FISSURAÇÃO DE SUPERFÍCIES EM FERRO NODULAR AUSTEMPE-RADO (ADI) SUJEITO A CONTACTOS DO TIPO HERTZIANO

L. Magalhães ⁽¹⁾ e J.Seabra ⁽²⁾

⁽¹⁾ DEM – Departamento de Engenharia Mecânica, ISEP, Porto, Portugal ⁽²⁾ DEMEGI – FEUP, Porto, Portugal

RESUMO

O Ferro Nodular Austemperado (ADI - Austempered Ductile Iron) é um material de uso crescente no fabrico de componentes mecânicos, nomeadamente engrenagens. Torna-se, pois, necessário conhecer em detalhe o comportamento à fadiga de contacto do ADI, tendo sido realizados ensaios de engrenagens ADI no banco de ensaios FZG e ensaios de discos ADI na máquina bi-disco. As fissuras resultantes das solicitações cíclicas de fadiga de contacto são caracterizadas em termos dos seu ponto de iniciação e das condições de funcionamento, nomeadamente a pressão de Hertz, a espessura do filme lubrificante e o escorregamento entre as superfícies em contacto.

1. OBJECTIVOS

Este trabalho tem como objectivo principal a determinação da resposta das superfícies de componentes em ferro nodular austemperado (ADI) quando sujeitas a contactos do tipo Hertziano.

Ao mesmo tempo pretende-se estudar um procedimento de ensaio expedito para a aferição da resistência à fadiga deste tipo de materiais.

2. MATERIAL

O material em estudo é um ferro nodular ligado com 1% de Cobre e 0,5% de Manganês e com um teor em Silício de cerca de 2%. Após completa austenitização este material foi austemperado durante cerca de 1 hora a diferentes temperaturas entre 260°C e 360°C [1], dando origem a matrizes compostas por austenite e por ferrite do tipo bainítico inferior e superior.

3. PROCEDIMENTOS

Foram realizados ensaios com engrenagens em ADI num banco de ensaios FZG e ensaios com provetes cilíndricos (discos) numa máquina bi-disco. Os ensaios foram preparados a partir da simulação teórica das condições impostas ao contacto e complementados quer pela análise das superfícies, por microscopia e perfilometria, quer pela análise do lubrificante, através de técnicas de ferrometria e ferrografia.

Os ensaios com engrenagens permitiram efectuar um estudo do comportamento à gripagem das superfícies, enquanto os ensaios com discos foram orientados no sentido do estudo da sua resistência à fadiga de contacto.

3.1 Ensaios de Engrenagens

Foram produzidas 3 engrenagens normalizadas do tipo FGZ-A que foram posteriormente austemperadas a 260, 280 e a 360°C. Com elas foram realizados ensaios normalizados de gripagem do tipo FGZ A (DIN 51354-FZG A/8.3/90) quer а temperatura livre quer a temperatura constante.

3.1.1 Condições de contacto

A Tabela 1 mostra, de forma resumida, as condições a que foram submetidas as superfícies dos dentes em contacto das engrenagens [1].

Tabela 1: Condições gerais de contacto para as engrenagens.

Força normal máxima/comprimento:	832 N/mm
Pressão máxima de Hertz:	1.8 Gpa
Espessura mínima de filme lubrificante: (em ensaios a temperatura livre)	0.09 µm
Temperatura máxima do lubrificante: (em ensaios a temperatura livre)	127 °C
Temperatura máxima no contacto: (em ensaios a temperatura livre)	307 °C
Lubrificante: (variedade parafinica sem aditivos)	ISO VG68
Rugosidade média das superfícies (Ra):	2.2 μm
Dureza média das superfícies (HRC):	30 a 40
Velocidade linear no primitivo:	8.3 m/s
Escorregamento máximo:	75 %

3.1.2 Resultados

Os resultados dos ensaios normalizados FGZ-A são expressos em termos do número de estágios que as superfícies dos flancos activos dos dentes das engrenagens conseguem suportar antes de se gerarem fenómenos de adesão suficientes para que as considerem superficies se avariadas (gripadas). A Figura 1 mostra os resultados correspondentes a cada um dos ensaios das engrenagens.

Fig 1 - Resultados dos ensaios de engrenagens FZG-A.





3.1.3 Estado das superfícies

A observação mais marcante na evolução do estado das superfícies prende-se com a diminuição significativa da sua rugosidade média. Este efeito foi notório sobretudo nas engrenagens austemperadas a temperaturas mais altas. A deformação plástica e os fenómenos de adesão sofridos rugosidades pelas superficiais foram suficiente para eliminar vestígios da maquinagem em muitas zonas do contacto, e а maioria dos orificios inicialmente correspondentes aos nódulos de grafite superficiais foi preenchida com material das próprias superfícies, conforme se pode ver na Figura 2.

O abaixamento da rugosidade média das superfícies mostrou uma excelente correlação com o número de partículas metálicas encontradas, em cada caso, no lubrificante correspondente. Isto permite afirmar que os ADIs ensaiados são bastante à rodagem sensíveis das superficies quando submetidos a sobretudo altas pressões de contacto.



Fig 2 – Aspecto da superfície do dente de uma engrenagem no final do ensaio de gripagem.

3.1.4 Adesão

Outro tipo superficial de fissuras foi encontrado nas zonas que sofreram adesão. Nestes locais sujeitos a destruição severa das superficies foram sempre encontradas pequenas fissuras transversais ao sentido do escorregamento. Se estas forem efeito de microsoldaduras precoces é provável que seja a sua presenca que conduz à forte remoção de material que se constata durante a fase de gripagem destes materiais. Apesar de uma longa resistência à adesão, as superfícies ADI tendem a deteriorar-se gravemente quando esta ocorre. Isto é mais notório quanto maior for a temperatura no contacto. A Figura 3 mostra o aspecto de uma zona em que se vêm leves vestígios de adesão.



Fig 3 – Zona do dente de uma engrenagem onde se verificou adesão.

3.1.5 Fissuração

O número de fissuras detectáveis nas superfícies após os ensaios foi sempre muito reduzido. Foram também encontradas algumas pequenas crateras, mesmo assim em pequeno número, não sendo representativas de qualquer forma prevalecente de avaria, sendo provavelmente resultado da propagação pontual de algumas fissuras subsuperficiais e da consequente fragilização local da superfície.

A observação de amostras metalográficas do interior de dentes (cortados após os ensaios) revelou a existência de várias fissuras que se situam sobretudo imediatamente abaixo das superfícies e que se propagam entre estas e um nódulo de grafite ou mesmo ligando nódulos entre si, como mostra a Figura 4. Este fenómeno foi mais notório nas zona dos dentes sujeitos a maiores taxas de escorregamento, o que corrobora a hipótese de essas fissuras terem origem nas tensões que se geram na zona Hertziana do contacto.

3.1.6 Discussão

Ao nível da resistência à gripagem, os resultados obtidos foram excelentes. Recordese que engrenagens semelhantes fabricadas em aço cementado não resistem a estágios



Fig 4 – Corte metalográfico mostrando fissuras no interior de um dente de uma engrenagem ADI.

FZG superiores ao 4º ou ao 5º quando são ensaiadas nas mesmas condições. É notável o desempenho conseguido em todos os casos já que foi sempre utilizado um lubrificante sem aditivos e de baixa viscosidade em conjunto com superfícies de rugosidade relativamente acentuada, ou seja, proporcionando um forte acréscimo de severidade às condicões favoráveis à gripagem que o ensaio normalizado já impõe por si.

Ao nível da resistência à flexão não foi possível estabelecer comparações directas com outros ensaios semelhantes dada a menor largura das engrenagens utilizadas (16mm em vez de 20). No entanto, é importante notar que:

- a) nenhuma das engrenagens fracturadas apresentou sintomas de gripagem;
- b) as fracturas ocorreram sempre para valores de binário acima dos 450 Nm, correspondentes a pressões de contacto próximas de 2 Gpa.

Os ensaios de gripagem de engrenagens não permitem retirar conclusões sobre a resistência à fadiga das engrenagens. Em termos de fissuração pode dizer-se que a maioria das fissuras subsuperficiais se torna invisível à superfície quando as deformações que esta sofre geram uma espécie de "camada" de recobrimento superficial. O tempo relativamente curto que duram estes ensaios não foi suficiente para que a propagação das fissuras subsuperficiais provocasse fenómenos de "spalling" ou outras formas de deterioração nítida das superfícies. A presença dessas fissuras, no entanto, foi confirmada por inspecção microscópica das amostras metalográficas.

3.2 Ensaios de discos

Foram ensaiados três pares de discos produzidos num ADI de composição química idêntica à referida no parágrafo 2 e austemperados durante 1 hora a 280°C. Os ensaios foram planeados na tentativa de desenvolver um método expedito de testar a resistência à fadiga das superfícies e, ao mesmo tempo, em que as condições de contacto se aproximassem daquelas que se atingem durante o funcionamento de engrenagens.

3.2.1 Condições de contacto -

Tendo em conta a qualidade superficial dos discos, foi determinada uma geometria que proporcionasse um contacto elíptico de dimensões convenientes e seleccionado um lubrificante adequado (de baixa viscosidade e sem aditivos de extrema pressão). Assim, foram utilizados pares constituídos por um disco cilíndrico (com a pista plana) e um disco esférico (possuindo curvatura no plano perpendicular ao movimento), ambos com um diâmetro de 70 mm. A temperatura do lubrificante e a velocidade de rotação dos discos foram determinadas por simulação teórica de forma a garantir as condições patentes na Tabela 2.

3.2.2 Sequência dos ensaios

Todos os discos foram submetidos a 10.000 ciclos em rolamento puro (500 rpm) na primeira fase de ensaios. A partir daí o par A foi destruído para a produção de amostras metalográficas, sendo apenas testados os pares B e C. A pressão no contacto foi sempre de 2 GPa, com excepção do par de discos C, que foi submetido a 1.6 GPa até se completarem 200.000 ciclos (valor inicialmente previsto para o final dos ensaios). Em seguida os pares B e C foram testados sob uma pressão de 2 GPa e a uma velocidade de rotação de 1750 rpm até que as suas superfícies se considerassem avariadas, o que sucedeu após mais de um milhão e meio de ciclos acumulados. A Figura 5 mostra a extensão dos ensaios efectuados.

Tabela 2: Condições gerais de contacto para os discos

Força normal máxima:	6800 N
Pressão máxima de Hertz:	2 Gpa
Espessura mínima de filme lubrificante:	0.11µm
Temperatura do lubrificante:	100 °C
Lubrificante: (levemente aditivado)	ISO VG22
Rugosidade média das superfícies (Ra): (discos esféricos)	0.6 µm
Rugosidade média das superfícies (Ra): (discos cilíndricos)	0.3 µm
Dureza média das superfícies:	46 HRC
Velocidade linear média: (até 200 mil ciclos)	1.83m/s
Velocidade linear média: (após 200 mil ciclos)	6.4 m/s
Taxa de escorregamento:	9.8%

3.2.3 Indentações artificiais

No intuito de se desenvolver um método expedito de ensaio da resistência à fadiga das superfícies ADI foram geradas indentações sobre as superfícies de trabalho dos discos esféricos. Este processo tem vindo a ser usado com sucesso em provetes de aço [2], e permite gerar fissuras por fadiga em menos tempo pela presença de defeitos que agem como concentradores de tensões nas



Fig 5 - Sequência de ensaio dos discos.

superfícies solicitadas. Foi seleccionada como forma de indentação a impressão resultante de

um ensaio de dureza normalizado (HRC 150Kg) já que garante a reprodutibilidade das

dimensões impressas e permite obter um bom rebordo em torno da indentação de feitio circular (a altura do rebordo é o principal factor no acelerar do surgimento de fissuras de fadiga em provetes de aço e não a profundidade ou as dimensões do defeito [2]). A Figura 6 mostra uma imagem correspondente a uma das indentações realizadas.



Fig 6 - Fotografia de uma indentação obtida com um penetrador cónico de medição de dureza (HRC150)

3.2.4 Resultados

Os resultados destes ensaios apenas podem ser expressos em termos comparativos do estado das superfícies. De uma forma geral todos os discos apresentaram algumas fissuras superficiais muito cedo (zonas de coalescência de fissuras relacionadas com o eventual deslocamento em profundidade de zonas localizadas das superfícies) mas nenhum dos discos sofreu deterioração sensível das superfícies de contacto durante os 200.000 ciclos de ensaio inicialmente previstos. Os testes foram prolongados até se verificarem avarias nas pistas de contacto. Isto sucedeu aos 1,6 milhões de ciclos para o par C e aos 1,7 milhões de ciclos para o par B. Em ambos os casos a avaria consistiu na libertação de uma escama superficial ("spall") e ocorreu em zonas contendo grandes fissuras desde o início dos ensaios.

3.2.4.1 Estado das superfícies

O estado geral das superfícies de trabalho dos discos manteve-se muito bom até ao final dos ensaios. À vista desarmada apenas restaram identificáveis as indentações artificiais de dureza e as fissuras geradas nos primeiros ciclos de operação (até 10.000 ciclos).

3.2.4.2 Análise microscópica

A análise microscópica das superfícies revelou desde logo (desde os primeiros 10.000 ciclos) que todas as superfícies testadas apresentavam inúmeras microfissuras de formato característico, sempre situadas radialmente em grupos de três ou quatro em torno de pequenos nódulos de formato esférico, como se vê na Figura 7.

Algumas destas cavidades, aparentemente coincidentes com os nódulos de grafite, mantiveram-se preenchidas enquanto outras foram esvaziadas ao longo dos testes.

As poucas marcas visíveis a olho nu nas superfícies correspondem a locais de coalescência de fissuras pouco profundas,

aparentemente resultantes do deslocamento relativo de zonas da superfície (afundamento entre as fissuras). Estas de zonas macrofissuras, apesar de geradas logo na rodagem das superfícies, não progrediram significativamente em nenhum dos discos até ao fim de 200.000 ciclos (dos quais metade foram realizados com cerca de 10% de escorregamento). As Figuras 8 e 9 mostram a evolução de zonas fissuradas desde os 10.000 ciclos de ensaio.

A presença destas macrofissuras esteve, no entanto, na origem das avarias registadas quer no par B quer no par C.

A observação dos locais em que ocorreu a libertação de uma pequena porção da superficie sugerem que a propagação em profundidade destas fissuras e a consequente fragilização da zona tenha dado origem a um mecanismo típico de fadiga ("spalling"). A evolução do fenómeno foi relativamente lenta perante as condições de contacto $(1,6 \times 10^6$ ciclos para o par C e $1,7 \times 10^7$ ciclos para o par B) e as dimensões das escamas eram muito semelhantes nos dois discos afectados. A profundidade da cratera gerada nas superfícies coincide com aquela a que ocorrem os valores máximos da tensão de corte gerada no contacto.



Fig 7 - Aspecto de microfissuras em torno de cavidades superficiais.



Fig 8 – Zona de coalescência de fissuras: - à esquerda: ao fim de 10.000 ciclos; -à direita: ao fim de 200.000 ciclos



Fig 9 – Evolução superficial de uma zona fissurada.



Fig 10 – Fotografía da zona da pista de contacto (à esquerda) e da zona não solicitada (à direita). Nesta última são visíveis as estrias resultantes da maquinagem.

3.2.4.3 Efeito do escorregamento

A introdução de escorregamento mostrou-se um factor relevante na evolução do estado das superfícies. Apresentando características típicas dos materiais dúcteis (apesar de o ADI não o ser propriamente), as superfícies sofreram deformações plásticas fortes no sentido do movimento sem se verificar o aparecimento evidente de fissuras transversais, como é comum em aços cementados ou endurecidos superficialmente.

Na Figura 10 percebe-se a diminuição da aspereza da zona de contacto e a Figura 11 mostra imagens onde se vê claramente o efeito da introdução de escorregamento. Este provocou a deformação plástica da superfície exterior de forma a que muitas delas se preencheram de material deslocado enquanto outras coalesceram ou alongaram no sentido do movimento relativo.



40.000

200.000 ciclos



3.2.4.4 Efeito das indentações

Nenhum grupo particular de fissuras surgiu na proximidade de uma indentação artificial. Ao fim dos primeiros 10.000 ciclos a deformação plástica e o desgaste das superfícies atenuou de tal forma o rebordo saliente existente em redor destes orifícios que o seu efeito se tornou desprezível. A Figura 12 mostra o perfil obtido por rugosimetria de uma dessas indentações no seu estado original.

A compressão a que foram submetidas as zonas salientes em torno das indentações efeito provocou, no entanto. um aparentemente benéfico ao compactar o material e ao fechar as microfissuras existentes em seu redor. Apesar da destes defeitos. nenhum permanência importante material arrancamento de aconteceu a partir deles nem estiveram em nenhum caso na origem de fissuras superficiais. O estado de um destes defeitos artificiais ao fim de 10.000 e de 200.000 ciclos é visível na Figura 13.

Pode-se, assim, concluir que as indentações utilizadas não geraram fissuras superficiais de fadiga neste ADI durante os primeiros 200.000 ciclos nas condições em que foi ensaiado. A nível comparativo, um estudo de W. Cheng [2] refere que discos de aço contendo defeitos artificiais do mesmo tipo e sujeitos a condições de contacto semelhantes (2.4 GPa, 12.2% de escorregamento e espessura específica de filme lubrificante de 0.199 µm) passaram a apresentar fissuras em torno das indentações desde os primeiros 2.000 ciclos e que a sua presença era aí generalizada ao fim de 150.000 ciclos. Após prolongamento dos ensaios foi possível constatar que a deterioração das superfícies em torno destas indentações passou a ser considerável a partir de cerca de 1,4 milhões de ciclos. Este facto mostra que, apesar de ocorrer de forma "expedita", a não fissuração preferencial destas zonas resulta do efeito concentrador de tensões gerado pela presença das indentações artificiais e que estas são locais preferenciais de avaria relativamente às restantes superficies de contacto.

4. CONCLUSÕES

Os testes efectuados com engrenagens mostram que os ADIs ensaiados são resistentes materiais extremamente à gripagem quando sujeitos a contactos com transferência de carga elevada e perante uma lubrificação deficiente. O comportamento das superficies superou largamente 0 desempenho esperado de engrenagens de aço nas mesmas condições.







10.000 ciclos

1,7 e 1,6 milhões de ciclos,respectivamente

200.000 ciclos

Fig 13 – Imagem de indentações artificiais em diferentes fases dos ensaios; (à esquerda, disco B; à direita, disco C).

Estes testes também revelam que a fissuração é uma constante nas superfícies e sub-superfícies do ADI e que o comportamento da sua matriz metálica se mostra muito dependente da presença da grafite sob a forma nodular. As fissuras subsuperficiais tendem a surgir nas zonas onde as tensões Hertzianas são maiores e têm quase sempre percursos ligados com estes nódulos ou entre eles e a superfície.

Nos ensaios com discos verificou-se que as fissuras superficiais, mesmo quando resultantes do deslocamento de porções consideráveis da superfície, se propagam muito lentamente, o que revela uma faculdade notória de acomodação das superfícies deste material. Para além de atenuar fortemente a rugosidade superficial, proporcionando melhor distribuição de carga (registaram-se atenuações de rugosidade média da ordem dos 80% [1]), torna-se evidente que mecanismos associados ao próprio material retardam a propagação das fissuras superficiais. Estas progridem muito mais lentamente que nos aços cementados, por exemplo, quando estes são sujeitos a condições de contacto semelhantes.

As indentações artificiais utilizadas não resultaram numa aceleração evidente da fadiga superficial do material, pelo que se pode considerar não serem adequadas para este efeito num espaço de tempo reduzido e nas condições de contacto impostas (a permanência das saliências geradas nestas indentações mostrou-se precária face à deformabilidade das superfícies testadas e as zonas em seu redor não mostraram sofrer defeitos particulares antes de se atingir a casa dos 10⁶ ciclos). No entanto, e com excepção das zonas macrofissuradas - que surgiram de forma pontual e cuja origem ainda não foi possível determinar - a vizinhança destas indentações tornaram-se as zonas mais deterioradas das superficies após[.] 0 prolongamento dos ensaios. Isto mostra que o seu efeito concentrador de tensões permite a sua utilização como forma de prever a localização do surgimento das primeiras fissuras superficiais de fadiga e que estas ocorrem nesses locais muito mais depressa que no resto das pistas de contacto.

5. REFERÊNCIAS

- [1] "Wear and scuffing of austempered ductile iron gears", L.Magalhães, J.Seabra., WEAR 215 (1998) 237-246.
- [2] "Experimental Investigation on Rolling/Sliding Contact Fatigue Crack Initiation with Artificial Defects", W.Cheng, H.S.Cheng, L.M. Keer Trybology Transactions, vol 37, 1994.

