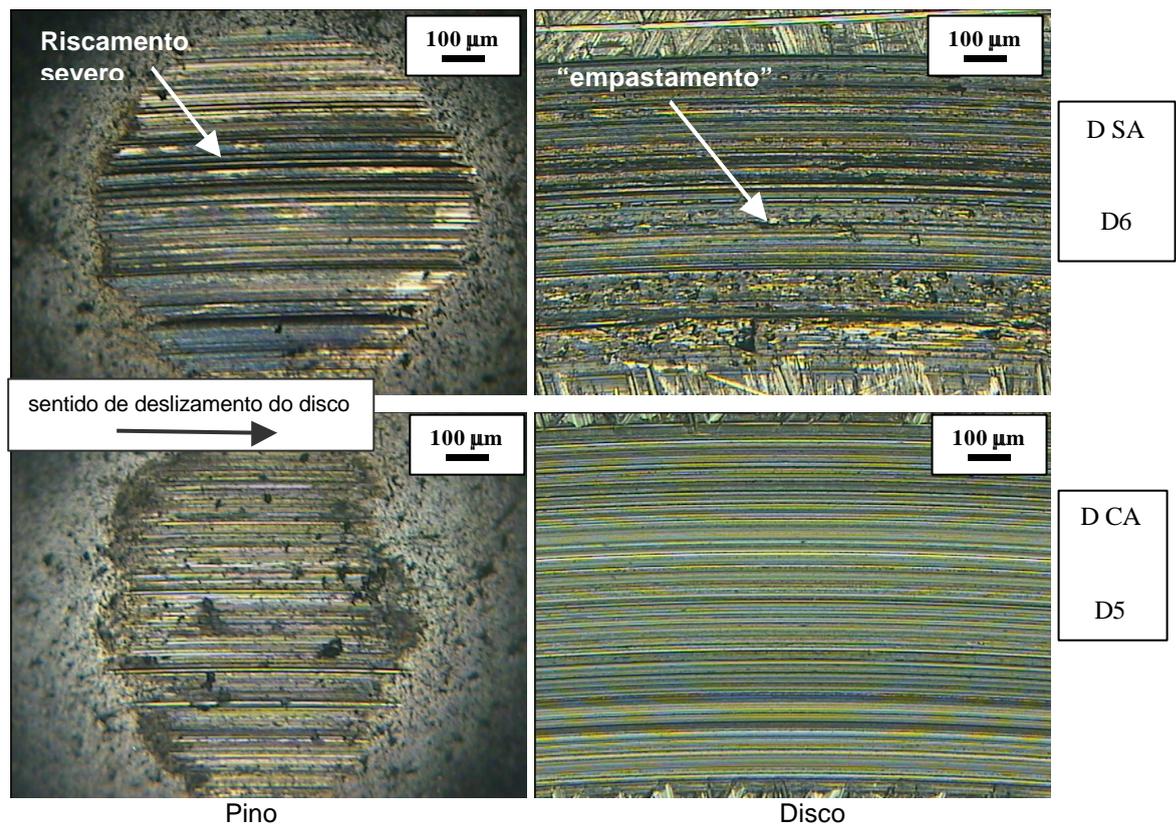
**Figura 4-10:** Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição P.

Observando os resultados do ensaio P SA (Figura 4-10), nota-se que tanto a superfície do pino como da placa foram severamente danificadas. A presença de riscos acentuados no pino indica a atuação de um mecanismo de abrasão severa no mesmo. Na superfície da placa, é possível visualizar regiões com material deformado e “empastado”, o que indica a ocorrência de um mecanismo de deformação plástica severa na mesma.

Já nos resultados do ensaio P CA, não se notam tais mecanismos de deformação plástica severa. As superfícies foram aparentemente mais lisas e fortemente escurecidas. O escurecimento é relacionado à presença de uma tribocamada aderente na superfície.

Uma comparação da forma geométrica da área afetada nos pinos revela que a área foi mais elíptica no ensaio com óleo aditivado. Lembrando que a característica

elíptica da área do pino está relacionada a um aprofundamento da trilha no contra-corpo aliado a um desgaste pequeno do pino, como discutido anteriormente, nota-se que o uso do óleo aditivado no ensaio resultou em um desgaste mais profundo na placa, com um pequeno desgaste do pino. Assim, em termos de desgaste em profundidade, aparentemente o desgaste ocorreu mais acentuado na placa e menos no pino no ensaio com óleo aditivado, ocorrendo o oposto com o óleo não aditivado.



**Figura 4-11: Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição D.**

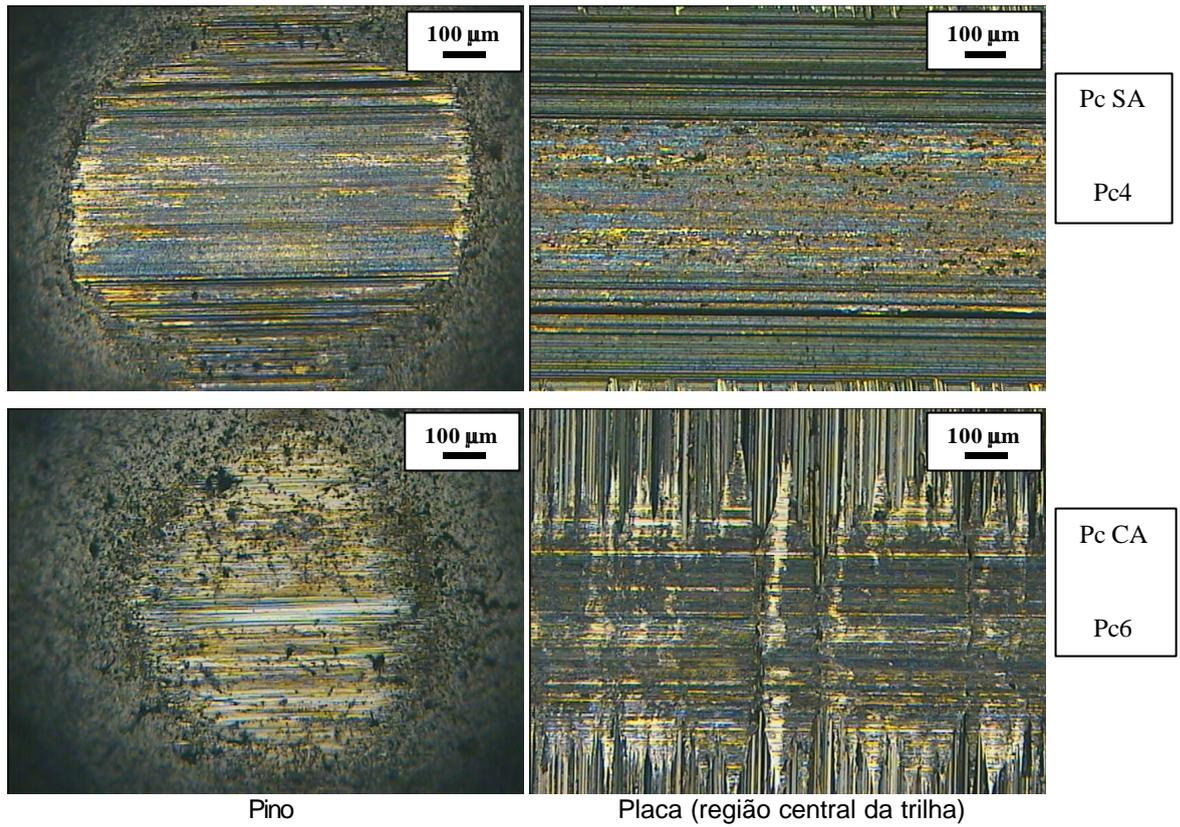
Quanto aos resultados dos ensaios D (Figura 4-11), nota-se também a formação de áreas severamente deformadas nos ensaios com óleo não aditivado (D SA). A utilização do óleo aditivado suprimiu a deformação severa, resultando porém num riscamento uniforme, tanto no pino como no disco (condição D CA). A inibição de mecanismos de desgaste severos como a deformação plástica pode ser creditada ao aditivo EP, pela produção de filmes triboquímicos de baixo atrito. Entretanto, nesse caso, a formação de filme não é microscopicamente visível, diferente do que ocorreu nas amostras do ensaio P CA.

Uma hipótese para as diferenças na morfologia superficial com ensaios com óleo aditivado, em função do sistema de ensaio, pode estar relacionada ao modo de movimentação do fluxo de óleo, ou seja, se linear ou rotativo, considerando que o tipo de movimento do sistema também deve afetar a permanência do resíduo de desgaste e bem como o favorecimento do crescimento em detrimento do arrancamento de possíveis filmes triboquímicos formados no contato. A diferença nas rugosidades iniciais, que era em média 100% maior nas placas, também pode ter contribuído para a atuação diferenciada dos aditivos do óleo nos dois sistemas, principalmente no início do ensaio, quando a rugosidade inicial ainda era presente. Quanto maior a rugosidade, já que as asperezas seriam mais altas, maiores deveriam ser as possibilidades para ocorrer situações de extrema pressão no contato e portanto para a atuação do aditivo.

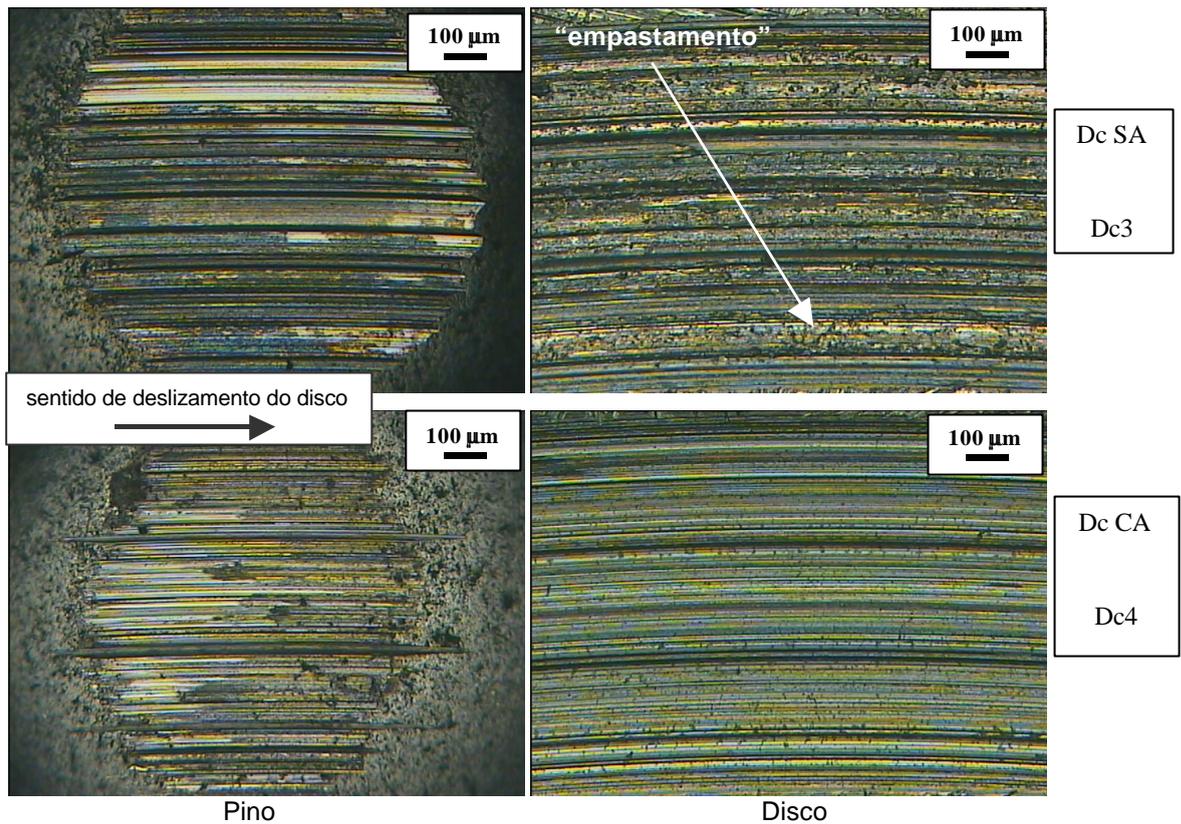
Além disso, também pode ser notado nos ensaios rotativos que a forma geométrica da área do pino foi elíptica no ensaio com óleo aditivado, indicando que o desgaste na trilha do disco do ensaio D CA foi profundo, com desgaste pequeno do pino e no ensaio D SA ocorreu o oposto.

O fato do maior desgaste em termos de profundidade e da supressão da deformação plástica severa, que ocorreu tanto no disco como na placa com o uso do óleo aditivado, pode estar relacionado à maior capacidade de conformabilidade geométrica possibilitada pelo óleo aditivado.

Já a presença de contaminante no óleo nos ensaios com maior severidade, Pc (Figura 4-12) e Dc (Figura 4-13) praticamente não acarretou modificações substanciais nas morfologias superficiais, comparadas às observadas nas respectivas condições com óleo não contaminado, P (Figura 4-10) e D (Figura 4-11). Nota-se que pequenas regiões apresentaram evidências de polimento. Isso indica que o abrasivo esteve presente, porém sua presença foi menos eficiente na alteração do mecanismo de desgaste com esse nível de carregamento.



**Figura 4-12:** Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição Pc.



**Figura 4-13:** Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição Dc.

Do exposto acima, pode-se estabelecer algumas constatações. A formação de regiões de contato bem demarcadas e com superfícies riscadas, como foi observado na grande maioria das amostras ensaiadas, indicam a ocorrência de um contato sólido-sólido de proporção considerável durante os ensaios. Nesse caso, em termos de regime de lubrificação, é improvável que os filmes lubrificantes pudessem ter sido mantidos totalmente íntegros, ou seja, contínuos entre as superfícies no contato. Assim, fenômenos puramente HD ou EHL são pouco prováveis de terem ocorrido.

Em geral, comparando os resultados com o mesmo nível de carregamento, notam-se morfologias distintas em função da utilização da aditivação. Isso ocorreu em ambos os níveis de carregamento, fato que indica que ambos os níveis de carregamento proporcionaram condições para que a aditivação pudesse atuar na interface. Conforme a literatura [HUTCHINGS, 1994], efeitos relacionados à natureza química do lubrificante, tais como da aditivação contida no lubrificante, são mais evidentes no modo de lubrificação limítrofe. Essa informação indica a ocorrência de lubrificação limítrofe em ambos os níveis de carregamento ensaiados. O modo limítrofe é relacionado à

lubrificação com ausência de um filme separador, fisicamente íntegro, no contato. Nesse caso, a proteção ao desgaste depende do desempenho físico-químico de algumas monocamadas de lubrificante presentes na interface entre as superfícies em contato.

Por outro lado, comparando os resultados obtidos em função do nível de carregamento, é óbvio que o desgaste foi menor e ocorreu sob um modo bem menos severo com o menor nível de carregamento. Isso indica que, com o menor nível de carregamento, o filme de lubrificante pôde atuar fisicamente de maneira mais eficiente na proteção ao desgaste. Observa-se com isso que é improvável que o contato com ambos os níveis de carregamento tenha ocorrido sob um único modo de lubrificação limítrofe. Mais ainda porque, com superfícies rugosas como as amostras ensaiadas, regiões com filme fluido podem ter ocorrido no contato.

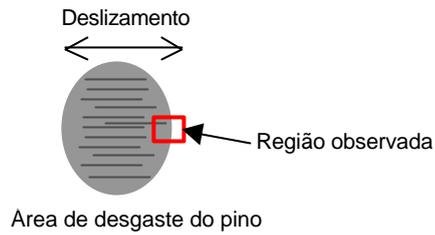
Entretanto, foi visto que as condições de carga e velocidade utilizadas determinaram o modo misto de lubrificação para todos os ensaios, conforme o diagrama IRG mostrado na Figura 3-21 (Cap. 3). Ainda que a lubrificação seja mista em todos os ensaios, foi possível observar com os resultados microscópicos que, dependendo do nível de carregamento utilizado, a preponderância de atuação dos fenômenos da lubrificação limítrofe e EHL foi diferenciada.

#### **4.1.3.2 Microscopia eletrônica de varredura**

Superfícies observadas em MEV com maior aumento confirmaram as características descritas nas observações com o microscópio óptico, de riscamento, escurecimento e de deformação plástica das superfícies dos pinos e dos contra-corpos. A seguir, serão apresentadas em detalhe as morfologias observadas.

##### **4.1.3.2.1 Pinos**

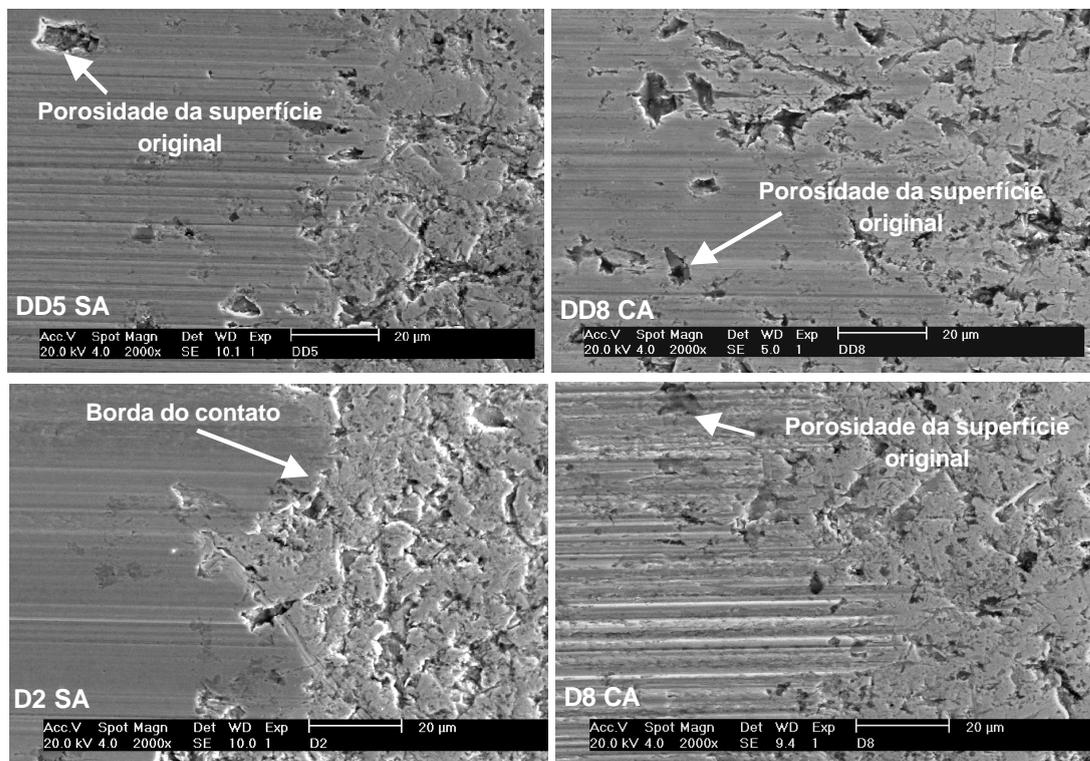
A região observada é próxima à borda de saída da conjunção do contato deslizante, centrada verticalmente, tomando como referência o mesmo posicionamento adotado para a microscopia óptica. A Figura 4-14 indica a região observada.



**Figura 4-14:** Esquema indicativo da localização da região na área de desgaste dos pinos observados no MEV, delimitada pelo quadrado vermelho.

Na Figura 4-15, estão apresentadas algumas superfícies de pino resultantes dos ensaios rotativos. As principais observações são:

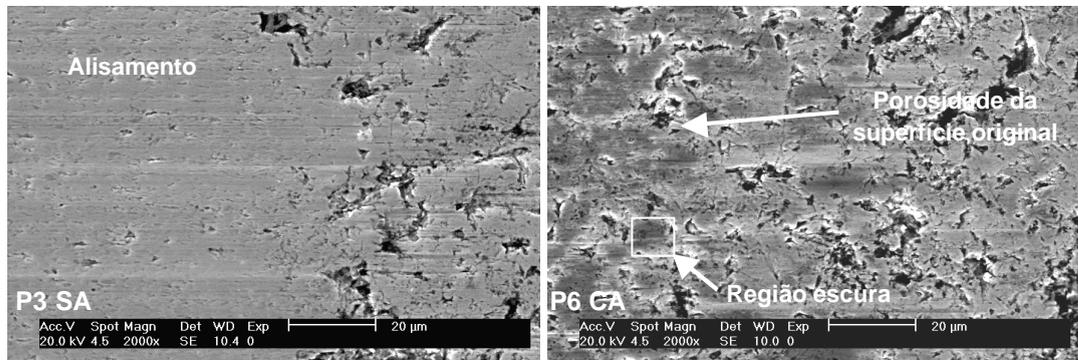
- Na condição DD, de um modo geral, a porosidade da superfície original ainda é visualizada, isto é, o desgaste foi pequeno;
- Na condição DD SA, houve um maior riscamento do que na condição DD CA;
- Na condição D SA, houve a formação de uma borda de contato nítida, isto é, o desgaste foi maior do que na condição D CA.



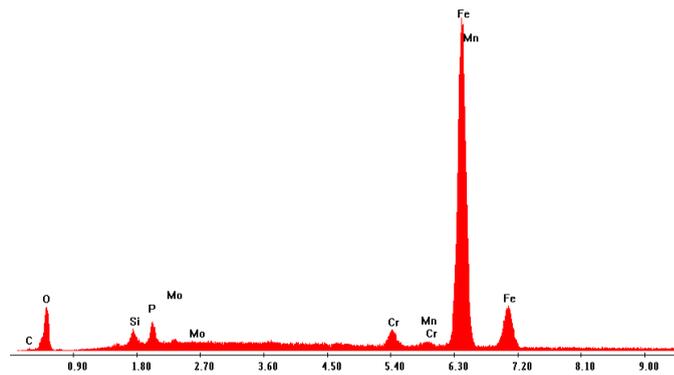
**Figura 4-15:** Aparência microscópica da área de desgaste de pinos após ensaio nas condições DD e D. Imagens de elétrons secundários.

Na Figura 4-16 estão apresentadas superfícies de pino resultantes dos ensaios oscilatórios. As observações são:

- Na condição P SA, a superfície foi mais lisa, com a porosidade inicial quase totalmente ausente; logo, o desgaste foi maior do que no P CA;
- Na condição P CA, a porosidade inicial ficou ainda bem visível e a área desgastada ficou escurecida.
- O espectro obtido por espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDAX<sup>33</sup>) no pino do ensaio CA, mostrado na Figura 4-17, revela que o elemento P (provavelmente do aditivo EP) esteve aderido nessa região.



**Figura 4-16:** Aparência microscópica da área de desgaste de pinos após ensaio na condição P. Imagens de elétrons secundários.



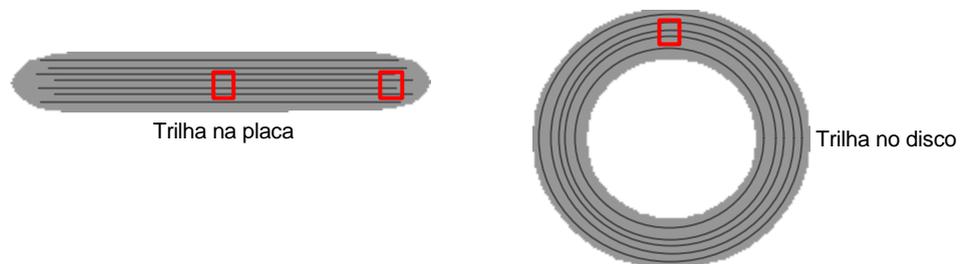
**Figura 4-17:** Espectro obtido por EDAX referente à análise química da região escura indicada no pino do ensaio P6 CA.

<sup>33</sup> As análises químicas por EDAX foram efetuadas com o MEV do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da EPUSP.

#### 4.1.3.2.2 Placas e discos

As observações das superfícies das placas estiveram localizadas tanto próximo a uma das extremidades laterais da trilha, como na região central da trilha. Já as superfícies analisadas dos discos estiveram localizadas próximo à região central da pista.

A Figura 4-18 mostra esquematicamente as regiões observadas na trilha da placa e do disco.



**Figura 4-18:** Esquema indicativo das regiões das trilhas das placas e dos discos observados no MEV, delimitadas pelos quadrados vermelhos.

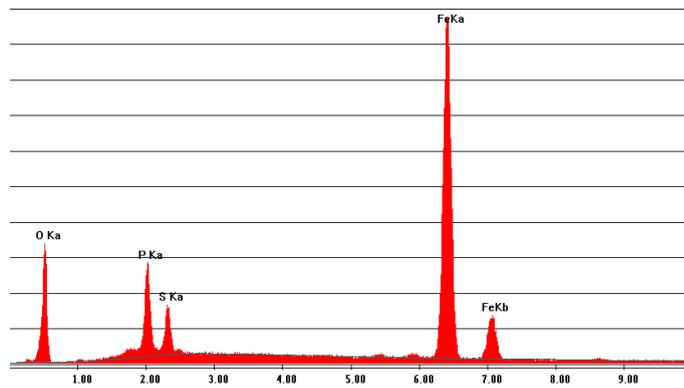
#### Placas

Na Figura 4-19 observa-se as superfícies das extremidades das trilhas de placas ensaiadas na condição PP. Nota-se que:

- Na condição PP SA, o desgaste foi pequeno pois o sulco do acabamento original ainda pode ser visto;
- O desgaste foi ainda menor no PP CA, pois os sulcos do acabamento inicial são mais visíveis do que no PP SA.
- A superfície desgastada no ensaio PP CA apresentou regiões escuras, cujo espectro obtido por EDAX (vide Figura 4-20) indicou a presença dos elementos P e S.

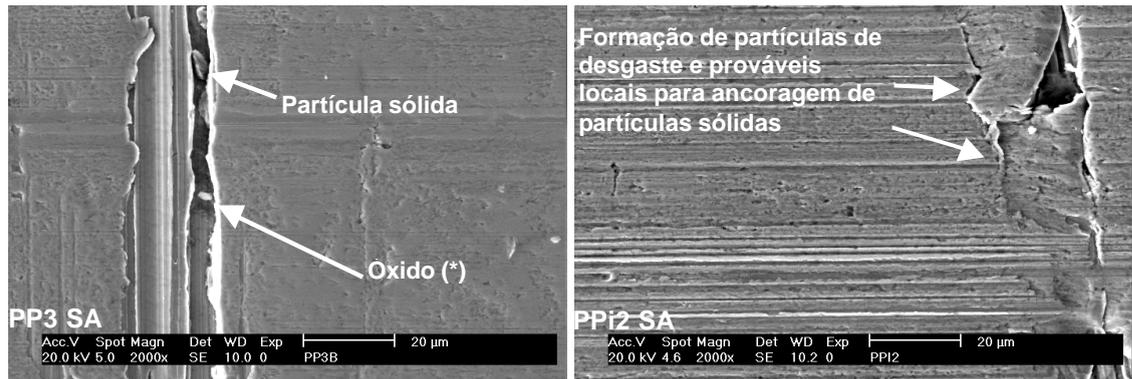


**Figura 4-19:** Aparência microscópica da trilha de desgaste de placas após ensaio na condição PP, região próxima à extremidade lateral. Imagens de elétrons secundários.



**Figura 4-20:** Espectro obtido por EDAX referente à análise química da região escura indicada na placa do ensaio PP6 CA.

A Figura 4-21 mostra que as reentrâncias formadas pela permanência do acabamento inicial da placa poderiam servir de ancoragem para as partículas sólidas que entram na interface.



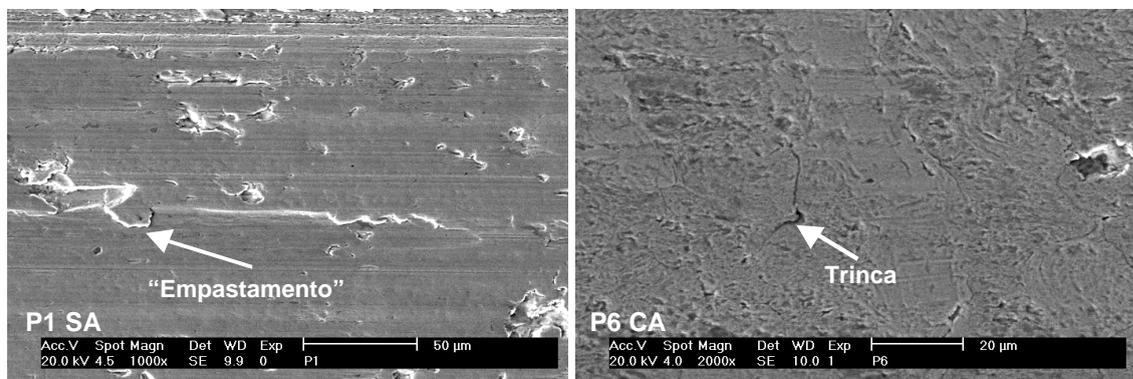
(\*) Óxido foi evidenciado pela visualização de picos de ferro e oxigênio no espectro por EDAX

**Figura 4-21:** Aparência microscópica da trilha de desgaste de placas após ensaio na condição PP, região central da trilha, evidenciando partículas nos sulcos do acabamento original. Imagens de elétrons secundários.

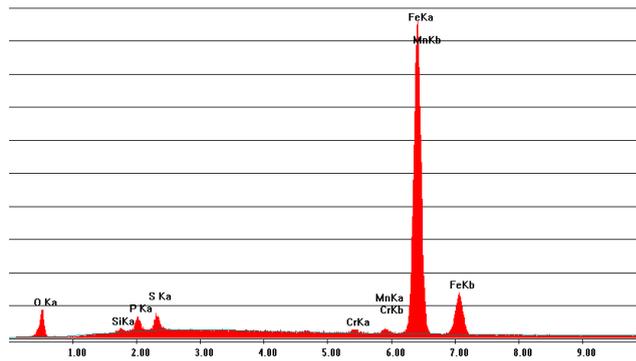
Na Figura 4-23, observa-se as superfícies das placas ensaiadas na condição P.

Nota-se que:

- O desgaste desta condição (P) foi maior que na condição PP, pois os sulcos do acabamento original não são mais vistos;
- Na placa da condição P SA, houve a confirmação da deformação plástica vista com a microscopia óptica. Já na placa da condição P CA, a superfície foi visualmente mais lisa, com ocorrência de trincas.
- O espectro da análise química da região indicou a presença dos elementos P e S (vide Figura 4-23), indicando que o efeito triboquímico esteve presente nesse nível de carregamento, mesmo apresentando uma área onde não são observadas regiões com escurecimentos diferenciados.



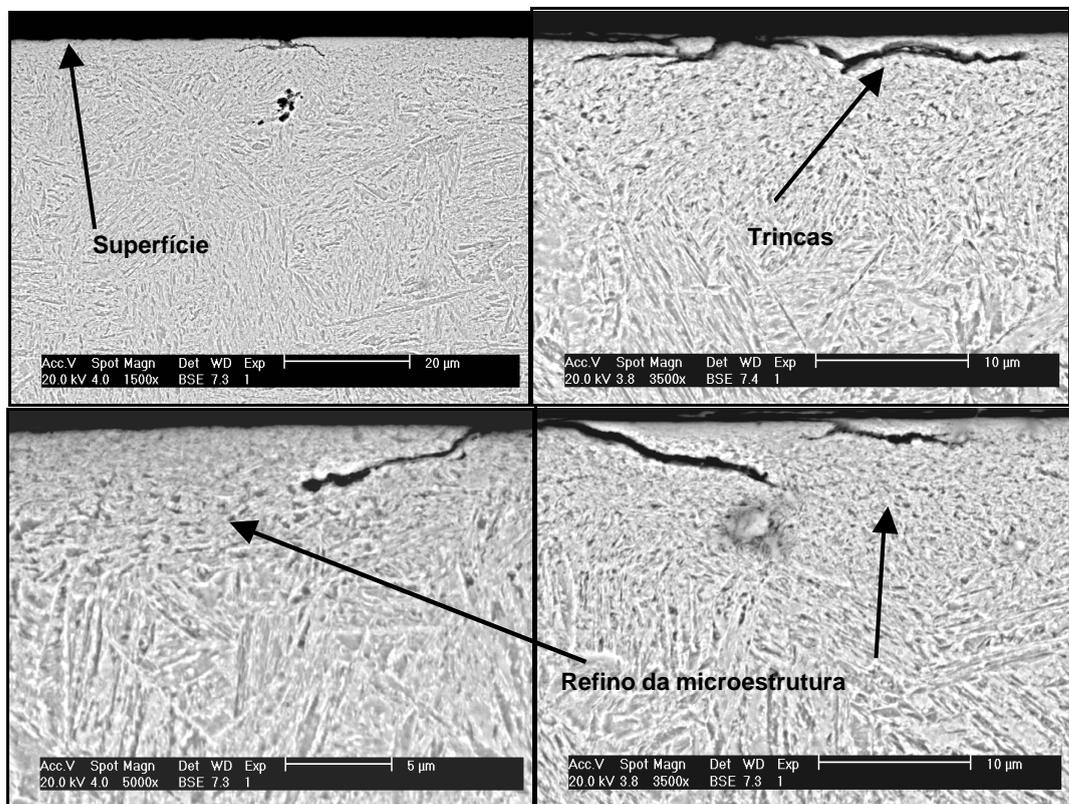
**Figura 4-22:** Aparência microscópica da trilha de desgaste de placas após ensaio na condição P, região próxima à extremidade lateral da trilha. Imagens de elétrons secundários.



**Figura 4-23:** Espectro obtido por EDAX referente à análise química da superfície da extremidade lateral da placa do ensaio P6 CA.

A presença do trincamento na superfície da amostra ensaiada na condição P revela que um mecanismo como a fadiga superficial pode ter atuado nessa condição de ensaio. Para um maior detalhamento desse trincamento na superfície, procedeu-se ao corte transversal na amostra para a observação sub-superficial.

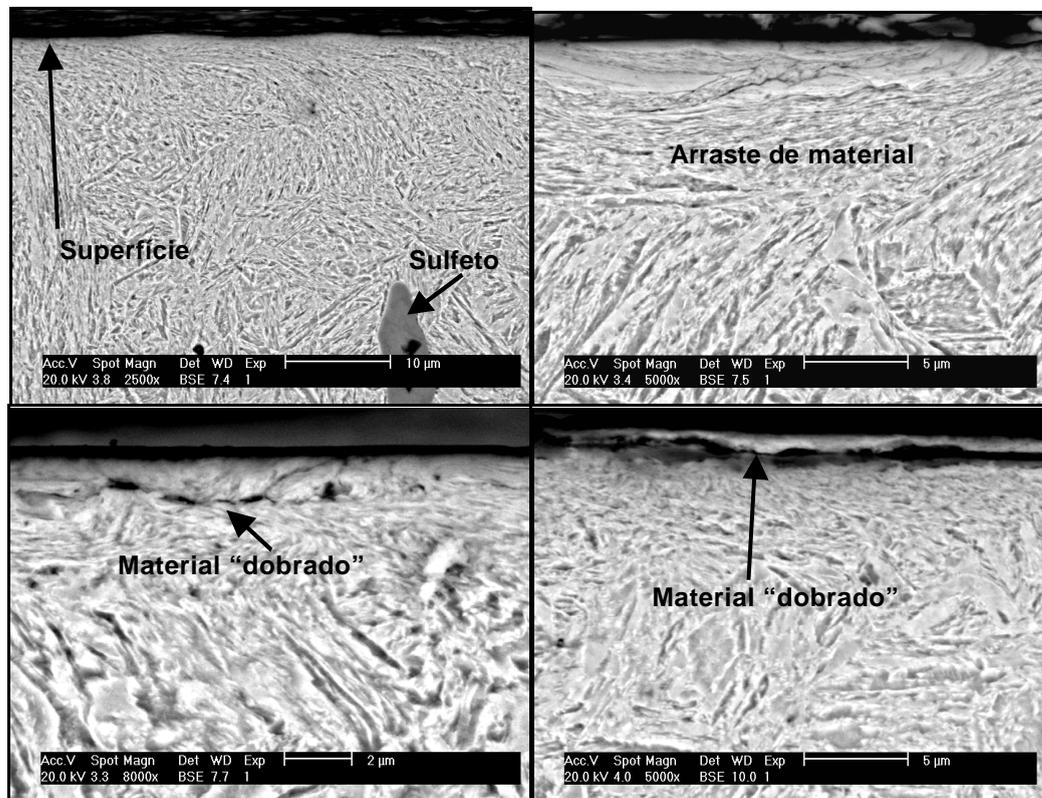
A Figura 4-24 e a Figura 4-25 mostram, respectivamente, as seções transversais da placa P6 CA e P1 SA na região sub-superficial afetada pelo desgaste.



**Figura 4-24:** Região sub-superficial afetada pelo desgaste da placa do ensaio P6 (CA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.

Nota-se pela Figura 4-24, que a microestrutura próximo à superfície ensaiada na condição aditivada sofreu uma modificação, tornando-se mais fina. Observam-se trincas emergindo à superfície, típicas de fadiga de contato.

Já na amostra do ensaio com óleo não aditivado, observa-se pela Figura 4-25 que a estrutura do material sub-superficial afetado pelo desgaste não apresenta trincamentos como observados na amostra do ensaio com óleo aditivado. Por outro lado, notam-se nas microfotografias apresentadas regiões com arraste de material. Na superfície, é possível notar a presença de material como que “dobrado”, evidenciando que houve deformação plástica pronunciada devido ao contato nesse ensaio.



**Figura 4-25:** Região sub-superficial afetada pelo desgaste da placa do ensaio P1 (SA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.

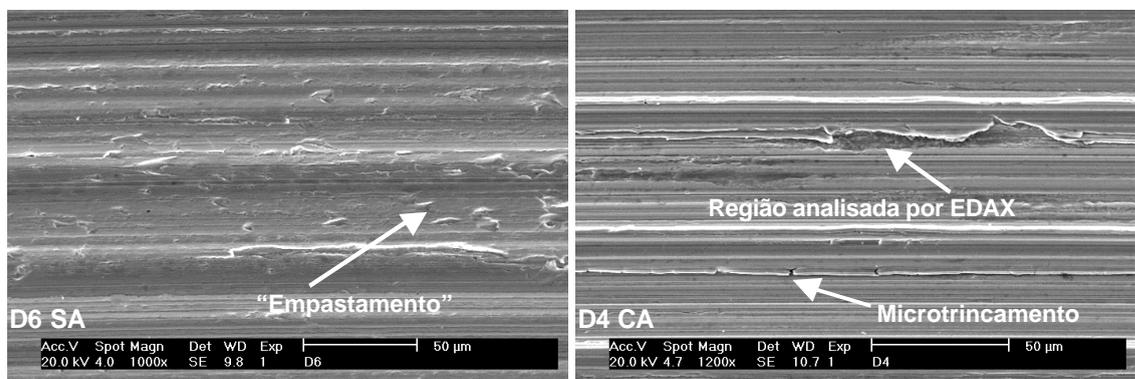
As observações das características sub-superficiais confirmam que houve a atuação de diferentes mecanismos de desgaste em função da condição de aditivação nos ensaios oscilatórios sob maior nível de carregamento. É possível que as alterações no material tenham ocorrido durante a fase de assentamento do ensaio, onde a alta rugosidade presente, aliado à utilização da aditivação, provocassem um mecanismo de

desgaste sem deformação, porém originando características de propensão ao trincamento no material da superfície. Com a ausência do aditivo anti-desgaste, o contato metálico seria mais intenso na fase de assentamento, levando ao arraste de material visto na Figura 4-25.

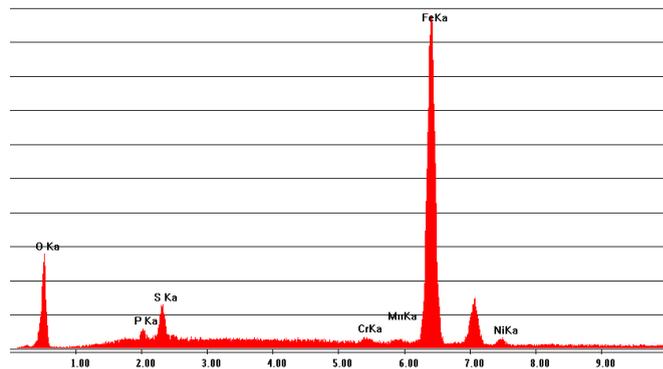
## Discos

Na Figura 4-26, observa-se as superfícies dos discos ensaiados na condição D. Nota-se que:

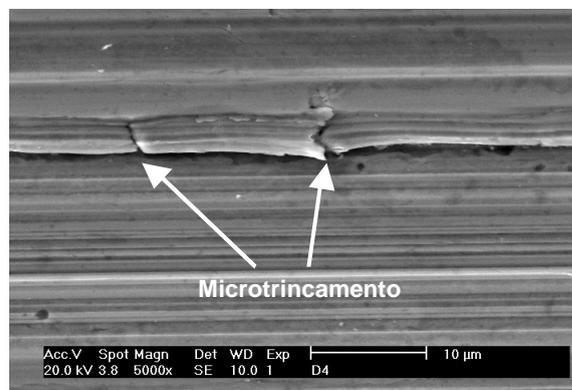
- Como na condição P, o desgaste nesta condição foi também foi alto, pois os sulcos do acabamento original não são vistos;
- Na condição D SA, houve deformação plástica similar à vista na P SA;
- Na condição D CA, a superfície apresentou mais riscos na direção do deslizamento que na condição D SA.
- A análise química revelou a presença dos elementos P e S no sulco da superfície ensaiada na condição D CA (vide Figura 4-27);
- Diferentemente dos ensaios oscilatórios, detalhes de microtrincamentos na superfície puderam ser vistos apenas nas abas formadas pelo riscamento na amostra do ensaio D CA. Isso evidencia a pré-formação de uma partícula de desgaste. O detalhe é melhor visto na Figura 4-28;
- Comparando as superfícies ensaiadas nas condições P CA e D CA, notam-se nítidas diferenças morfológicas entre ambas.



**Figura 4-26:** Aparência microscópica das superfícies de disco após ensaio na condição D. Imagens de elétrons secundários.

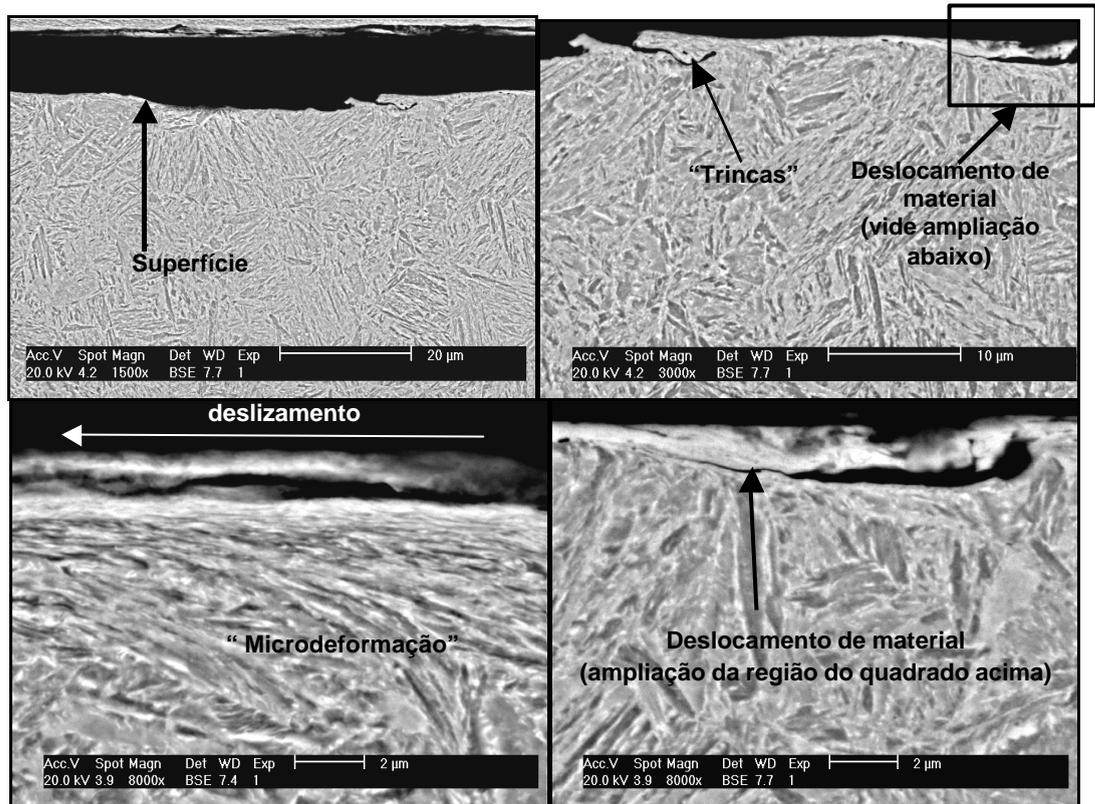


**Figura 4-27:** Espectro obtido por EDAX referente à análise química na região do sulco da superfície do disco do ensaio D4 CA.



**Figura 4-28:** Aparência microscópica da trilha de desgaste do disco do ensaio D4, com detalhe do microtrincamento e a aparente pré-formação de uma partícula de desgaste. Imagem de elétrons secundários.

Para efeito comparativo com as seções das amostras ensaiadas com o sistema oscilatório, as amostras de disco dos ensaios D4 e D6 foram seccionadas e observadas no MEV. As seções transversais estão apresentadas na Figura 4-29 e na Figura 4-30.



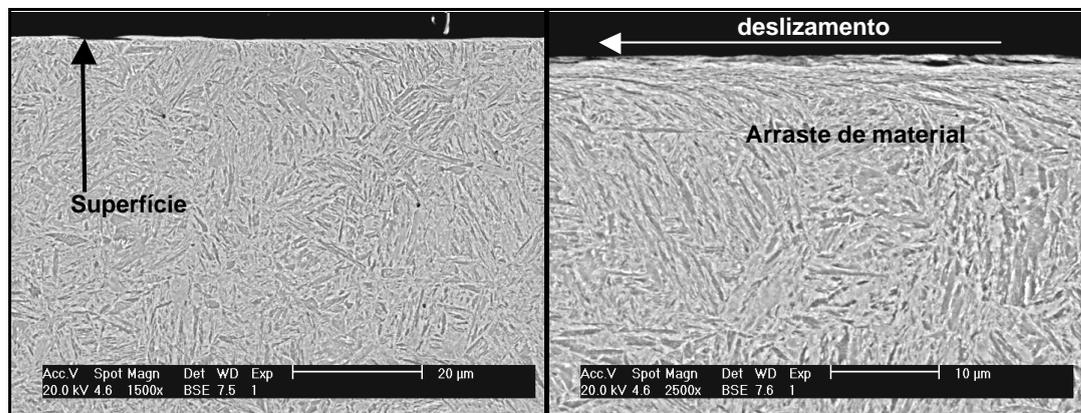
**Figura 4-29:** Região sub-superficial afetada pelo desgaste do disco do ensaio D4 (CA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.

Na sub-superfície do disco do ensaio D4 CA (Figura 4-29), é possível notar a presença de morfologias similares a trincas emergindo à superfície. Entretanto, nessa mesma amostra, é possível também notar, próximo a essas regiões com trincas aparentes, áreas com evidências de deslocamento de material e de microdeformação sub-superficial. Assim, embora a aparência indique uma similaridade com trinca, essa morfologia pode estar relacionada a um arraste de material na superfície.

Ainda na amostra do ensaio D4 CA, também não há evidências de refino da microestrutura sub-superficial, da forma vista na amostra do ensaio oscilatório com óleo aditivado. As microtrincas que apareceram na superfície da amostra do ensaio D4 CA ocorreram apenas nas abas formadas pelo riscamento. Assim, o comparativo dos resultados dos ensaios oscilatório (P6 CA) e rotativo (D4 CA) mostrou que a ocorrência de deformação plástica na interface lubrificada com óleo aditivado foi maior no ensaio rotativo.

Já na Figura 4-30, correspondente à sub-superfície do disco do ensaio D6 SA, não se notam trincas, e é possível também visualizar uma deformação microestrutural da sub-superfície, que, conforme as ampliações das microfotografias, é maior que a observada na amostra do ensaio rotativo com óleo aditivado.

Como observado nos ensaios oscilatórios, os mecanismos atuantes no contato rotativo também produziram diferentes resultados em função da condição de aditivação do óleo, embora a diferença vista nas sub-superfícies das amostras dos ensaios rotativos tenha sido menor do que a diferença observada com os ensaios oscilatórios.



**Figura 4-30:** Visualização da região sub-superficial afetada pelo desgaste do disco do ensaio D6 (SA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.

Um resumo dos resultados microscópicos pode ser visto na Tabela 4-3.

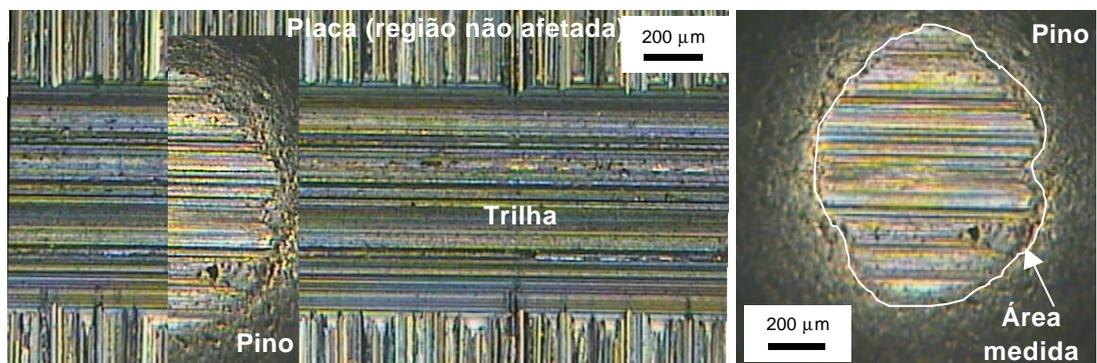
**Tabela 4-3: Principais características morfológicas visualizadas em cada condição de ensaio.**

Código	Aditivo	Conta minante	Carregamento	Aparência do pino (contra-corpo)
DD CA	X		Mo	Azulado (disco: desgaste somente nas asperezas)
DDc CA	X	X	Mo	Polimento (disco: desgaste somente nas asperezas)
DD SA			Mo	Riscamento fino (disco: desgaste somente nas asperezas)
DDc SA		X	Mo	Polimento (disco: desgaste somente nas asperezas)
PP CA	X		Mo	Marrom (placa com pontos pretos e desgaste nas asperezas)
PPc CA	X	X	Mo	Polimento (placa: desgaste somente nas asperezas)
PP SA			Mo	Cinza, lisa (placa: desgaste somente nas asperezas)
PPc SA		X	Mo	Polimento (placa: desgaste somente nas asperezas)
D CA	X		Se	Riscamento, clara (disco: riscos uniformes, "microdeformação" sub-superficial)
Dc CA	X	X	Se	Riscamento, pequena evidência de polimento
D SA			Se	Riscamento severo (disco: "arraste" de material na sub- e superfície)
Dc SA		X	Se	Riscamento, pequena evidência de polimento
P CA	X		Se	Preta, lisa, elíptica (placa: afinamento microestrutural e trinca sub-superficial)
Pc CA	X	X	Se	Pequena evidência de polimento
P SA			Se	Riscamento severo (placa: "arraste" de material nas sub- e superfície)
Pc SA		X	Se	Riscamento, pequena evidência de polimento

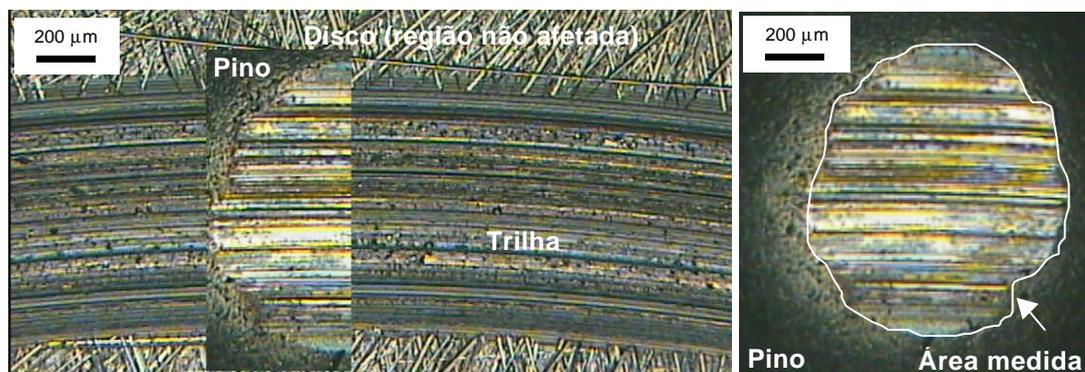
#### 4.1.4 Desgaste dimensional

Conforme mencionado anteriormente, uma maneira de se avaliar o desgaste nos ensaios realizados é através da medição da área projetada de desgaste do pino. As medições de área foram realizadas através de um programa de análise de imagens (*Leica Qwin Standard V.2.2*).

Inicialmente, a largura da trilha do contra-corpo também foi medida, porém, foi verificado que essa largura corresponde ao raio da área no pino, ou, no caso de áreas elípticas, à diagonal maior da elipse. A Figura 4-31 e Figura 4-32 mostram resultados de área afetada pelo desgaste, onde pode ser visto que a largura da trilha no contra-corpo corresponde à diagonal maior da área afetada no pino. As mesmas Figuras mostram as respectivas áreas tomadas para medição. A superposição da área do pino com a trilha do contra-corpo ressalta a correspondência das reentrâncias resultantes nas superfícies desgastadas, mencionada anteriormente na análise microscópica.



**Figura 4-31: Ensaio P7 (óleo não aditivado).**



**Figura 4-32: Ensaio D1 (óleo não aditivado).**

Nesse ponto, é importante ressaltar que algumas condições de ensaio levaram à formação de uma borda escurecida na área de contato do pino. Tal região escurecida, quando presente, foi considerada na medição. Foi discutido anteriormente que o escurecimento da borda pode ser ocasionado por mecanismos de oxidação ao redor do contato. Assim, a região escurecida pode não ter necessariamente sofrido interação com o contra-corpo e, portanto, não contribuiria para o desgaste na forma de perda de material. Apesar disso, na medição da área, tomou-se tal região como sendo também afetada pelos fenômenos do contato deslizante que ocorreram durante o ensaio, lembrando também que o desgaste é descrito por BAYER (1994) como qualquer dano superficial, provocado por uma interação mecânica com outra superfície, corpo ou fluido. Nas Figuras a seguir (Figura 4-33 e Figura 4-34) podem ser observados exemplos dessa situação e as respectivas áreas consideradas nas medições.



**Figura 4-33: Ensaio PP4 (óleo não aditivado).**



**Figura 4-34: Ensaio DD4 (óleo aditivado).**

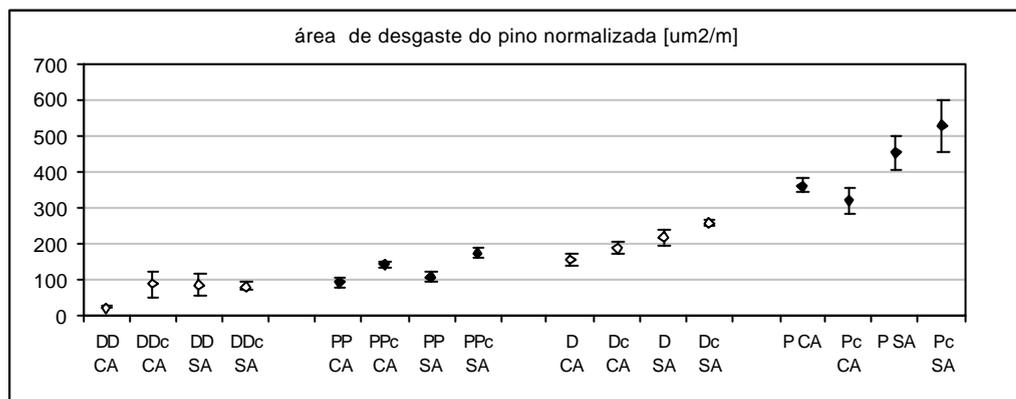
A Tabela 4-4 mostra os valores médios da área do pino afetada pelo desgaste, resultantes de cada condição ensaiada. Para o estudo comparativo do desgaste em cada condição, procedeu-se a uma normalização das áreas em função da distância percorrida no ensaio, cujos valores também são apresentados na Tabela.

**Tabela 4-4: Valores médios e normalizados da área afetada no ensaio medida no pino, resultantes em cada condição de ensaio.**

Código do ensaio	Área média [ $\mu\text{m}^2$ ]	Desvio-padrão [ $\mu\text{m}^2$ ]	Distância [m]	Área normalizada [ $\mu\text{m}^2/\text{m}$ ]	Desvio-padrão [ $\mu\text{m}^2/\text{m}$ ]
DD CA	165842	22239	6912	24	3
DDc CA	602022	273485	6912	87	40
DD SA	575943	218465	6912	83	32
DDc SA	559463	77562	6912	81	11
PP CA	298094	45215	3200	93	14
PPc CA	455040	28948	3200	142	9
PP SA	338384	40830	3200	106	13
PPc SA	558668	39624	3200	175	12
D CA	540721	61878	3456	156	18
Dc CA	654762	49021	3456	189	14
D SA	754981	78647	3456	218	23
Dc SA	895941	33291	3456	259	10
P CA	581052	32575	1600	363	20
Pc CA	755978	488024	1600	321	35
P SA	726566	80731	1600	454	50
Pc SA	848741	117680	1600	530	74

Obs.: Desvpad = desvio-padrão dos valores medidos

A Figura 4-35 mostra os valores médios das taxas de desgaste obtidas a partir das medições da área do pino afetada no ensaio.



**Figura 4-35: Valores normalizados da área projetada de desgaste do pino resultantes dos ensaios realizados.**

Pelos resultados da Figura 4-35, nota-se uma evolução da área afetada pelo desgaste, com o menor valor na condição rotativa com menor carregamento (série DD) e o maior valor na condição oscilatória com maior carregamento (série P).

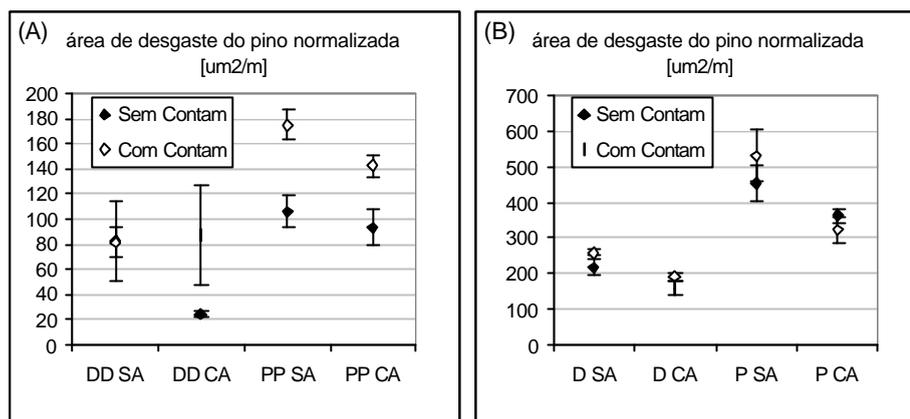
Em termos dos efeitos esperados no desgaste devidos às influências da presença da contaminação, da aditivação do óleo e do aumento no carregamento, faz-se necessário considerar previamente as ações causadas no contato por tais influências. A Tabela 4-5 apresenta um resumo das principais ações esperadas no contato conforme o tipo de influência em questão.

**Tabela 4-5: Ações causadas no contato pelo tipo de influência.**

<b>Tipo de influência</b>	<b>Ação esperada no contato</b>	<b>Condições de ensaio a serem comparadas para observar o efeito</b>	
Presença da contaminação no óleo	Aumentar a distância microscópica das superfícies pela inserção das partículas sólidas na interface do contato e promover desgaste por mecanismo abrasivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PP SA - PPc SA</li> <li>• PP CA - PPc CA</li> <li>• P SA - Pc SA</li> <li>• P CA - Pc CA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DD SA - DDc SA</li> <li>• DD CA - DDc CA</li> <li>• D SA - Dc SA</li> <li>• D CA - Dc CA</li> </ul>
Presença do aditivo no óleo	Pelo efeito triboquímico, formar um filme isolante, protetivo ao desgaste e ao atrito, de baixa tensão ao cisalhamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PP SA - PP CA</li> <li>• PPc SA - PPc CA</li> <li>• P SA - P CA</li> <li>• Pc SA - Pc CA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DD SA - DD CA</li> <li>• DDc SA - DDc CA</li> <li>• D SA - D CA</li> <li>• Dc SA - Dc CA</li> </ul>
Aumento do carregamento mecânico no ensaio	Intensificar o contato metálico e diminuir a separação média entre as superfícies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PP SA - P SA</li> <li>• PPc SA - Pc SA</li> <li>• PP CA - P CA</li> <li>• PPc CA - Pc CA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DD SA - D SA</li> <li>• DDc SA - Dc SA</li> <li>• DD CA - D CA</li> <li>• DDc CA - Dc CA</li> </ul>

Considerando as ações descritas na Tabela 4-5, os efeitos esperados da contaminação e do carregamento seriam de aumentar o desgaste, enquanto que o efeito esperado da aditivação seria de diminuir o desgaste. Para analisar os efeitos ocorridos nos ensaios realizados, procedeu-se a uma reorganização dos resultados, conforme mostrado na Figura 4-36 à Figura 4-38.

A Figura 4-36 mostra os resultados de área de desgaste em termos da observação do efeito da presença do contaminante no óleo.

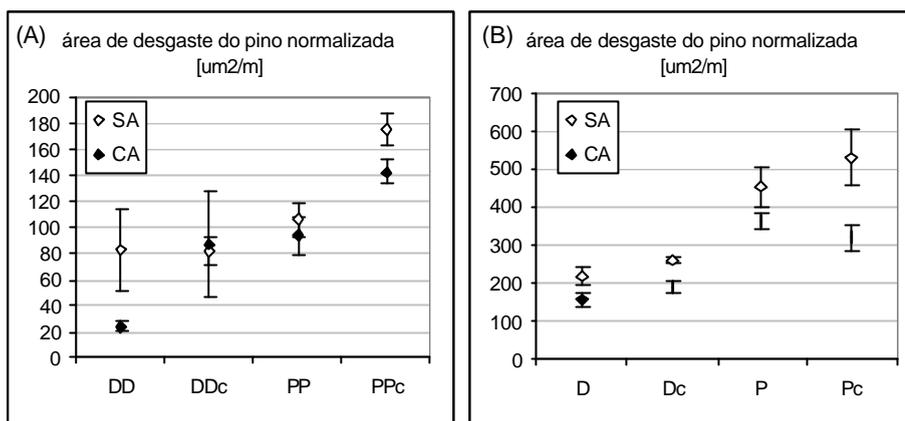


**Figura 4-36: Valores normalizados da área de desgaste do pino resultantes dos ensaios com menor carregamento (A) e maior carregamento (B). Efeito da utilização do contaminante no óleo.**

Observa-se uma maior influência da contaminação nos ensaios com menor carregamento (Figura 4-36A). Nesse nível, apenas a condição DD SA mostrou não ser influenciada pela presença de contaminante no óleo. Já nos ensaios com maior carregamento (Figura 4-36B), nota-se que os valores médios do desgaste foram próximos. Uma análise estatística foi efetuada para comparar os resultados dos ensaios D SA com Dc SA e D CA com Dc CA. A análise mostrou que os valores são estatisticamente diferentes entre si num nível de significância de 0,5%, porém se tornam iguais para um nível de 0,25%<sup>34</sup>.

Quanto ao efeito do uso do óleo aditivado no desgaste, nota-se pela Figura 4-37 uma tendência de, em média, diminuir o desgaste quando o óleo aditivado foi utilizado.

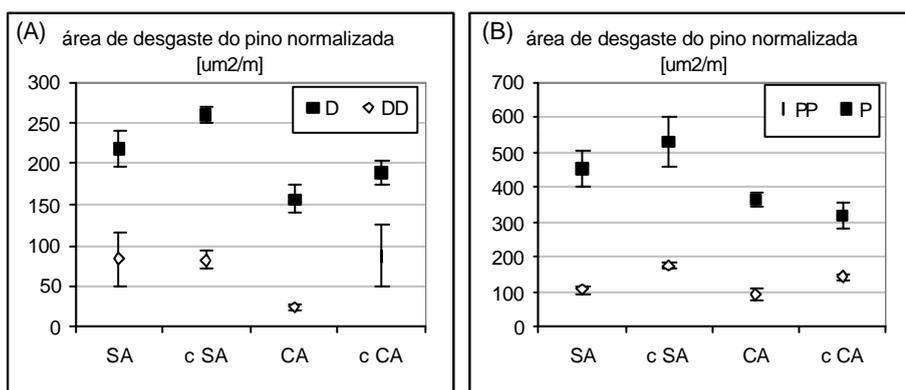
<sup>34</sup> Para a análise estatística dos resultados, utilizou-se o método da análise de variâncias para a comparação de várias médias, conforme descrito por COSTA NETO (1977), p.153.



**Figura 4-37:** Valores normalizados da área de desgaste do pino resultantes dos ensaios com menor carregamento (A) e maior carregamento (B). Efeito da utilização do óleo com aditivo.

Nota-se, entretanto, que, em algumas condições, o efeito não foi significativo. Nos ensaios rotativos, não houve efeito na condição DDc; já nos ensaios oscilatórios, a condição PP (com óleo não contaminado) não apresentou efeito significativo relativo ao uso do óleo aditivado.

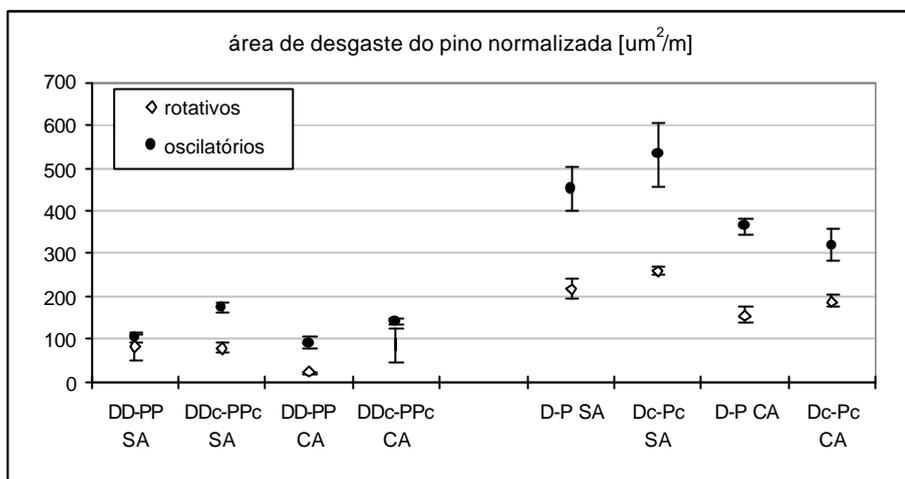
Em termos do efeito do carregamento mecânico, observa-se pela Figura 4-38 um efeito significativo com todas as condições, tanto com óleo sem/com aditivo (SA e CA) e sem/com contaminante (c SA e c CA), conforme esperado.



**Figura 4-38:** Valores normalizados da área de desgaste do pino resultantes dos ensaios rotativos (A) e oscilatórios (B). Efeito do carregamento mecânico (condição de velocidade e carga).

Para a verificação de diferenças no desgaste em termos de área afetada no pino entre os sistemas de ensaio, os valores obtidos em cada condição foram superpostos,

como mostrado na Figura 4-39. Nota-se que o ensaio oscilatório levou a um maior desgaste em todas as condições, mais evidente nas condições com maior carregamento.



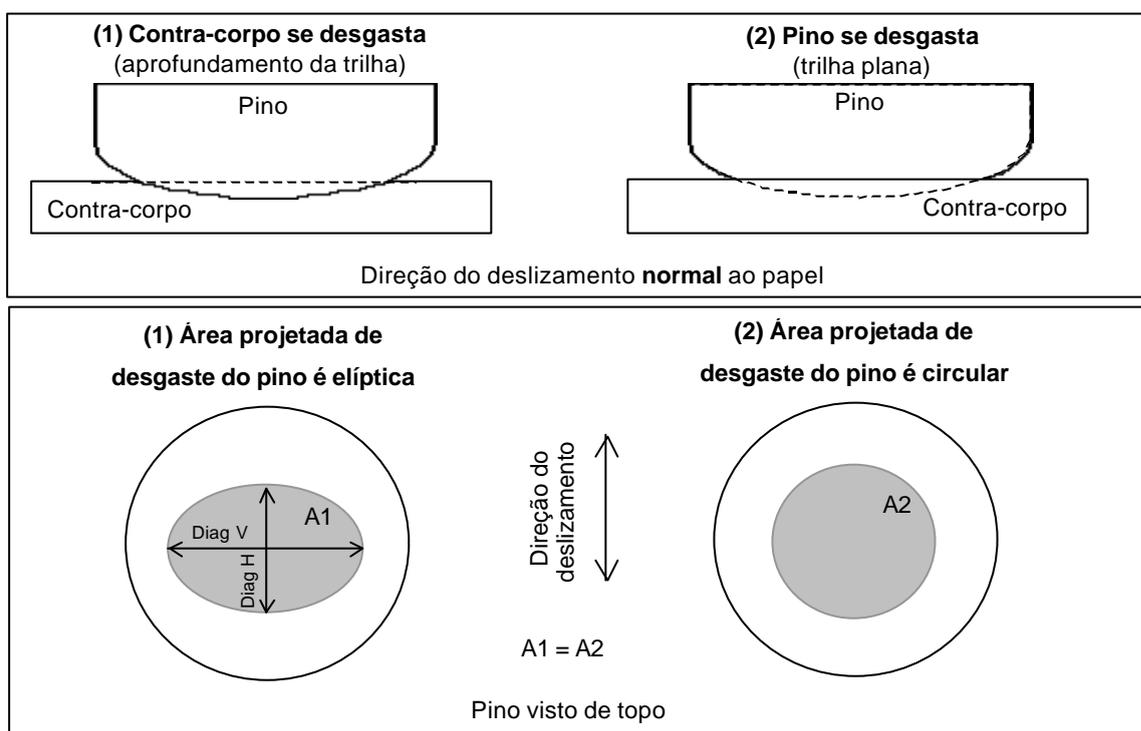
**Figura 4-39:** Valores normalizados da área de desgaste do pino em função da condição de ensaio; visualização das diferenças entre os sistemas mecânicos.

Uma análise em termos percentuais revelou que a diferença na área do pino afetada pelo desgaste foi em média maior com o menor nível de carregamento, como mostrado na Tabela 4-6. É possível que as diferenças vistas entre os resultados com os dois sistemas possam estar relacionadas às diferenças sistêmicas entre os dois dispositivos utilizados. Isso será discutido em item posterior (vide Cap.5 - Discussão).

**Tabela 4-6:** Diferença percentual nas áreas de desgaste do pino normalizadas resultantes dos ensaios com menor e maior nível de carregamento.

Carregamento	Condição	Área média normalizada [ $\mu\text{m}^2/\text{m}$ ]	Área média normalizada [ $\mu\text{m}^2/\text{m}$ ]	Diferença oscilatórios – rotativos (%)
		Ensaio oscilatórios	Ensaio rotativos	
Mo	DD SA e PP SA	106	83	26,9
	DDc SA e PPc SA	175	81	115,7
	DD CA e PP CA	93	24	288,3
	DDc CA e PPc CA	142	87	63,3
Média				<b>123,5</b>
Se	D SA e P SA	454	218	107,9
	Dc SA e Pc SA	530	259	104,6
	D CA e P CA	363	156	132,1
	Dc CA e Pc CA	321	189	69,2
Média				<b>103,5</b>

Uma observação quanto à comparação do desgaste resultante em cada condição apenas pela medição da área afetada do pino é o fato de que, devido à ocorrência de desgaste acentuado no contra-corpo em algumas condições (discutido anteriormente na Figura 4-5), o desgaste global pode ter resultado diferente. A Figura 4-40 mostra duas situações em que as áreas do pino afetadas pelo desgaste podem ter resultado iguais, porém com um desgaste global diferente, dependendo da ocorrência ou não de um aprofundamento na trilha do contra-corpo.

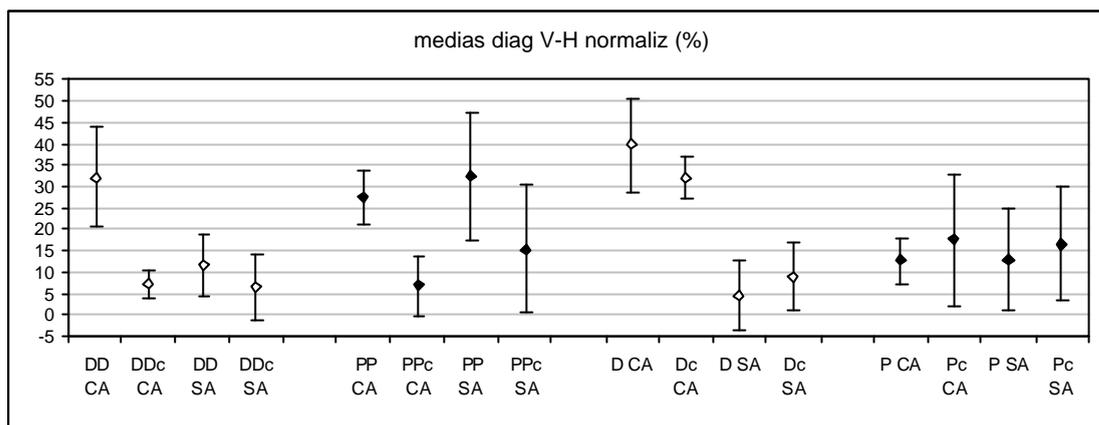


**Figura 4-40:** Ilustração esquemática de duas situações de desgaste nos ensaios. (1) Desgaste preferencial do contra-corpo; (2) Desgaste preferencial do pino.

Uma maneira de analisar a ocorrência ou não de aprofundamento da trilha do contra-corpo é através da comparação das duas diagonais ortogonais do pino. A diferença do comprimento das diagonais ortogonais da área evidencia a característica elíptica da mesma. Quanto maior a diferença entre as diagonais (diferença V-H), mais elíptica é a área no pino e maior o aprofundamento da trilha no contra-corpo.

A Figura 4-41 mostra os resultados das diferenças das diagonais medidas, V-H, da área do pino afetada pelo desgaste, em função das condições de ensaio. Os valores medidos das diagonais foram normalizados pela distância percorrida em cada condição.

Nota-se pela Figura que a característica elíptica da área foi distinta para cada série de ensaios. A Tabela 4-7 mostra um resumo com as condições que apresentaram os maiores percentuais. Ressalta-se que o maior percentual elíptico está relacionado a um desgaste do pino reduzido em relação ao desgaste do contra-corpo.



**Figura 4-41:** Diferença percentual do comprimento das diagonais ortogonais, V e H, da área elíptica do pino.

**Tabela 4-7:** Condições que apresentaram maior percentual de tendência à forma elíptica na área do pino afetada pelo desgaste.

Série	Condições do óleo
DD	CA
D	CA e CA contaminado
PP	SA e CA
P	Não houve diferenciação

Uma observação é quanto ao efeito da presença do contaminante na formação da área elíptica com o menor nível de carregamento (séries DD e PP). A característica elíptica tendeu a diminuir com a introdução do contaminante, com uma diminuição significativa da condição PP para PPc e da condição DD para DDc (com óleo aditivado), conforme análise estatística efetuada com nível de significância  $\alpha = 5\%$ . Ou seja, nessas condições, a presença do contaminante afetou mais o desgaste no pino e menos no contra-corpo.

Por outro lado, o percentual elíptico elevado observado nas condições D CA e Dc CA indica que, nessas duas condições de ensaio, apesar do óleo ser aditivado, o desgaste por aprofundamento da trilha do contra-corpo foi significativamente acentuado

em relação ao desgaste do pino, se comparado às respectivas condições com óleo não aditivado (D SA e Dc SA).

As comparações mencionadas quanto à característica elíptica contrastam com as comparações realizadas quanto à área do pino afetada pelo desgaste (vide Figura 4-36 e Figura 4-37), por serem exatamente opostas. Nessas comparações (reunidas novamente na Tabela 4-8), a área diminuiu enquanto que a diferença das diagonais aumentou.

**Tabela 4-8: Condições de ensaio que apresentaram efeito contrário na comparação do tamanho da área do pino afetada pelo desgaste e da diferença entre as diagonais ortogonais da área.**

Comparação	Efeito observado	Área de desgaste normalizada [ $\mu\text{m}^2/\text{m}$ ]	Diferença entre as diagonais normalizada [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
PP SA com PPc SA	Contaminação	aumentou	diminuiu
PP CA com PPc CA	Contaminação	aumentou	diminuiu
DD CA com DDc CA	Contaminação	aumentou	diminuiu
D SA com D CA	Aditivação	diminuiu	aumentou
Dc SA com Dc CA	Aditivação	diminuiu	aumentou

O efeito contrário na área e na diferença das diagonais confirma que a contaminação do óleo nas condições PP SA, PP CA e DD CA aumentou significativamente o desgaste do pino, sem causar aprofundamento relevante na trilha do contra-corpo. Esse resultado reforça a possibilidade de ocorrência do mecanismo descrito anteriormente, de ancoragem do abrasivo na rugosidade do contra-corpo, para a atuação do contaminante abrasivo na interface do contato nos ensaios com óleo contaminado (pág. 127).

Já o efeito da aditivação do óleo nas condições D e Dc levou a um desgaste reduzido no pino, com um aprofundamento significativo da trilha no disco. Esse resultado evidencia a maneira de atuação do aditivo nas condições de ensaio D e Dc, em promover facilitação na conformação das superfícies, mediante sacrifício do material de menor dureza.

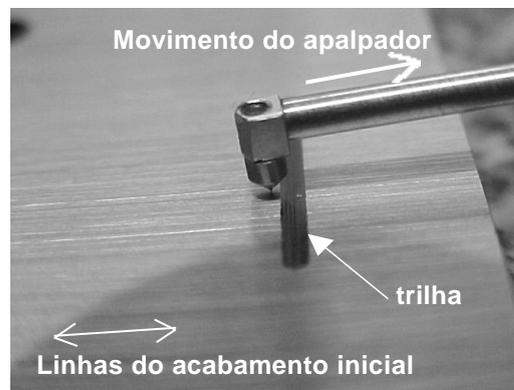
Considerações acerca dos perfis geométricos de desgaste das amostras ensaiadas serão apresentadas no item a seguir.

#### 4.1.5 Perfilometria e rugosidade

Para uma melhor visualização das características geométricas da área de desgaste das amostras, tais como o aprofundamento na trilha de alguns dos discos ensaiados e a presença de riscamento, procedeu-se ao estudo dos perfis de desgaste e da rugosidade das amostras ensaiadas.

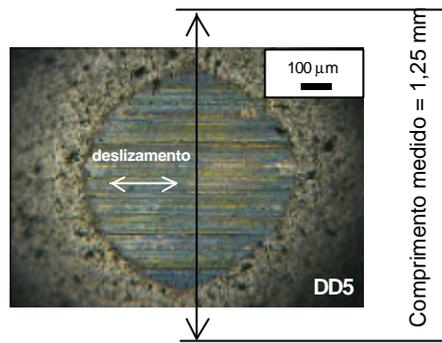
Foram realizadas medições de perfil geométrico dos pinos e dos contra-corpos selecionando a escala no rugosímetro sem a filtragem da ondulação. As medições de rugosidade foram realizadas nos pinos, antes e após os ensaios, selecionando a escala com a filtragem da ondulação.

Para as medições, o apalpador do rugosímetro foi posicionado na direção transversal à trilha formada no ensaio. A Figura 4-42 mostra a posição inicial do apalpador sobre uma amostra de placa, próximo à trilha. Algumas medições de perfil foram também realizadas na direção paralela ao deslizamento.



**Figura 4-42:** Posicionamento do apalpador do rugosímetro sobre uma amostra de placa para medição do perfil na direção transversal da trilha formada no ensaio.

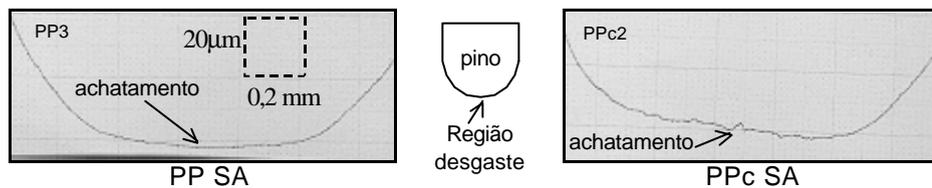
Para as medições no pino, o posicionamento do apalpador na calota (topo do pino) foi realizado com a utilização de uma lupa com ampliação de 10x. Todas as medições de rugosidade dos pinos foram realizadas com um comprimento de 1,25 mm. A Figura 4-43 mostra a região considerada para medição no pino.



**Figura 4-43:** Ilustração do procedimento adotado para as medições do perfil da área de desgaste do pino.

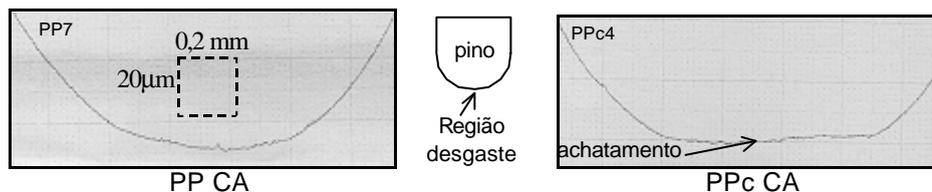
**4.1.5.1 Perfis geométricos bidimensionais do pino e do contra-corpo**

Amostras de pinos ensaiados com o menor nível de carregamento (condição Mo) foram analisadas por perfilometria. A Figura 4-44 mostra os perfis de pinos resultantes dos ensaios oscilatórios PP SA e PPc SA e a Figura 4-45, os perfis resultantes dos ensaios PP CA e PPc CA.



*Obs.: Direção do deslizamento normal ao papel*

**Figura 4-44:** Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições de ensaio PP SA e PPc SA.

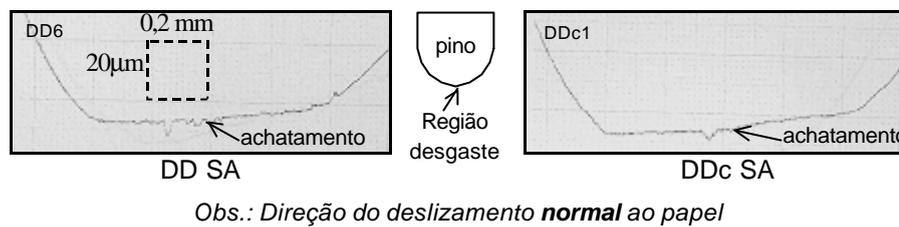


*Obs.: Direção do deslizamento normal ao papel*

**Figura 4-45:** Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições PP CA e PPc CA.

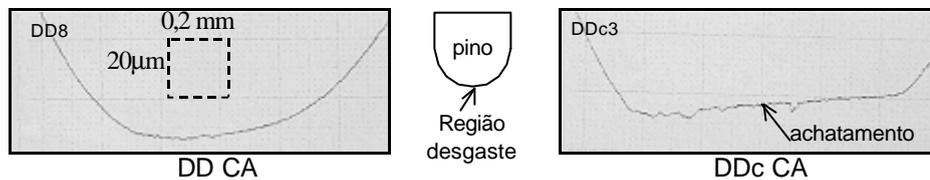
Com ensaios com óleo sem aditivação (Figura 4-44), nota-se que ambos os perfis, resultantes das condições com e sem contaminante no óleo respectivamente, apresentaram um achatamento no topo, indicando ocorrência de desgaste. Já com ensaios com óleo aditivado (Figura 4-45), nota-se que o perfil sofreu achatamento pronunciado apenas quando o contaminante foi utilizado no óleo.

A Figura 4-46 e a Figura 4-47 mostram respectivamente os resultados de perfil dos ensaios rotativos com óleo sem e com aditivo.



Obs.: Direção do deslizamento **normal** ao papel

**Figura 4-46:** Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições de ensaio DD SA e DDc SA.



Obs.: Direção do deslizamento **normal** ao papel

**Figura 4-47:** Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições de ensaio DD CA e DDc CA.

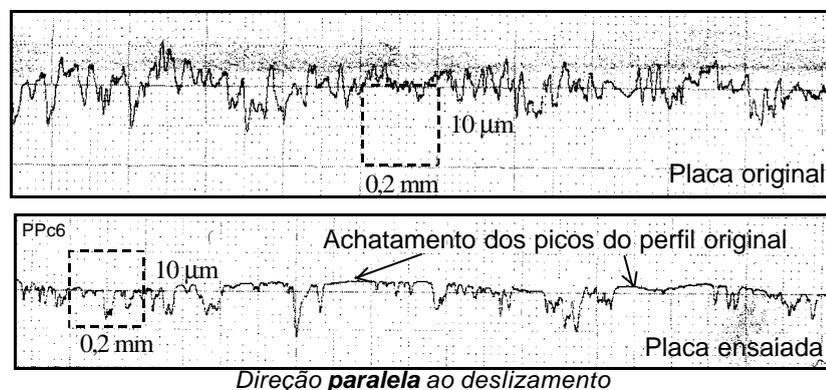
É possível notar um comportamento similar ao visto com os ensaios oscilatórios, ou seja, sem aditivo no óleo (Figura 4-46), os pinos tenderam a apresentar achatamento causado por desgaste e, com aditivo (Figura 4-47), o achatamento ocorreu somente com o uso do contaminante no óleo. Vale ressaltar que o achatamento no pino foi relacionado a uma situação de mais desgaste no pino com reduzido aprofundamento da trilha no contra-corpo, enquanto que a manutenção da curvatura do pino indicaria um desgaste pequeno no mesmo com relativo aprofundamento da trilha do contra-corpo, conforme a ilustração mostrada anteriormente na **Figura 4-40**. Os resultados de perfilometria mostrados também confirmam as observações apresentadas anteriormente na **Tabela 4-8**.

Para a confirmação da ocorrência do aprofundamento por desgaste na trilha formada no contra-corpo das condições de ensaio PP-PPc-DD-DDc, procedeu-se à medição dos perfis dos mesmos. Entretanto, os resultados das medições indicaram que alterações visíveis em relação ao perfil original foram mínimas. Foi possível visualizar um achatamento do perfil, com alisamento da superfície, apenas em alguns dos contra-corpos ensaiados nessas condições. A Figura 4-48 mostra um exemplo de medição realizada em uma amostra de disco (condição DD CA).



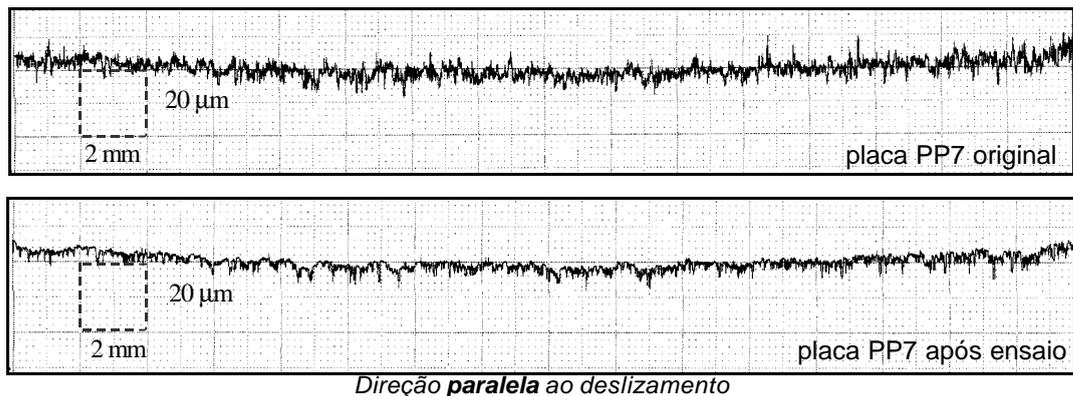
**Figura 4-48:** Perfil de um disco DD CA após ensaiado, obtido pelo rugosímetro.

No caso da medição do perfil das placas ensaiadas nas condições PP-PPc, foi observado que a presença dos sulcos originais de acabamento interferia na medição, sendo grande a possibilidade do apalpador do rugosímetro percorrer um desses sulcos do acabamento durante a medição. Por outro lado, para esse caso, medições do perfil, realizadas na direção **paralela** ao deslizamento, como a apresentada na Figura 4-49, mostraram que o desgaste também provocou um alisamento na superfície das placas ensaiadas nessas condições.



**Figura 4-49:** Perfil de uma placa nova e de uma após ensaiada (PPc CA), direção longitudinal ao deslizamento, obtidos pelo rugosímetro.

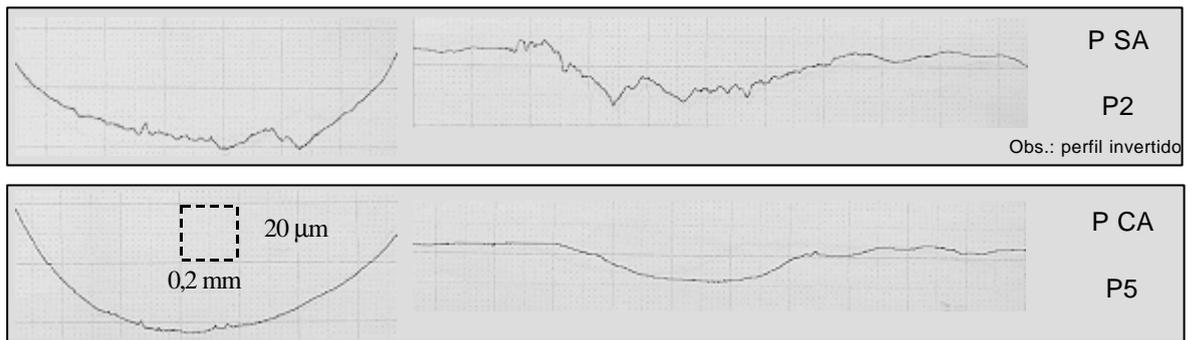
A não visualização de aprofundamento por desgaste na trilha foi devido à dificuldade na medição do perfil, causada pela rugosidade elevada na superfície original. A Figura 4-52 mostra um perfil completo obtido de uma medição na placa na direção paralela ao deslizamento, antes e após ensaio na condição PP CA. Nota-se que o desgaste ocorreu aparentemente de maneira uniforme por toda a extensão do percurso do pino. Também não é possível notar precisamente um aprofundamento na trilha.



**Figura 4-50:** Perfil longitudinal da placa, antes e após ensaio, condição PP CA.

Já com os resultados de perfilometria das amostras ensaiadas com maior carregamento (ensaios P-Pc-D-Dc), mostrados na Figura 4-51 à Figura 4-55, notou-se a formação de um nítido perfil de desgaste nas amostras, sendo possível observar a ocorrência de aprofundamento da trilha na maioria das condições e/ou de desgaste com aumento da rugosidade em outras.

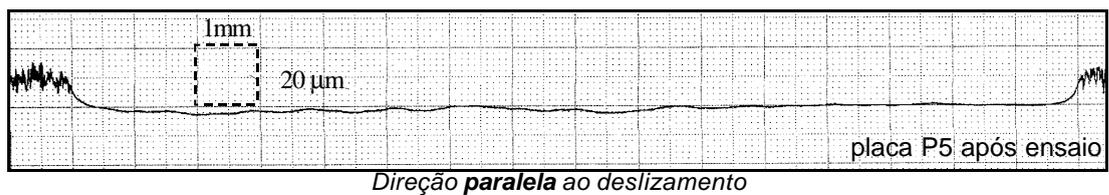
A Figura 4-51 mostra os resultados obtidos com ensaios oscilatórios P SA e P CA. Observa-se nas placas a ocorrência do aprofundamento da trilha, bem evidente no ensaio P SA. Nota-se que, no ensaio P SA, tanto a superfícies do pino como da placa foram bem mais danificadas, comparadas às da condição P CA. Com a utilização do aditivo no ensaio, as superfícies foram mais lisas.



Obs.: Direção do deslizamento **normal** ao papel

**Figura 4-51: Perfis dos pinos e das respectivas placas após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições P SA e P CA.**

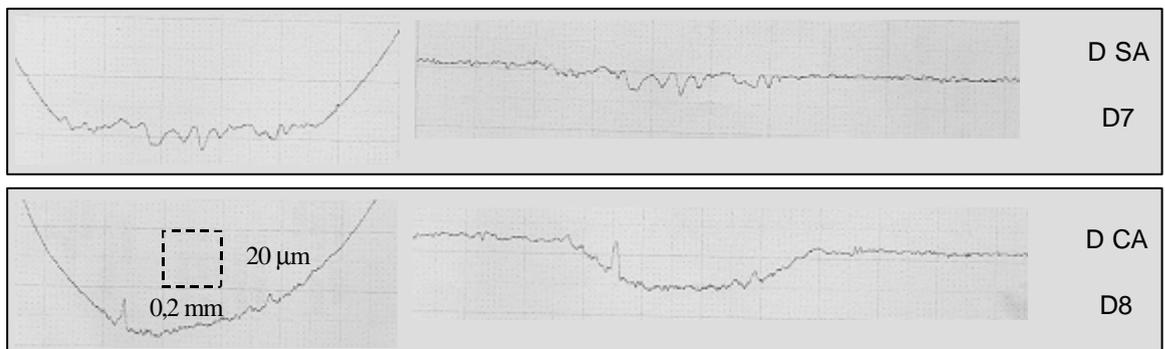
A Figura 4-52 mostra o perfil de uma placa após ensaio na condição P CA. Nota-se a formação nítida de um patamar horizontal.



Direção **paralela** ao deslizamento

**Figura 4-52: Perfil longitudinal da placa após ensaio, condição P CA.**

Já com os ensaios rotativos, cujos perfis estão mostrados na Figura 4-53, é possível notar que a utilização do aditivo (condição D CA) resultou em um aprofundamento na trilha do disco e que a curvatura no pino foi mantida.



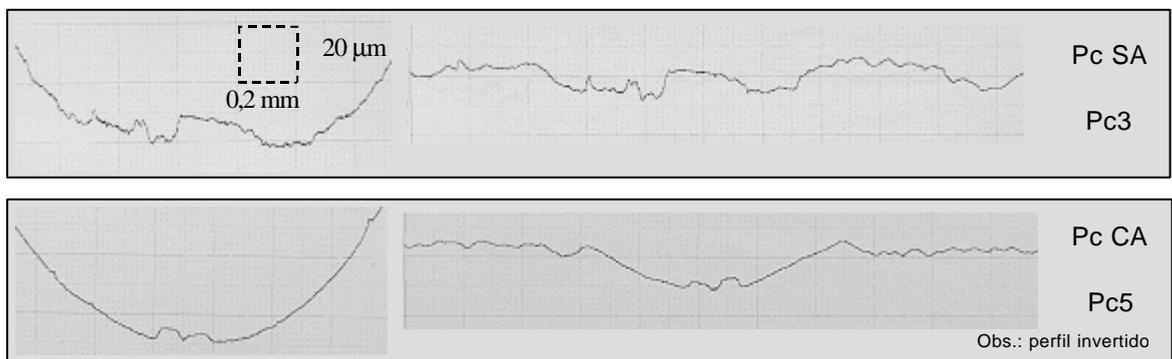
Obs.: Direção do deslizamento **normal** ao papel

**Figura 4-53: Perfis dos pinos e dos respectivos discos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições D SA e D CA.**

Ainda pela Figura 4-53, na condição D SA, embora a superfície tenha ficado rugosa, não houve desgaste evidente no disco em termos de profundidade, enquanto que o pino sofreu aparente desgaste, com perda da curvatura inicial. As observações com essa Figura confirmam as descrições quanto ao desgaste dimensional, mostradas anteriormente na **Tabela 4-8**.

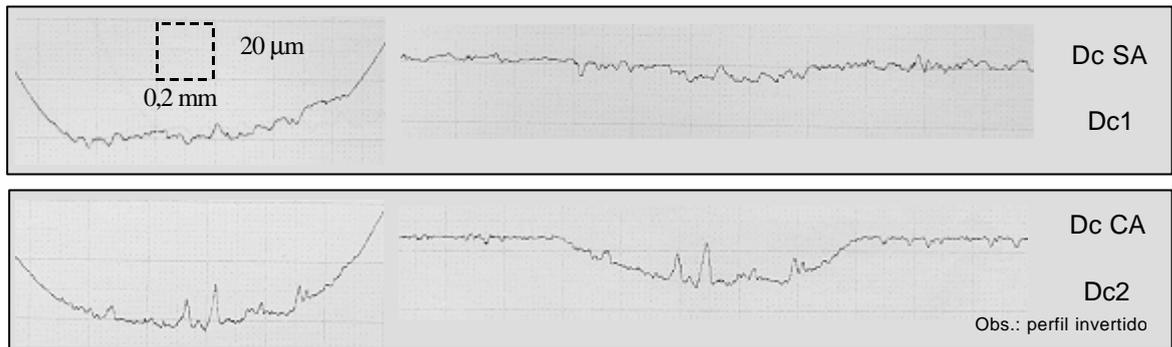
Comparando os resultados da condição oscilatória e rotativa com óleo aditivado (P CA e D CA) na Figura 4-51 e Figura 4-53, nota-se que o efeito devido à utilização do aditivo em termos de enrugamento da superfície dependeu do sistema de ensaio, confirmando o que já foi observado anteriormente com as análises microscópicas das superfícies. No ensaio oscilatório, as superfícies ficaram lisas, enquanto que no rotativo, apresentaram enrugamento.

Para observar a influência da presença do contaminante no óleo com o maior nível de carregamento, são apresentados os perfis da Figura 4-54, resultantes dos ensaios oscilatórios, e da Figura 4-55, dos ensaios rotativos. Comparando qualitativamente os perfis de ambas as Figuras com as respectivas sem contaminante (Figura 4-51 e Figura 4-53), é possível notar que os perfis da área desgastada foram similares. Isso indica que, nesse nível de carregamento, a presença da contaminação não causou alterações significativas nas características topográficas dos fenômenos no contato, o que concorda com a ausência de efeitos significativos da presença da contaminação, observada na análise microscópica das superfícies.



Obs.: Direção do deslizamento **normal** ao papel

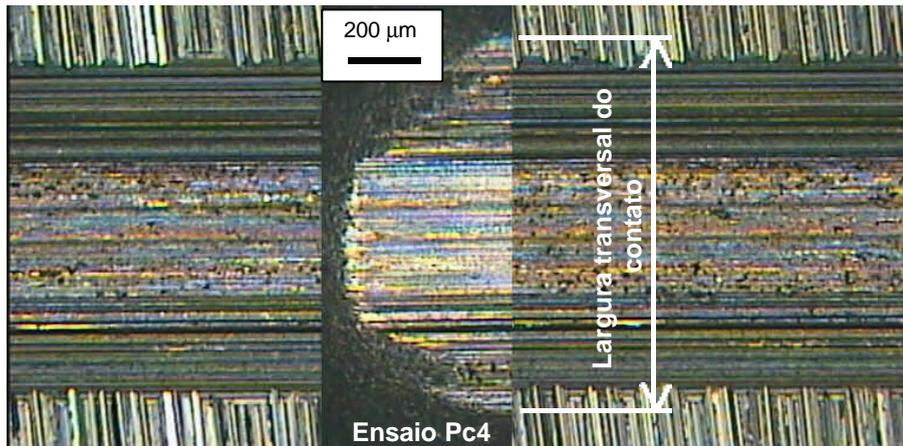
**Figura 4-54:** Perfis dos pinos e das respectivas placas após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições Pc SA e Pc CA.



Obs.: Direção do deslizamento *normal* ao papel

**Figura 4-55:** Perfis dos pinos e dos respectivos discos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições Dc SA e Dc CA.

Nos perfis resultantes com o maior nível de carregamento, é possível visualizar a correspondência das reentrâncias visualizadas no pino e no seu respectivo contra-corpo, como evidenciado na análise microscópica das superfícies. Esse fato sugere a ocorrência do desgaste por um mecanismo de “sulcamento” de um corpo pelo outro nessa condições de ensaio, que é o que pesquisadores, como WANG et al. (1991), descrevem como resultado de ensaios lubrificados. Entretanto, nota-se ausência de mecanismos como o “*pile-up*”, este caracterizado pelo deslocamento de material para a borda da trilha do contato, que seria esperado em certos materiais no caso de sulcamento pelo fenômeno da abrasão [DWYER-JOYCE, SAYLES e IOANNIDES, 1994]. No caso das amostras ensaiadas, a ocorrência de tais mecanismos pode ter sido suprimida devido à geometria de contato utilizada (do tipo esfera-plano), visto que houve minimização de um contato direto entre as superfícies próximo às bordas laterais da trilha de desgaste no contra-corpo. A Figura 4-56 mostra que o contato entre as superfícies do pino e do contra-corpo durante o ensaio foi menos freqüente nas bordas laterais da trilha, mesmo nas condições de ensaio mais severas. Pela Figura, pode-se perceber que um dos fatores para isso foi a elevada rugosidade inicial do contra-corpo.

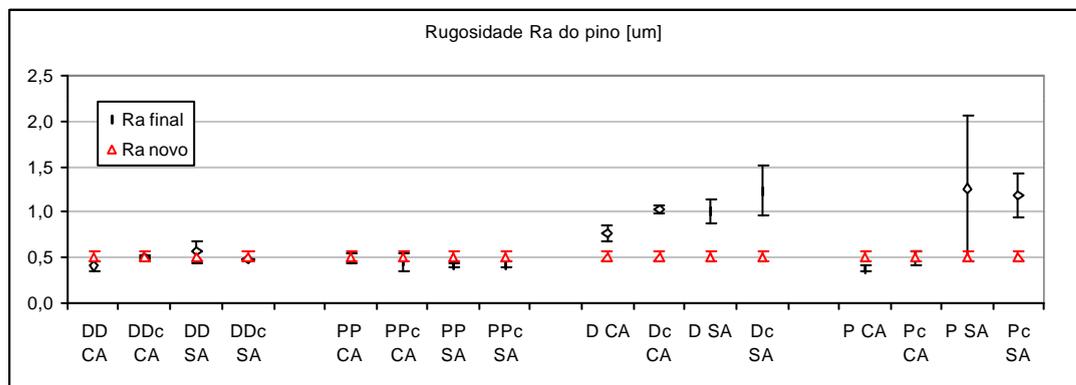


**Figura 4-56:** Áreas de desgaste do pino e do contra-corpo sobrepostas, para visualização da largura da região afetada; condição Pc SA.

#### 4.1.5.2 Rugosidade dos pinos

A rugosidade dos pinos foi obtida considerando o parâmetro **Ra** (altura média das asperezas) fornecido pelo rugosímetro em cada medição.

A Figura 4-57 mostra o valor de **Ra** resultante em cada condição de ensaio. O valor de **Ra** do pino novo (sem uso) também está mostrado no gráfico, para se observar a alteração no valor resultante do ensaio.



**Figura 4-57:** Rugosidade Ra [μm] da superfície dos pinos, antes e após o ensaio, em função da condição de ensaio. (A) ensaios oscilatórios; (B) ensaios rotativos.

Nota-se que, na condição com menor carregamento (série PP e DD), o **Ra** praticamente não mudou com ambos os sistemas, oscilatório e rotativo. Já na condição mais severa (série P e D), o **Ra** aumentou, com a exceção vista com os ensaios oscilatórios com óleo aditivado, onde esse parâmetro também permaneceu praticamente inalterado. O aumento na rugosidade pode indicar a atuação de mecanismos severos de desgaste no assentamento e conformação geométrica das superfícies. A ocorrência de tais mecanismos nos ensaios esteve relacionada ao maior carregamento, sendo que somente nos ensaios oscilatórios, os mesmos foram suprimidos com a aditivação do óleo.

#### **4.1.6 Considerações quanto ao desgaste**

O estudo do desgaste apresentado mostrou que o lubrificante esteve presente na interface em todos os ensaios, sendo o desgaste muito pequeno comparado com situações a seco, e que, embora com condições de ensaio muito próximas entre si, as variações adotadas proporcionaram situações nas quais os fenômenos presentes no contato atuassem produzindo diferentes resultados. A Tabela 4-9 mostra um resumo das principais características observadas com relação ao desgaste.

**Tabela 4-9: Resumo das principais características relacionadas ao desgaste observadas em cada condição de ensaio.**

Código	Aditivo	Contaminante	Carregamento	Área pino normalizada [ $\mu\text{m}^2/\text{m}$ ]	Diag. V-H normalizada (%)	Característica elíptica relevante	Perfil do pino	Rugosidade Ra do pino	Perfil do contra-corpo
DD CA	X		Mo	24	32	X	Curvado	manteve	Alisamento asperezas
DDc CA	X	X	Mo	87	7		Plano	Manteve	Alisamento asperezas
DD SA			Mo	83	12		Plano	Manteve	Alisamento asperezas
DDc SA		X	Mo	81	7		Plano	Manteve	Alisamento asperezas
PP CA	X		Mo	93	27	X	Curvado	Manteve	Alisamento asperezas
PPc CA	X	X	Mo	142	7		Plano	Manteve	Alisamento asperezas
PP SA			Mo	106	32	X	Plano	Manteve	Alisamento asperezas
PPc SA		X	Mo	175	15		Plano	Manteve	Alisamento asperezas
D CA	X		Se	156	40	X	Rugoso, curvado	Aumentou	Rugoso, curvado
Dc CA	X	X	Se	189	32	X	Rugoso, curvado	Aumentou	Rugoso, curvado
D SA			Se	218	5		Rugoso, plano	Aumentou	Rugoso, plano
Dc SA		X	Se	259	9		Rugoso, plano	Aumentou	Rugoso, plano
P CA	X		Se	363	13		Liso, curvado	Manteve	Liso, aprofundado
Pc CA	X	X	Se	321	17		Liso, curvado	Manteve	Liso, aprofundado
P SA			Se	454	13		Rugoso, curvado	Aumentou	Rugoso, aprofundado
Pc SA		X	Se	530	17		Rugoso, curvado	Aumentou	Rugoso, aprofundado

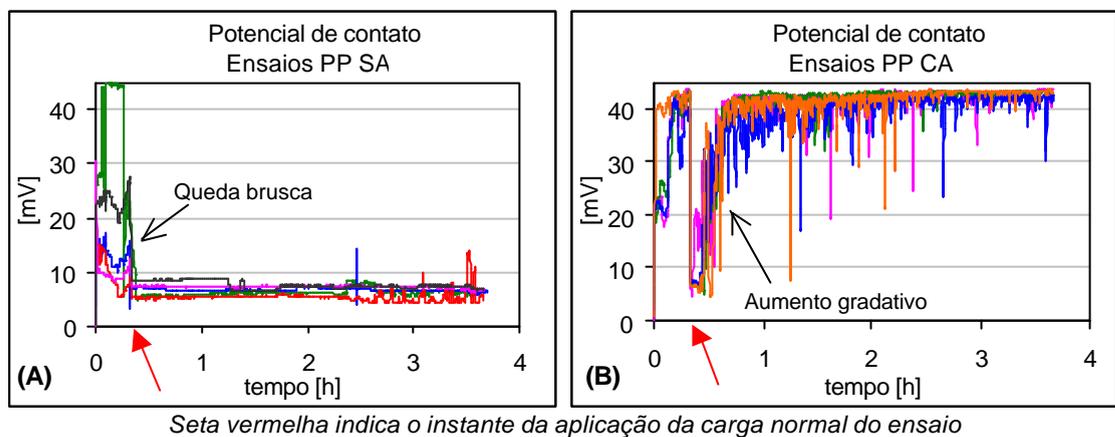
## 4.2 Potencial de contato

A medição do potencial de contato elétrico é conhecida como uma maneira de caracterizar a resistividade elétrica da interface do contato entre amostras metálicas, principalmente para estudar a ocorrência ou não do contato metal-metal entre as superfícies das amostras durante um ensaio tribológico. A ocorrência de efeitos triboquímicos, como a oxidação superficial causada pelo contato deslizante, pode ser também relacionada com o comportamento da resistividade elétrica da interface do contato. Em termos de filmes triboquímicos, é importante mencionar que, dependendo das características do processo de formação, é possível que tais filmes possam vir a ser diferentes quanto à resistividade elétrica.

No equipamento de ensaio utilizado, o sensor CONPOT indica a diferença de potencial elétrico entre o pino e o contra-corpo que deslizam com o contato lubrificado. Valores em torno de 45 mV referem-se a um contato isolado eletricamente. No ensaio,

isso poderia ocorrer, por exemplo, pela existência de um filme de óleo íntegro separando as superfícies fisicamente na interface de contato e/ou pela formação de uma tribocamada isolante íntegra nas superfícies na região do contato. Valores em torno de 0 mV indicam contato predominantemente metálico<sup>35</sup>.

A Figura 4-58 mostra o comportamento do potencial de contato nos ensaios de duas condições oscilatórias, PP SA e PP CA. Os pontos dos gráficos referem-se aos valores do potencial de contato, lidos pelo sensor e adquiridos pelo sistema de aquisição do equipamento de ensaio, a cada 10 segundos ao longo do ensaio. Cada cor corresponde a um ensaio.



**Figura 4-58:** Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) PP SA e (B) PP CA.

Nota-se por essa Figura a ausência de valores próximos a 0 mV em todos os ensaios, o que indica a inexistência de contato metal-metal na interface entre o pino e o contra-corpo nesses ensaios. Isso pode estar relacionado à ocorrência de um filme de óleo separador na interface do contato, que pode fluido (devido ao efeito HD-EHL) ou limitrofe (devido à adsorção); entretanto, é necessário ressaltar que essa indicação é imprecisa, pois pode envolver influências do tempo de resposta do sensor. Outra observação é que, nos ensaios PP SA, foi mencionado ocorrência de oxidação nas

<sup>35</sup> Tanto o valor de cerca de 45 mV, medido pelo sensor quando as superfícies não estão encostadas, e o valor próximo a 0 mV, medido quando as superfícies do pino e do disco se encontram encostadas com carga, referem-se a medições com as amostras sem movimento (paradas).

superfícies, porém, não são notadas evidências aparentes de evolução do potencial que possam estar correlacionadas a tal fenômeno.

Uma comparação entre os dois gráficos da Figura 4-58 mostra que o comportamento do potencial de contato foi nitidamente diferente em função do óleo utilizado. Nos ensaios com óleo não aditivado (Figura 4-58A), nota-se uma queda brusca do potencial para um valor relativamente baixo no instante da aplicação da carga normal, mantendo-se nesse nível em todo o ensaio. Já as curvas dos ensaios com óleo aditivado (Figura 4-58B) mostram que o contato com esse óleo foi adquirindo rápido e gradativamente característica de isolante elétrico, logo a partir da aplicação da carga.

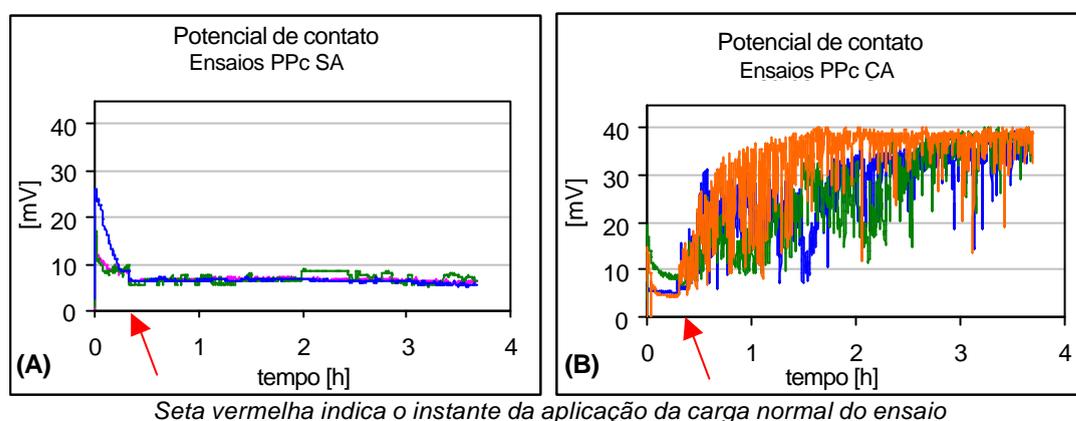
Vale mencionar que, em todos os ensaios representados nessa Figura, as características físicas estabelecidas na interface de contato das amostras deslizantes foram iguais, devido às similaridades na condição de carregamento, nas características físicas das amostras metálicas e dos óleos. Com isso, a separação física das superfícies em termos de espessura do filme de óleo deve ser muito semelhante em todos os ensaios representados nessa Figura, ao menos nas etapas iniciais, onde a geometria de contato e a rugosidade são similares às originais. Assim, a única diferença foi devida à aditivação do óleo. Logo, é possível inferir que a diferença entre os dois gráficos da Figura 4-58 mostra a sensibilidade do potencial medido à formação de um filme triboquímico interfacial proporcionado pelos elementos do aditivo do óleo. Isso confirma que as regiões escurecidas localizadas nas asperezas, observadas na análise microscópica da placa do ensaio PP CA (pág. 122), são relativas à atuação triboquímica do aditivo do óleo. Notam-se flutuações nas curvas do gráfico na Figura 4-58B, que podem estar relacionadas à ocorrência de contato predominante nas regiões cobertas com filme, com contatos eventuais, intermitentes, também nas regiões não cobertas.

Por outro lado, apesar das diferenças nos ensaios com os dois tipos de óleo relacionadas à formação de filmes triboquímicos, os valores numéricos do desgaste das amostras desses ensaios foram praticamente iguais com os dois tipos de óleo, o que mostra que a sensibilidade às reações triboquímicas das superfícies em contato não afetou o desgaste, com o nível de carregamento e o sistema mecânico em questão.

Quanto às conseqüências no potencial de contato originadas por outras alterações no óleo como uma contaminação, ressalta-se que quaisquer comparações com a condição com óleo não contaminado devem ser examinadas com cuidado, pois

alterações nos valores do potencial devem depender da característica elétrica do material contaminante introduzido no sistema. No presente estudo, o contaminante utilizado foi o quartzo, que é, em princípio, eletricamente inerte.

A Figura 4-59 mostra o comportamento do potencial de contato nos ensaios com óleo contaminado, PPc SA e PPc CA. Observa-se comportamentos similares aos vistos nos ensaios com óleo não contaminado, em função da presença de aditivo no óleo (Figura 4-58), ou seja, o potencial tendeu a ser maior nos ensaios com óleo aditivado.



*Seta vermelha indica o instante da aplicação da carga normal do ensaio*

**Figura 4-59:** Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados na condição (A) PPc SA e (B) PPc CA.

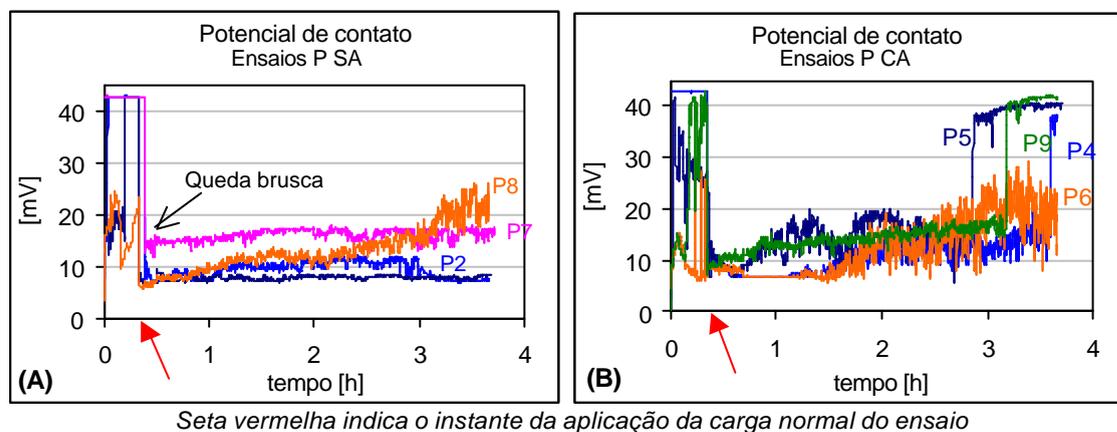
Por outro lado, comparando a Figura 4-58B com a Figura 4-59B, nota-se que o uso do contaminante no óleo alterou o comportamento do potencial nos ensaios CA, de maneira a tender a valores menores. Nesses ensaios (Figura 4-59B), é provável que tenha ocorrido um mecanismo de favorecimento do arrancamento do filme triboquímico à medida que o mesmo fosse sendo formado nas superfícies contactantes, causado pelo contaminante abrasivo. Como resultado disso, o potencial tendeu a valores menores.

Já comparando os resultados do potencial de contato nos ensaios SA (mostrados na Figura 4-58A e Figura 4-59A), não se notam alterações significativas no comportamento com a presença do contaminante no contato; ambos os gráficos apresentam um potencial com valores mantidos em um nível inferior. É possível que o limite inferior dos valores de potencial observados nos gráficos correspondam à característica isolante conferida por uma proporção de separação física existente na interface do contato entre as amostras devido à formação de um filme de óleo, que não foi afetada pela presença do contaminante abrasivo. Essa separação física, entretanto,

não parece estar relacionada à existência de um filme de óleo fluido, pois este aumentaria com o aumento da conformação geométrica das superfícies no decorrer do ensaio e os gráficos não mostram aumento.

Com o aumento do carregamento mecânico no ensaio, deve-se levar em consideração que as superfícies tenderão a se aproximar, com o que a proporção de pontos em contato nas superfícies deslizantes deve aumentar, levando com isso a aumentar a possibilidade do contato metálico, diminuindo conseqüentemente o potencial do contato elétrico. Por outro lado, o aumento do carregamento pode proporcionar a ocorrência de fenômenos relacionados ao desgaste severo, como a deformação plástica e a oxidação severa das superfícies. As superfícies metálicas oxidadas são conhecidas em geral por apresentarem a característica de isolante elétrico proporcionada pelo filme de óxido, com o que o potencial de contato medido nesse caso teria um valor relativamente alto.

A Figura 4-60 mostra o comportamento do potencial de contato nos ensaios das condições oscilatórias com o maior carregamento, P SA e P CA.



**Figura 4-60: Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) P SA e (B) P CA.**

Observa-se na Figura 4-60 que o comportamento apresentou algumas diferenças, comparado ao visto na Figura 4-58. Na Figura 4-60, há também a ausência de valores próximos a 0 mV, indicando com isso a inexistência do contato metal-metal entre as amostras também nesse nível de carregamento. Entretanto, ressalta-se novamente a criticidade dessa observação por causa do tempo de resposta do sensor, como

mencionado anteriormente. Em contrapartida, considerando que o sensor execute uma leitura média no ensaio, maiores valores poderiam estar relacionados a maiores espessuras de separação. Porém, nota-se que o nível do limite inferior foi muito similar ao visto nos ensaios com menor carregamento, não havendo, portanto, evidências aparentes de que o maior carregamento tivesse proporcionado uma menor separação física entre as superfícies ou uma maior proporção de contato metálico. É provável que um filme limítrofe (causado pelo efeito da adsorção) proporcione o efeito com valores não nulos observado no potencial com ambos os níveis de carregamento.

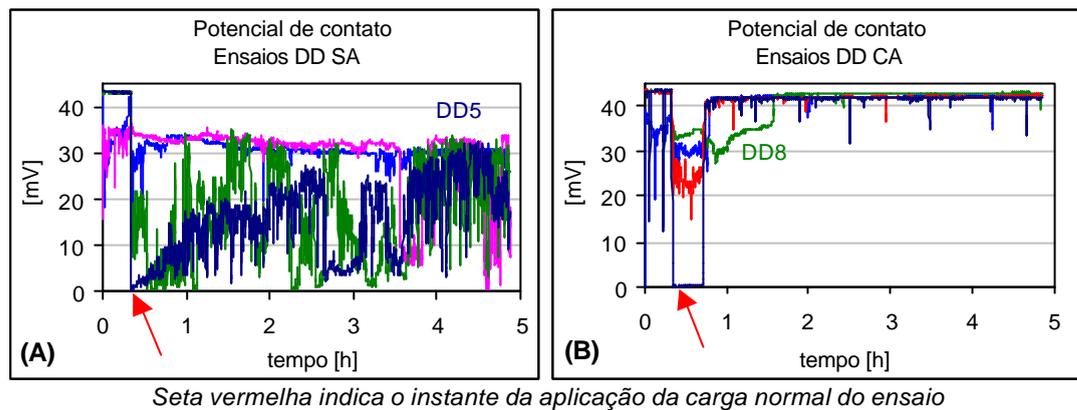
A comparação dos gráficos dos ensaios PP SA da Figura 4-58A com os P SA da Figura 4-60A revela que, com o maior carregamento, o potencial foi mais disperso de ensaio para ensaio. Uma tendência flutuante e crescente pode ser notada em alguns ensaios. Considerando que, nos ensaios P SA, as superfícies das amostras apresentaram evidências de desgaste severo, pode ter ocorrido um mecanismo triboquímico por oxidação das superfícies, que pode estar relacionado ao aspecto flutuante e crescente das curvas do potencial de contato dos ensaios P SA. Ocorrendo o mecanismo de oxidação, este é distinto daquele observado nos ensaios PP SA, visto que o potencial não foi afetado nestes (vide Figura 4-58A).

Nos ensaios com óleo aditivado, representados na Figura 4-60B, pode ser notado que o comportamento do potencial foi flutuante e crescente na maioria, sendo que três apresentaram um aumento repentino do valor do potencial próximo à última hora de ensaio, que foi mantido até o final. Os potenciais elevados vistos no final do processo de deslizamento podem estar relacionados à atuação do aditivo do óleo em aumentar da característica isolante do contato através da formação de um filme triboquímico nas superfícies. Devido ao carregamento elevado, tais filmes devem ser mais solicitados a sucessivos crescimentos e arrancamentos do que os filmes formados com o menor carregamento.

Essas observações conjuntas indicam que o maior nível de carregamento possibilitou a ocorrência de um mecanismo triboquímico com sucessiva formação de filmes e arrancamento dos mesmos ao longo do ensaio, que conferiu o aspecto flutuante às curvas do potencial com ambos os óleos. Na comparação entre os comportamentos nos dois níveis de carregamento e com os dois tipos de óleo, ressalta-se que a cinética envolvida para as ações no contato se altera com o nível de carregamento e com o tipo

de óleo, causando diferentes alterações nas superfícies e, conseqüentemente, nas características da resistividade elétrica.

Uma análise do comportamento do potencial de contato nos ensaios com o sistema de ensaio rotativo mostra que esse sistema apresenta diferentes aspectos em termos da resistividade elétrica do contato. Para exemplificar, a Figura 4-61 mostra o comportamento do potencial de contato dos ensaios rotativos DD SA e DD CA.



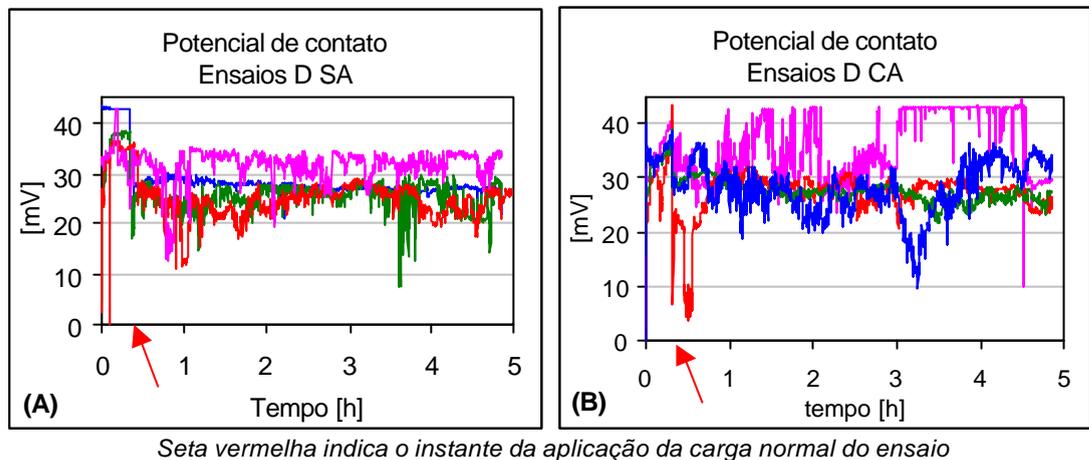
**Figura 4-61:** Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) DD SA e (B) DD CA.

Nota-se que os comportamentos vistos na Figura 4-61 foram distintos dos ensaios oscilatórios (Figura 4-58), principalmente nos ensaios com óleo não aditivado. Nos ensaios rotativos, nota-se uma dispersão no comportamento de ensaio para ensaio, bem evidente com óleo não aditivado (Figura 4-61A). Isso pode ser um indicativo de que a condição rotativa conferiu uma característica instável aos fenômenos no contato das amostras. Especialmente nas curvas dos ensaios com óleo não aditivado, nota-se que tanto valores altos, como valores do potencial indicativos de contato metálico (próximos de 0 mV) foram atingidos. Lembrando que a superfície das amostras referentes a esses ensaios tinha revelado ocorrência de riscamento, a presença de valores baixos de potencial, ainda que intercalados com valores elevados, pode estar relacionada a um mecanismo de abrasão por contato direto entre pino e disco (abrasão a dois corpos).

Já nos ensaios com óleo aditivado (Figura 4-61B), a dispersão de ensaio para ensaio no comportamento do potencial esteve localizada apenas no início dos ensaios. Observa-se nessa fase inicial que um dos ensaios apresentou valores pequenos, constantes, indicativos de contato metal-metal. Após a fase inicial, os valores se elevam

rapidamente para um patamar superior e flutuações praticamente não são mais vistas. Isso indica a ocorrência da formação de um filme isolante na interface de contato com o óleo aditivado, constante e pouco propenso ao arrancamento. Uma outra observação na Figura 4-61B é que o potencial se eleva de maneira mais rápida, diferente do visto com os ensaios PP CA (Figura 4-58B). Esse fato sugere que a dinâmica dos mecanismos triboquímicos em cada sistema, oscilatório ou rotativo, é diferente.

Um outro exemplo pode ser visto na Figura 4-62, onde nota-se comportamentos similares em ambos os gráficos, com potencial flutuante e disperso de ensaio para ensaio, com apenas um dos ensaios D CA apresentando potencial mais elevado.



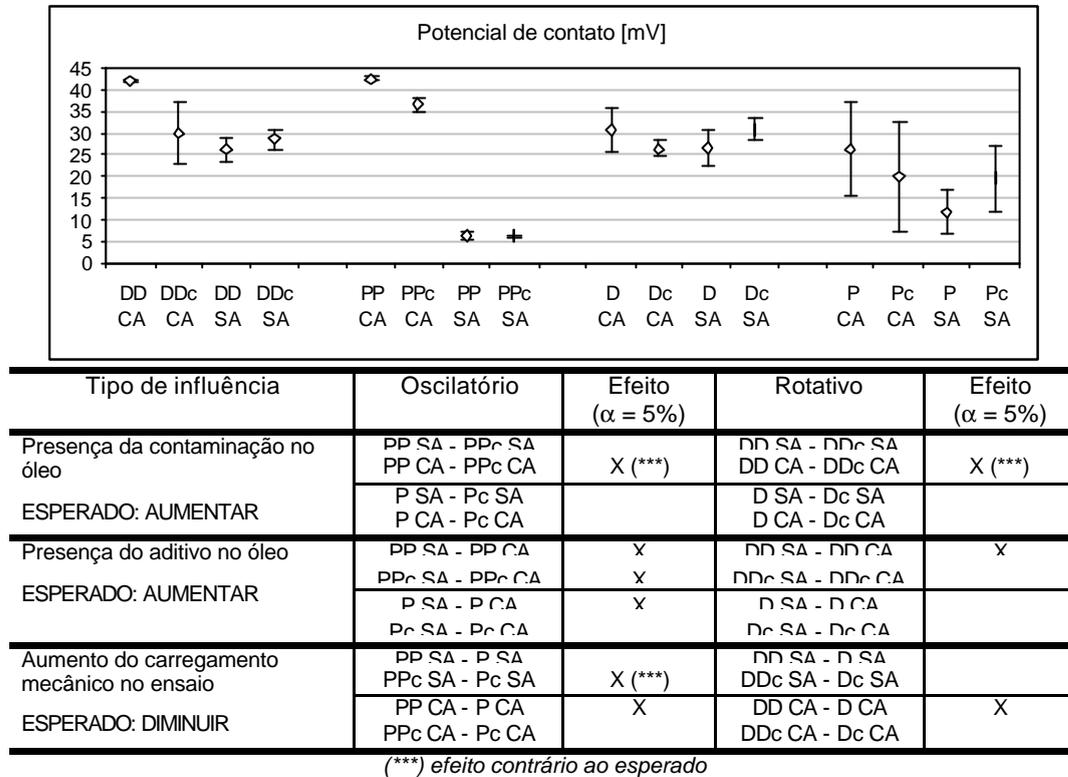
**Figura 4-62:** Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) D SA e (B) D CA.

Os resultados da Figura 4-62 mostram que o potencial, embora mostre comportamentos similares, referem-se a diferentes informações fenomenológicas, visto que as superfícies resultantes nesses ensaios (D SA e D CA) foram muito diferentes entre si. Nesse caso, o efeito triboquímico da aditivação do óleo nos ensaios D CA não é observado no potencial.

No ANEXO B são apresentados os gráficos do potencial de contato de todos os ensaios.

Os valores médios do potencial de contato resultantes em cada condição de ensaio foram analisados estatisticamente. A Figura 4-63 mostra os valores de todas as

condições de ensaio estudadas<sup>36</sup> e os resultados da análise estatística dos efeitos no potencial, da contaminação, aditivação e carregamento.



**Figura 4-63:** Gráfico com os valores médios do potencial de contato dos ensaios realizados e resultados da análise estatística dos efeitos da contaminação, aditivação e carregamento no potencial.

Considerando que a presença do contaminante e do aditivo e o aumento do carregamento atuam no contato como descrito anteriormente na **Tabela 4-5**, os efeitos esperados, tanto da contaminação como da aditivação, seriam de aumentar o potencial, e o efeito do aumento do carregamento seria de diminuir o potencial.

Em termos do efeito da contaminação do óleo no potencial de contato, os resultados da análise estatística da Figura 4-63 mostram que a presença do contaminante provocou um efeito significativo no potencial de contato apenas nas condições de ensaio com menor carregamento com óleo aditivado, sendo que o potencial diminuiu com a

<sup>36</sup> O potencial de contato de cada ensaio foi calculado com base nos dados adquiridos durante os 50 min finais do ensaio, compreendendo 300 dados. O valor do potencial de cada condição de ensaio considera a média e o desvio-padrão dos potenciais de todos os ensaios realizados na referida condição.

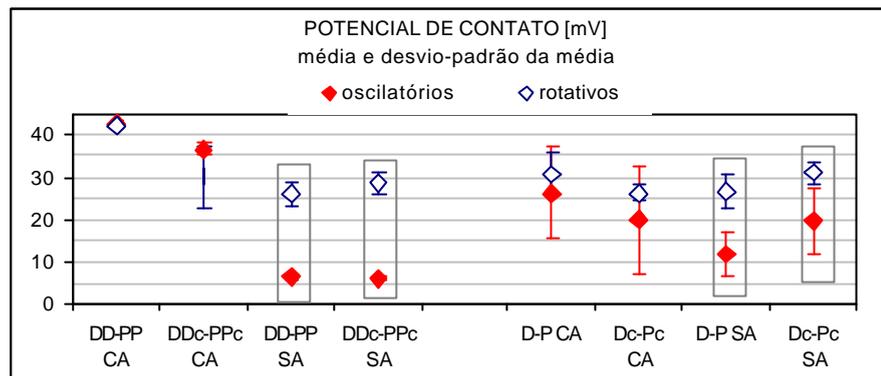
presença da contaminação no óleo, apresentando um efeito contrário ao esperado. Esse efeito foi visto com ambos os sistemas de ensaio. Logo, a separação microscópica proporcionada pela presença do abrasivo na interface, descrita na **Tabela 4-5** como um provável mecanismo determinado pela ação da contaminação, não pode ser sustentada nesse caso. O mecanismo que poderia ter ocorrido para a diminuição do potencial foi mencionado nos comentários referentes à Figura 4-59.

Já quanto ao efeito no potencial de contato devido à presença do aditivo no óleo, os resultados da análise estatística da Figura 4-63 mostram que, na maioria das condições com ensaios oscilatórios, o potencial foi significativamente maior na presença do aditivo no óleo, como esperado. Entretanto, com o sistema rotativo, o efeito da aditivação do óleo no potencial foi significativo apenas nos ensaios com óleo não contaminado com o menor nível de carregamento.

Os resultados da análise estatística da Figura 4-63 mostram também que, quanto ao efeito do aumento do carregamento do ensaio no potencial de contato, o mesmo foi significativo e como o esperado (ou seja, menor potencial com carregamento maior) nas condições de ensaio CA com óleo não contaminado, com ambos os sistemas mecânicos. É possível ver que, embora tivesse sido considerado não significativo, as condições CA com óleo contaminado também tenderam a ter um potencial menor com o maior carregamento. Já nas condições SA, foi visto um efeito contrário ao esperado, ou seja, de aumento do potencial com o aumento do carregamento, sendo inclusive o efeito considerado significativo nos ensaios oscilatórios com óleo contaminado. Nesse caso, o aumento do potencial esteve relacionado à ocorrência de um mecanismo no contato de formação de um filme isolante de óxido, proporcionado pelo aumento do carregamento com a conseqüente intensificação do contato metálico.

A Figura 4-64 mostra os valores de cada condição sobrepostos, de modo a permitir a visualização de diferenças no potencial entre os dois sistemas de ensaio. É importante salientar que análises comparativas entre os potenciais resultantes com os dois sistemas de ensaio devem ser realizadas com cuidado, uma vez que, na prática, os dois dispositivos mecânicos compreendem uniões de diferentes partes metálicas cujos contatos acabam sendo também inseridos no circuito elétrico da resistência do contato medida pelo sensor. Porém, tem-se que os valores limites (de 0 e 45 mV) são os mesmos com os dois dispositivos mecânicos; logo, entende-se que seja possível

comparar os potenciais, julgando que as alterações adicionais aos fenômenos que ocorrem no contato em estudo, que tenham afetado o sensor durante o ensaio, sejam de caráter sistêmico. Em termos de alterações de caráter sistêmico, tem-se a rugosidade inicial combinada das amostras, que foi menor nos ensaios rotativos, e obviamente também o sentido de movimentação do par em contato. As características sistêmicas serão discutidas no próximo Capítulo.



**Figura 4-64: Potencial de contato em função da condição de ensaio; visualização das diferenças entre os sistemas mecânicos. Valores em destaque referem-se àqueles com as maiores diferenças.**

Na Figura 4-64, nota-se que os valores do potencial foram menores nos ensaios oscilatórios na maioria das condições, comparados aos valores dos ensaios rotativos. As diferenças foram maiores com ensaios com óleo não aditivado, sendo as mesmas significativas ( $\alpha = 5\%$ ) nas condições DD-PP, DDc-PPc e D-P (todas SA). Esse resultado ressalta que os fenômenos de separação física das superfícies, bem como fenômenos triboquímicos, que ocorreram no contato rotativo foram distintos dos que ocorreram no contato oscilatório; entretanto, a diferença foi significativa apenas nos ensaios SA.

Dos resultados do potencial de contato, foi possível verificar a sensibilidade desse parâmetro, mediante a influência da presença de aditivação e de contaminação no óleo, bem como alterações devido à mudança no carregamento mecânico. Diferentes efeitos de separação física na interface do contato metálico, causados por efeito triboquímico da aditivação ou pela oxidação das superfícies, puderam ser avaliados através da comparação do comportamento do potencial resultante em cada condição. A Tabela 4-10 mostra um resumo dos principais aspectos encontrados.

**Tabela 4-10: Resumo das principais características relacionadas ao comportamento do potencial de contato observadas em cada condição de ensaio.**

Código	Aditivo	Contaminante	Carregamento	Comportamento
DD CA	X		Mo	Inicia em valor > zero e sobe p/ patamar superior rapidamente; valores nulos são observados no início
DD SA			Mo	Flutuante, valores nulos são observados. Disperso de ensaio para ensaio
PP CA	X		Mo	Flutuante, inicia em valor > zero e sobe gradativamente para patamar superior
PPc CA	X	X	Mo	Flutuante, inicia em valor > zero e sobe gradativamente para patamar superior
PP SA			Mo	Permanece num patamar inferior > zero
PPc SA		X	Mo	Permanece num patamar inferior > zero
D CA	X		Se	Flutuante, valores elevados. Disperso de ensaio para ensaio
D SA			Se	Flutuante, valores elevados. Disperso de ensaio para ensaio
P CA	X		Se	Flutuante, inicia em valor > zero e sobe lentamente, porém tende a ir repentinamente p/ patamar superior
P SA			Se	Permanece num patamar inferior > zero, maior que em PP SA, tende a flutuar e aumentar durante e mais no fim. Disperso de ensaio para ensaio

### 4.3 Atrito

No contato deslizante lubrificado, a resistência aos esforços tangenciais, ou força de atrito, é minimizada pela presença do material lubrificante. O coeficiente de atrito é um parâmetro que caracteriza os esforços tangenciais do contato e é determinado pela relação da força de atrito com a carga normal.

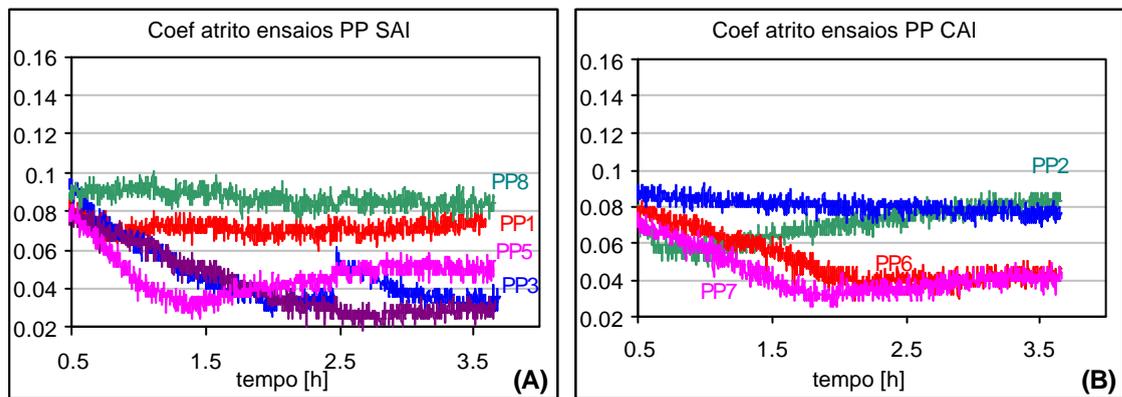
É importante ressaltar que, em sistemas lubrificados, os valores do coeficiente de atrito dependem do modo de lubrificação em que o sistema se encontra. Valores típicos são controversos na literatura e um dos pontos críticos para isso é o fato de que, similarmente ao que ocorre com o desgaste, o fenômeno de atrito deve depender do conjunto de elementos característicos do tribossistema com o qual o coeficiente de atrito é obtido.

Conforme o diagrama IRG de transição de regimes de lubrificação [GEE, BEGELINGER e SALOMON, 1984], todos os ensaios do presente estudo deveriam ter ocorrido sob lubrificação mista, com coeficientes de atrito na faixa de 0,02 a 0,2 (vide Figura 3-21 do Cap. 3). Entretanto, a análise das morfologias superficiais resultantes

com os dois níveis de carregamento utilizados mostrou que as regiões de desgaste foram afetadas por mecanismos mais severos com o maior carregamento, o que indica que a lubrificação com o menor carregamento foi diferente do maior.

A força de atrito entre o pino e o contra-corpo foi monitorada durante os ensaios de deslizamento. O comportamento do coeficiente de atrito ao longo dos ensaios está mostrado nas Figuras a seguir. Cada cor representa um ensaio. O sistema de aquisição do equipamento permite adquirir valores médios quadráticos; os pontos dos gráficos correspondem a dados que foram adquiridos a cada 10 segundos.

A Figura 4-65 mostra o comportamento do coeficiente de atrito dos ensaios oscilatórios com menor carregamento, PP SA (Figura 4-65A) e PP CA (Figura 4-65B). Nota-se um comportamento das curvas muito similar com os dois óleos. Isso indica que o efeito na resistência aos esforços tangenciais do contato devido à presença da aditivção no óleo foi praticamente inexistente com o sistema oscilatório nesse nível de carregamento. Lembrando dos resultados do potencial do contato nesses mesmos ensaios, constata-se que o efeito triboquímico no contato entre as amostras com óleo aditivado, detectado nas curvas do potencial, não resultou em efeito no atrito.

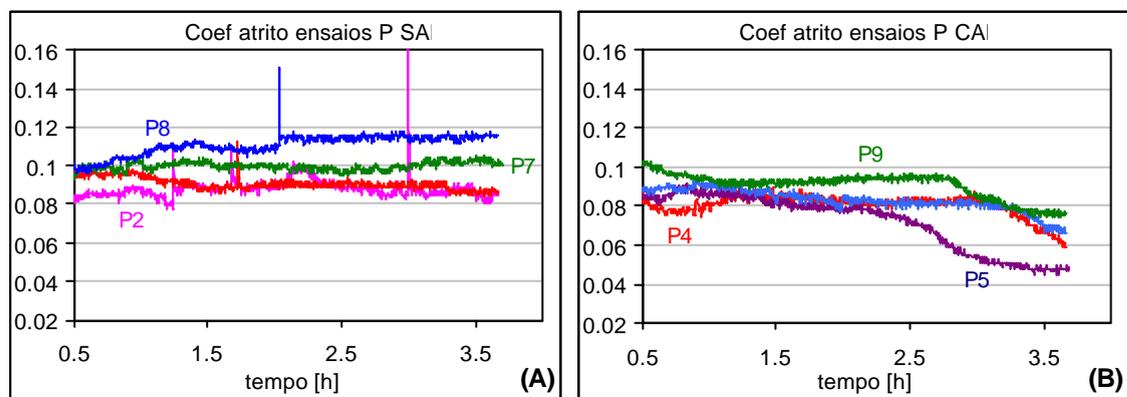


**Figura 4-65:** Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios oscilatórios com menor carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.

Observando ainda as curvas em cada gráfico da Figura 4-65, nota-se que em ambos o comportamento do atrito foi disperso de ensaio para ensaio, porém, uma tendência de queda no valor pode ser notada ao longo do ensaio. Ou seja, houve uma tendência de diminuição do esforço tangencial resistivo no contato, o que ocorreu

independentemente da utilização do óleo aditivado. Vale lembrar que, apesar da variação observada entre as curvas do coeficiente de atrito, o comportamento do potencial de contato foi praticamente igual para todos os ensaios, tanto nos ensaios com óleo não aditivado, como com óleo aditivado (Figura 4-58). Essa observação indica que os fenômenos gerados no contato na condição oscilatória com o menor carregamento, que foram sentidos pelo medidor do potencial de contato, não os foram pelo medidor dos esforços tangenciais gerados no contato.

Considerando o aumento do carregamento mecânico no ensaio, o efeito esperado seria de aumentar o coeficiente de atrito, devido à maior propensão à ocorrência de contato metálico e de outros mecanismos de desgaste severo. A Figura 4-66 mostra o comportamento do atrito nos ensaios oscilatórios com o maior carregamento. Comparando com a Figura 4-65, nota-se um comportamento diferente. Além disso, com o maior nível de carregamento, percebe-se que houve uma alteração no comportamento com a utilização do óleo aditivado.



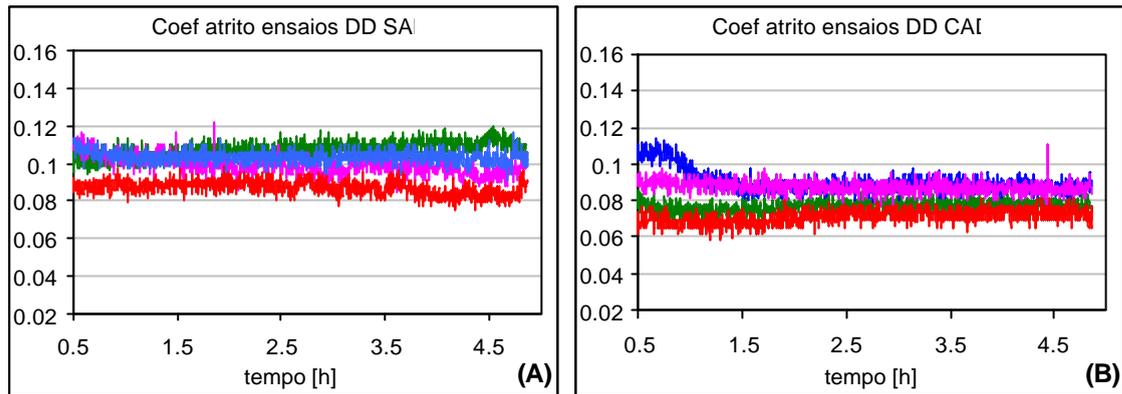
**Figura 4-66:** Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios oscilatórios com maior carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.

Pela Figura 4-66A, referente aos ensaios P SA, as curvas mostraram em geral uma tendência com valores do coeficiente de atrito maiores e, em cada ensaio, a tendência foi mantida numa faixa mais constante, comparado à Figura 4-65A. Observa-se também que as curvas apresentaram uma flutuação com menor amplitude daquela vista com os ensaios com menor carregamento. É possível notar a existência de alguns picos nas curvas, indicando a ocorrência de instantes de atrito mais intenso. Esses instantes poderiam estar relacionados a momentos de rompimento do filme lubrificante

dentro da região do contato, proporcionados pelo carregamento severo e pela ausência de aditivos EP no óleo; com isso, devido ao contato metal-metal, as forças tangenciais na região interfacial do contato seriam maiores. Entretanto, a análise comparativa das curvas do coeficiente de atrito com as do potencial de contato elétrico (Figura 4-60A) não mostra evidência de correspondências dos picos do atrito a um contato metal-metal. Por outro lado, o comportamento do potencial foi oscilante, o que foi relacionado à ocorrência de oxidação superficial advinda do desgaste severo. Pode ser observado que o ensaio que apresentou um nível mais alto do potencial correspondeu à curva do coeficiente de atrito com nível mais alto (ensaio P8). Logo, a característica de desgaste severo com ocorrência do fenômeno de oxidação nas superfícies é o que levou a ocasionar os esforços tangenciais vistos nas curvas da Figura 4-66A.

Nas curvas dos ensaios P CA, mostradas na Figura 4-66B, pode ser observada uma mudança no comportamento do atrito com o uso do óleo aditivado, vista pela ausência dos picos e pela tendência de queda das curvas. Isso mostra a sensibilidade dos esforços tangenciais no contato à ocorrência ao longo do ensaio de uma situação de contato favorável à atuação triboquímica do aditivo EP nas superfícies metálicas, que proporcionou a formação de uma tribocamada de baixo atrito. Vale lembrar que as superfícies de desgaste nesses ensaios foram lisas e apresentaram coloração escurecida. Pode ainda ser notado que as curvas do coeficiente de atrito da Figura 4-66B mostra correspondência com as respectivas curvas do potencial de contato (Figura 4-60B), de modo que, quanto menor o atrito, maior foi o potencial de contato. Essa observação pode ser melhor visualizada nas curvas apresentadas no ANEXO B.

O coeficiente de atrito nos ensaios com o sistema rotativo foi analisado, para verificar a existência de diferenças de comportamento, comparado com os ensaios oscilatórios. A Figura 4-67 mostra os gráficos do comportamento do coeficiente de atrito dos ensaios rotativos com o menor carregamento, DD SA e DD CA.



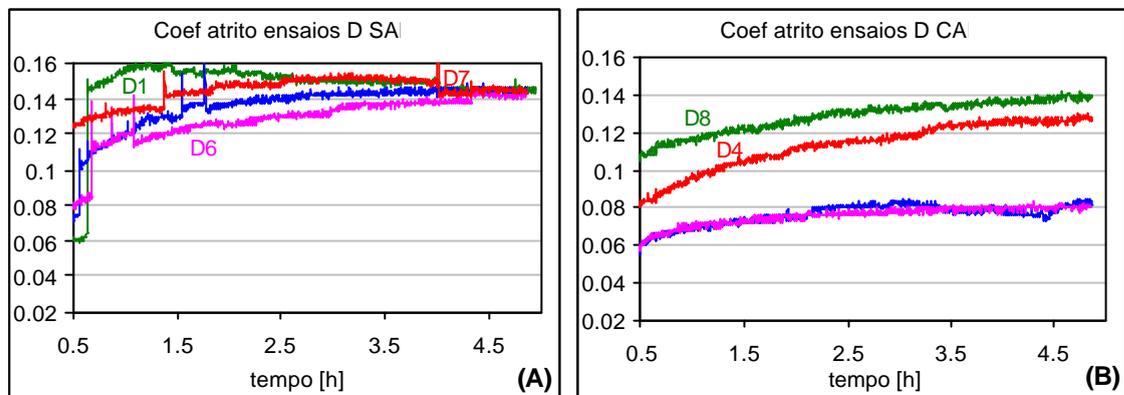
**Figura 4-67:** Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios rotativos com menor carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.

Comparando os resultados da Figura 4-67 com os ensaios oscilatórios desse nível de carregamento (Figura 4-65), nota-se que os gráficos dos ensaios rotativos apresentaram uma menor dispersão no comportamento de ensaio para ensaio. Os valores tenderam a se manter em um patamar horizontal ao longo do ensaio. Esse fato evidencia uma diferença quanto aos esforços tangenciais gerados no contato nos dois sistemas de ensaio com o nível de carregamento em questão. Ou seja, nos ensaios com o sistema rotativo, os esforços ao longo do tempo foram mantidos em um nível mais constante, comparados àqueles vistos com o sistema oscilatório no mesmo nível de carregamento. Nos ensaios rotativos, comparando DD SA com DD CA, nota-se que o uso do óleo aditivado não alterou o comportamento do atrito, porém o nível foi menor. Diferentemente dos ensaios oscilatórios com o nível de carregamento em questão, nos ensaios rotativos, o uso da aditivação no óleo foi eficiente em diminuir os esforços tangenciais no contato, o que ocorreu de modo constante durante todo o ensaio. Esse fato parece indicar que um filme limítrofe (advindo de um efeito de adsorção) foi proporcionado na interface de contato nos ensaios DD, diferente de um filme triboquímico propriamente dito, pois com este, o atrito apresentaria uma evolução com o tempo de ensaio.

Nesse momento, é importante destacar a necessidade de se realizar repetições dos ensaios, pois sem as mesmas, as diferenças de tendências no atrito não poderiam ser identificadas, devido à dispersão que os resultados apresentaram. A dispersão é

relacionada à natureza estocástica do fenômeno do atrito [LUDEMA, 1996], que, nos ensaios realizados, se mostrou mais evidente na condição oscilatória.

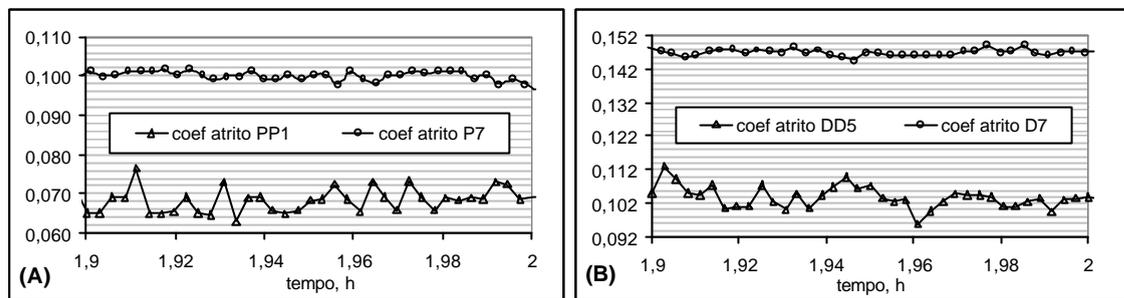
Com o aumento do carregamento nos ensaios rotativos (Figura 4-68), o comportamento do coeficiente de atrito foi diferente com os dois óleos, como também observado nos ensaios oscilatórios com esse nível de carregamento (Figura 4-66). Nos ensaios D SA (Figura 4-68A), também são notados picos no comportamento do atrito, mas diferentemente dos ensaios oscilatórios, o atrito tendeu a aumentar, até atingir um patamar horizontal com um valor bem superior ao visto nos ensaios P SA.



**Figura 4-68:** Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios rotativos com maior carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.

Já nos resultados dos ensaios rotativos com maior carregamento e com o óleo aditivado (Figura 4-68B), percebe-se a ausência dos picos, como ocorreu com os ensaios oscilatórios. Entretanto, houve diferença quanto ao comportamento, visto que nos ensaios rotativos o atrito foi sempre crescente. Vale lembrar nesse caso que, mesmo com o uso da aditivação, foi observado nas superfícies dos ensaios D CA, além da ocorrência de um aprofundamento na trilha de desgaste do disco, um riscamento uniforme, com aumento da rugosidade. Essas observações conjuntas levam a caracterizar a condição rotativa como um ensaio que possibilita ao aditivo atuar, porém menos eficientemente na formação de um filme triboquímico de baixo atrito, do que no sistema oscilatório. Isso pode estar relacionado com o tipo de movimentação do fluxo de lubrificante no contato, sendo que o resíduo gerado pelo desgaste pode contribuir na formação do filme triboquímico (discutido posteriormente, vide Cap.5- Discussão).

Um fato curioso é que todas as curvas dos ensaios com menor carregamento apresentaram um comportamento similar em relação à amplitude da flutuação do atrito em termos de alta frequência, que foi sempre maior do que a amplitude da flutuação com maior carregamento. Os gráficos da Figura 4-69 mostram detalhes de ensaios, com os quais notam-se as diferentes amplitudes da flutuação do coeficiente de atrito em função do carregamento, tanto na condição oscilatória como rotativa. A característica estocástica do atrito pareceu ser mais evidenciada com o menor carregamento, o que concorda com as observações de DOWSON (1997).

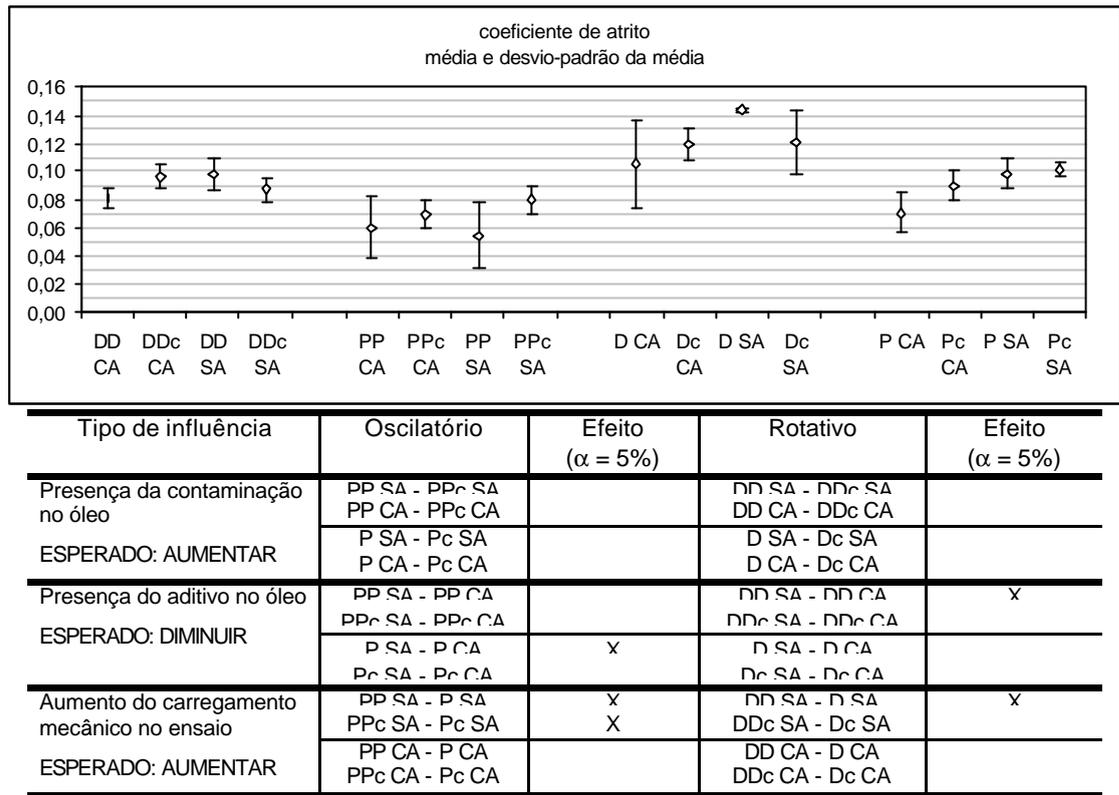


**Figura 4-69: Detalhe de curvas do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios com óleo não aditivado. (A) oscilatórios; (B) rotativos.**

Os gráficos do comportamento do atrito ao longo do tempo de ensaio de todos os ensaios realizados estão mostrados no ANEXO B.

Analogamente ao potencial de contato elétrico, os valores médios do coeficiente de atrito nos ensaios realizados foram analisados estatisticamente. A Figura 4-70 mostra os valores do coeficiente de atrito em função da condição de ensaio<sup>37</sup> e um resumo dos resultados da análise estatística dos efeitos da contaminação, da aditivação e do carregamento no coeficiente de atrito. Considerando as ações esperadas no contato causadas por esses efeitos, descritas na **Tabela 4-5**, tem-se que os efeitos esperados da contaminação e do carregamento seriam de aumentar o coeficiente de atrito, enquanto que o da aditivação seria de diminuí-lo. Algumas tendências dos efeitos já puderam ser verificadas na análise do comportamento do coeficiente de atrito ao longo dos ensaios.

<sup>37</sup> O coeficiente de atrito de cada ensaio foi calculado com base nos dados de atrito adquiridos durante os 50 min finais do ensaio, compreendendo 300 dados. O valor do coeficiente de atrito de cada condição de ensaio considera a média e o desvio-padrão dos coeficientes de atrito de todos os ensaios realizados na referida condição de ensaio.



**Figura 4-70: Gráfico com os valores médios do coeficiente de atrito dos ensaios realizados e resultados da análise estatística dos efeitos da contaminação, aditivação e carregamento no potencial.**

A análise estatística dos valores do coeficiente de atrito mostrou que, apesar da ampla faixa de valores resultantes, efeitos significativos no valor do coeficiente de atrito devido às influências em questão puderam ser identificados apenas em algumas poucas condições de ensaio, por causa dos desvios-padrões elevados. Conforme os resultados apresentados na Figura 4-70, a presença do contaminante não teve efeito significativo no atrito, embora pudesse ser notada uma tendência de aumento do coeficiente em algumas condições. Já quanto ao efeito da aditivação, o mesmo foi como esperado e significativo apenas em duas condições de ensaio, ambas com óleo não contaminado: oscilatório-Se e rotativo-Mo. O gráfico da Figura 4-70 mostra que o efeito do carregamento mecânico no coeficiente de atrito tendeu em média a ocorrer como esperado, porém conforme a análise estatística, foi significativo apenas em três das condições SA.

Pela Figura 4-70, os valores médios do coeficiente de atrito dos ensaios realizados estiveram localizados na faixa de 0,05 a 0,14, ou mais precisamente, de 0,054

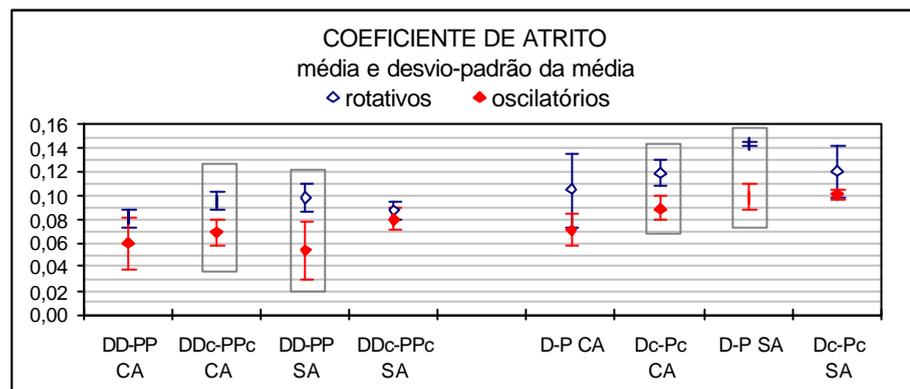
a 0,143. Pelas condições de carga e velocidade dos ensaios, era previsto que a lubrificação fosse mista em todos os ensaios, cuja faixa de valores do coeficiente é um pouco diferente, de 0,05 a 0,10 segundo GEE, BEGELINGER e SALOMON (1984). Entretanto, vale lembrar as considerações de LUDEMA (1996) acerca da imprecisão dos valores mencionados na literatura. Por outro lado, no regime de lubrificação fosse limítrofe, o coeficiente de atrito teria valores mais altos (de 0,25 a 0,45 segundo GEE, BEGELINGER e SALOMON, 1984) no início do ensaio, devido à ocorrência de regiões no contato com colapso do filme na etapa de assentamento [HUTCHINGS, 1992]. Isso não ocorreu nos ensaios realizados; no entanto, os resultados de desgaste mostraram que o desgaste foi maior e ocorreu sob um modo bem mais severo com o maior nível de carregamento. Procedeu-se portanto, a uma análise para verificar características quanto ao modo de lubrificação nos ensaios.

Em termos dos ensaios com maior carregamento, os picos nas curvas do atrito e as morfologias superficiais com deformação severa observados nos ensaios SA levam a indicar que, pelo menos nesses ensaios, o regime de lubrificação esteve próximo ao limítrofe. Ou seja, nesse caso, o efeito EHL (separação física das superfícies pela interposição de um filme fluido) presente na interface foi reduzido. Além dessa observação, as curvas de atrito dos ensaios SA e CA com o maior carregamento foram distintas entre si (Figura 4-66 e Figura 4-68), indicando que, com esse carregamento, a aditivação presente no óleo influenciou o atrito. Sabe-se que o atrito é influenciado pela natureza química do óleo mais evidentemente quando a lubrificação é limítrofe. Por essas considerações, pode ser constatado que, sendo o regime de lubrificação misto, esteve na iminência para o limítrofe, ou seja, o efeito EHL esteve reduzido ao mínimo, nos ensaios realizados com o maior carregamento.

Já nos ensaios com o menor carregamento, o comportamento do atrito foi praticamente o mesmo, independentemente da presença do aditivo no óleo (Figura 4-65 e Figura 4-67), o que indica que os fenômenos de atrito sofreram menos influência da natureza química do óleo. Especificamente nos ensaios oscilatórios, até mesmo o desgaste dimensional não foi afetado pela presença do aditivo no óleo, embora a análise microscópica tenha mostrado uma superfície distinta com o uso do aditivo no ensaio. Nos ensaios rotativos, apesar do comportamento do atrito não ter sido afetado, o seu valor e o desgaste das amostras diminuíram com o uso do aditivo. Logo, a influência da

natureza química do óleo e, portanto, do modo de lubrificação limítrofe, ocorreu, sendo mais evidente nos ensaios rotativos, porém foi menor nesse nível de carregamento.

A Figura 4-71 mostra os valores obtidos com os dois sistemas, superpostos nas condições de ensaio correspondentes. Notam-se valores maiores com ensaios rotativos. As maiores diferenças entre ensaios oscilatórios e rotativos se concentraram nas condições SA e CA, estas com óleo contaminado. Essas condições referem-se àquelas em que nem o aditivo nem o contaminante foram utilizados e àquelas onde ambos estavam presentes, mas o aditivo teve a sua influência minimizada pela presença do contaminante. Pela análise estatística dos valores ( $\alpha = 5\%$ ), a diferença entre os sistemas foi significativa entre DD-PP SA, entre D-P SA e entre Dc-Pc CA.



**Figura 4-71: Coeficiente de atrito em função da condição de ensaio; visualização das diferenças entre os sistemas mecânicos. Valores em destaque referem-se àquelas com diferença significativa.**

Os resultados de atrito apresentados evidenciam que, mais do que os valores médios, o comportamento do coeficiente de atrito ao longo dos ensaios mostrou diferenças tribológicas devidas à presença da aditivação e do carregamento aplicado, bem como do tipo de sistema utilizado. Assim, mesmo com condições de carga e velocidade numa faixa tão estreita, aparentemente todas em lubrificação mista, foi possível observar que diferentes fenômenos ocorrem na interface de contato, que dependeram das variações físicas e químicas introduzidas no sistema. A Tabela 4-11 mostra um resumo dos principais aspectos do comportamento do atrito observados.

**Tabela 4-11: Resumo das principais características relacionadas ao comportamento do coeficiente de atrito observadas em cada condição de ensaio.**

Código	Aditivo	Contaminante	Carregamento	Comportamento
DD CA	X		Mo	Permanece constante num patamar
DD SA			Mo	Permanece constante num patamar maior que em DD CA
PP CA	X		Mo	Tende a diminuir desde o início. Disperso de ensaio para ensaio
PP SA			Mo	Tende a diminuir desde o início. Disperso de ensaio para ensaio
D CA	X		Se	Tende a aumentar nitidamente. Disperso de ensaio para ensaio
D SA			Se	Tende a aumentar nitidamente até um patamar bem mais alto que os demais. Apresenta picos discretos durante o ensaio
P CA	X		Se	Tende a diminuir no fim do ensaio
P SA			Se	Tende a aumentar muito levemente até um patamar. Apresenta picos discretos durante o ensaio. Disperso de ensaio para ensaio