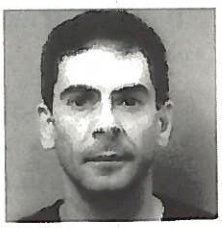
FADIGA DE CONTACTO DE ENGRENAGENS FZG EM FERRO NODULAR AUSTEMPERADO

Luís Magalhães [1]; Jorge Seabra [2]

[1]Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto
[2]Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de ensaios de fadiga de contacto realizados com engrenagens produzidas em ferro nodular austemperado. Os testes foram realizados numa máquina FZG, segundo procedimento normalizado para testes de fadiga e de "pitting", e englobaram o estudo de seis variantes distintas do material. Os resultados permitem concluir sobre o diferente desempenho destas variantes perante condições de contacto severas, nomeadamente pela alta pressão de contacto e pela reduzida espessura de filme lubrificante impostas às superfícies.

1. OBJECTIVOS

O ferro nodular austemperado, usualmente designado por ADI (a partir da expressão inglesa "Austempered Ductile Iron"), tem vindo a ser cada vez mais utilizado no fabrico de componentes mecânicos. Isto deve-se sobretudo ao grande desenvolvimento das técnicas de produção deste material e aos diversos estudos metalúrgicos que visam o aperfeiçoamento das composições químicas utilizadas, factores que contribuiram fortemente para que actualmente seja possível a produção de variedades de ADI que, em determinadas aplicações, rivalizam directamente com aços ligados de alta resistência mecânica.

O facto de permitir a produção de peças por fundição, de apresentar uma óptima resistência ao desgaste, de ser mais leve e amortecer melhor as vibrações que o aço, e de proporcionar um processo produtivo com custos muito inferiores aos necessários para os produtos equivalentes em aço ligado e temperado [Harding, 1986], fazem do ADI um material potencial para o fabrico de engrenagens.

Este trabalho teve como principal objectivo a caracterização do desempenho à fadiga de contacto de engrenagens fabricadas em ADI. Para isso foram testadas numa máquina FZG, em condições severas de funcionamento, seis variantes distintas do material. Este estudo permitiu relacionar os parâmetros de produção de cada variante do material com a resistência à fadiga superficial demonstrada em cada ensaio e, assim, determinar as características que melhor contribuem para maximizar a resistência à fadiga de contacto.

2. MATERIAIS ENSAIADOS

As seis variantes de ADI foram produzidas a partir do mesmo material de base, um ferro nodular com a composição química 2.6%Si, 3.6%C, 1%Cu e 0.5%Mn (percentagens mássicas) [H.Santos, A.

Pinto, V. Torres, 1991]. Os tratamentos de austêmpera realizados sobre cada par de engrenagens foram efectuados a temperaturas diferentes, e em alguns casos foram testados tratamentos faseados, em que se submeteu o material a um arrefecimento intermédio antes da fase de transformação isotérmica.

A Tabela 1 mostra a nomenclatura usada neste trabalho e a sua correspondência com as temperaturas nominais de austêmpera.

Os diferentes parâmetros dos tratamentos de austêmpera condicionam decisivamente as propriedades mecânicas destes materiais. Em termos de resistência à tracção estas variantes apresentam valores que vão desde os 1143 Mpa (ADI 340) até aos 1623 Mpa (ADI 260), enquanto o alongamento à ruptura varia desde 2% a 7.5% (ADIs 260D e 340, respectivamente) [A. Duarte, 2000]. Estes valores mostram bem a influência do tratamento térmico nas características dos ADIs, materiais cuja dureza se situa, para as variantes estudadas, entre 35 e 48 HRC150.

A liga utilizada tem sido alvo de diversos estudos na área da resistência de materiais e os resultados obtidos têm sido muito favoráveis. Esta composição química revelou desempenhos de alto nível quando foi testada a sua resistência à gripagem superficial [L. Magalhães, J. Seabra, 1997], ensaios que também foram realizados numa máquina FZG.

3. MÁQUINA FZG

A máquina de ensaios FZG permite testar engrenagens sob condições de serviço bastante severas, impondo pressões Hertzianas de contacto que podem atingir cerca de 4 GPa.

O binário máximo disponível é superior a 530 Nm, a velocidade de rotação da roda da engrenagem pode elevar-se até às 3000 rpm e a temperatura do óleo pode atingir 220 °C.

Esta máquina funciona em circuito fechado com circulação de potência, possuindo um carter onde são montadas as engrenagens a ensaiar. Estas podem ser lubrificadas por imersão (chapinagem) ou por injecção de óleo. É possível controlar o nível de vibrações e a temperatura do banho lubrificante, o que permite um bom rigor no acompanhamento dos ensaios, nomeadamente na detecção precoce das avarias de superfície. A Figura 1 mostra um aspecto esquemático da máquina utilizada.

4. ENGRENAGENS

Foram produzidos seis pares de engrenagens do tipo C, um "standard" da FZG que normaliza engrenagens adequadas a ensaios de fadiga e desgaste superficial. Estas engrenagens são constituídas por um pinhão de 16 dentes e uma roda de 24 dentes, sendo a correcção de dentado realizada de forma a equilibrar a velocidade de escorregamento no início e no fim do engrenamento. A Tabela 2 apresenta as principais características destas engrenagens.

Tabela 1 – Temperaturas de austêmpera e algumas propriedades mecânicas.

		σ_r	$\sigma_{0.2}$	**Along.**
Designação	Tratamento térmico	MPa	MPa	%
260	260°C (austêmpera simples)	1623	1350	3
260D	190°C + 260°C (austêmpera dupla)	1450	1250	2
300	300°C (austêmpera simples)	1433	1170	6
300D	190°C + 300°C (austêmpera dupla)	1550	1300	3.5
340	340°C (austêmpera simples)	1143	850	7.5
340D	190°C + 340°C (austêmpera dupla)	1308	1100	3.5

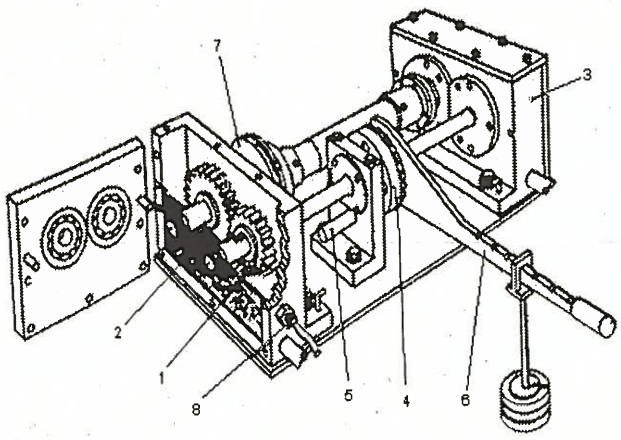


Fig 1 — Aspecto esquemático da máquina FZG.

1, 2 - pinhão e roda da engrenagem de teste;
3 – engrenagem motora;
4 - embraiagem de aplicação de carga;
5 - pino de imobilização;
6 – braço de aplicação de carga;
7 – medidor de binário;
8 – sensor de temperatura.

O facto de o módulo de elasticidade do ADI ser inferior ao do aço faz com que, para engrenagens semelhantes, as pressões de contacto sejam mais baixas nestas engrenagens do que em engrenagens de aço. Dada esta particularidade, estas engrenagens foram fabricadas com 14 mm de largura. Isto permitiu elevar os valores da pressão de contacto para uma dada carga e assim gerar solicitações equivalentes às que ocorreriam em engrenagens de aço de maior largura.

5. CONDIÇÕES DE CONTACTO

5.1 Rodagem

Antes de cada ensaio propriamente dito, cada engrenagem foi submetida a um período de rodagem das superfícies constituído por seis fases distintas em que a velocidade de rotação foi sucessivamente crescente. Neste período de rodagem o nível da solicitação foi o correspondente ao estágio 4 FZG. Trata-se de um nível de solicitação moderado, já que a máxima pressão Hertziana de contacto é de 0.72 GPa e a espessura mínima de filme calculada para as condições simuladas é da ordem dos 0.4 μm. Apesar disso, e considerando que a rugosidade média dos dentes das engrenagens após fabrico era cerca de 2 μm (Ra), o período de rodagem foi realizado em condições de lubrificação bastante pobre, o que proporcionou uma rápida alteração do perfil de rugosidade das superfícies de trabalho.

Tabela 2 – Características das engrenagens FZG do tipo C.

Nº de dentes (RODA)	24
Nº de dentes (PINHÃO)	16
Módulo (mm)	4.5
Correcção (RODA) (mm/módulo)	0.1715
Correcção (PINHÃO) (mm/módulo)	0.1817
Ângulo de pressão (Alfa)	20
Largura (mm)	14
Taxa de escorregamento máximo (%)	63.9

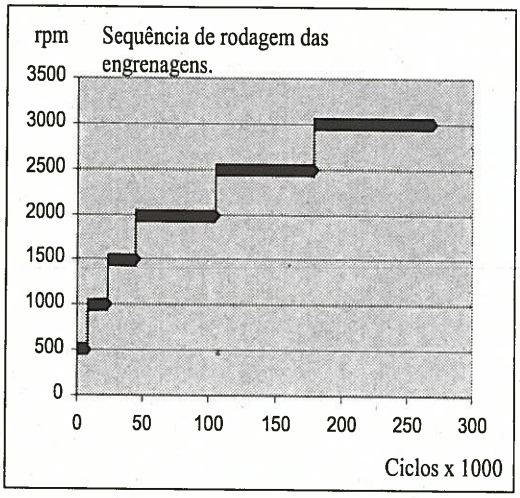


Fig 2 — Sequência de rodagem.

Todas as engrenagens foram submetidas a condições semelhantes durante a rodagem, sendo a temperatura do lubrificante neste período de 85°C. Cada engrenagem cumpriu um total acumulado de 270.000 ciclos nestas condições. A Figura 2 mostra a sequência de solicitações realizada durante a rodagem.

5.2 Solicitações

Dada a possibilidade de ensaiar duas vezes cada par de engrenagens (um ensaio para cada lado, referidos neste trabalho como lado A e lado B), foi decidido que, num primeiro conjunto de testes, todas as engrenagens seriam submetidas a uma pressão nominal de 1.4 GPa (ensaios do lado B). Num segundo conjunto de testes a pressão de contacto a aplicar seria de 1.8 GPa (lado A). Estas duas situações correspondem aos estágios 8 e 10 da máquina FZG.

A velocidade de rotação da roda foi mantida constante a 3000 rotações por minuto em todos os testes.

Em qualquer dos casos, e apesar de posteriormente se verificar que não era exequível, estimou-se que a temperatura de trabalho seria constante e de 100 °C. Nessas condições, o conjunto de solicitações mais importante é o patente na Tabela 3.

6. LUBRIFICANTE

O lubrificante usado na rodagem e nos ensaios foi um óleo para engrenagens industriais de grau ISO VG 150 contendo aditivos de extrema-pressão (EP) e anti-desgaste (AW). As suas características encontram-se na Tabela 4. O lubrificante foi integralmente substituido antes de cada rodagem e antes de cada teste de engrenagens.

Durante a rodagem a temperatura do lubrificante foi controlada, mantendo-se estável a 85°C. Ao longo dos ensaios, no entanto, não foi possível manter constante a sua temperatura, sobretudo nos ensaios a 1.8 GPa, em que se atingiram valores até 116°C (ver parágrafo 7).

O lubrificante foi analisado laboratorialmente após cada utilização, permitindo quantificar as partículas metálicas presentes

Tabela 3 – Condições gerais de contacto durante os ensaios

	Estágio 10	Estágio 8	Unidades
Escorregamento máximo *(A)* *	63	63	%
Força normal máxima *(C,I,D)*	11014	7080	N
Pressão de Hertz máxima *(D)*	1.79	1.439	GPa
Espessura de filme mínima *(A)*	0.23	0.35	µm
Espessura específica de filme mínima (Ra = 2 µm) *(A)*	0.06	0.08	µm
Coeficiente de atrito máximo de Kelly *(I)*	0.06	0.05	-

**Nomenclatura dos pontos de engrenamento (A C I D B).*

Velocidade de rotação da roda = 3000 rpm ; Temperatura do óleo = 100 °C.

Tabela 4 - Características do lubrificante usadas nos cálculos.

Viscosidade cinemática a 40°C	$148.8x10^{-6}$ m^2/s
Viscosidade cinemática a 100°C	$14.68x10^{-6}$ m^2/s
Condutibilidade térmica	0.1318 W/m^2K
Densidade	895 Kg/m^3

tornando-se, assim, um indicador das taxas de desgaste sofridas pelas diferentes engrenagens.

7. ENSAIOS DE FADIGA

7.1 Resumo dos resultados

A Figura 3 mostra o conjunto dos resultados dos ensaios de engrenagens em termos do número de ciclos de teste realizado por cada engrenagem até ocorrer a avaria dos flancos dos dentes.

Os valores indicados no topo de cada coluna da Figura 3 referem-se ao número de dentes cujas superfícies se encontravam consideravelmente danificadas no final de cada ensaio. Os casos em que ocorreram fracturas encontram-se assinalados com "x".

Na Tabela 5 constam as principais informações relativas a cada teste, incluindo o número dentes afectados por avarias, o tipo de avaria predominante, o número de ciclos realizado até ao final de cada teste e a temperatura a que estabilizou o sistema de refrigeração da máquina FZG.

7.2 Análise dos resultados

7.2.1 Tipo de avarias

A forma mais comum de avaria que surge quando engrenagens são submetidas a este tipo de solicitações é o "spalling", que corresponde à formação de crateras de fadiga, que têm origem em fissuras subsuperficiais geradas pelas tensões na zona Hertziana. Estas crateras podem ter vários milímetros de extensão e mesmo de profundidade.

Tabela 5 – Resumo dos resultados dos ensaios de engrenagens.

ADI T_{iso} °C	P_{hertz} GPa	T_{max} °C	Tempo min.	Ciclos X 1000	n.dentes c/ avaria	Tipo de avaria
340	1.4	106	180	540	1	Escama num dente do pinhão;algumas indentações na roda.
340D	1.4	113	345	1035	24	Escamas em diversos dentes; pitting no primitivo dos dentes da roda e do pinhão.
300	1.4	108	276	828	10	Pequenas escamas no pinhão e na roda; "pitting" nos primitivos dos dentes; algumas indentações.
300D	1.4	99	510	1530	0	Pitting acentuado no pinhão e mais ligeiro na roda.
260	1.4	108	100	300	-	Fractura de um dente da roda; riscos concentrados nos dentes.
260D	1.4	117	814	2442	0	Pitting ligeiro no pinhão e mais acentuado na roda.
340	1.8	100	40	120	14	Escamas em vários dentes do pinhão e algumas fissuras sobretudo na roda.
340D	1.8	105	120	360	5	Escamas em vários dentes e algumas fissuras na roda.
300	1.8	106	120	360	6	Escamas e fissuras em dentes do pinhão, uma escama na roda.
300D	1.8	97	90	270	29	Grandes escamas em todos os dentes do pinhão, algumas escamas e fissuras na roda.
260	1.8	108	150	450	-	Fractura de um dente do pinhão; superfícies em bom estado.
260D	1.8	100	165	495	-	Fractura de um dente do pinhão; riscos no topo de alguns dentes.

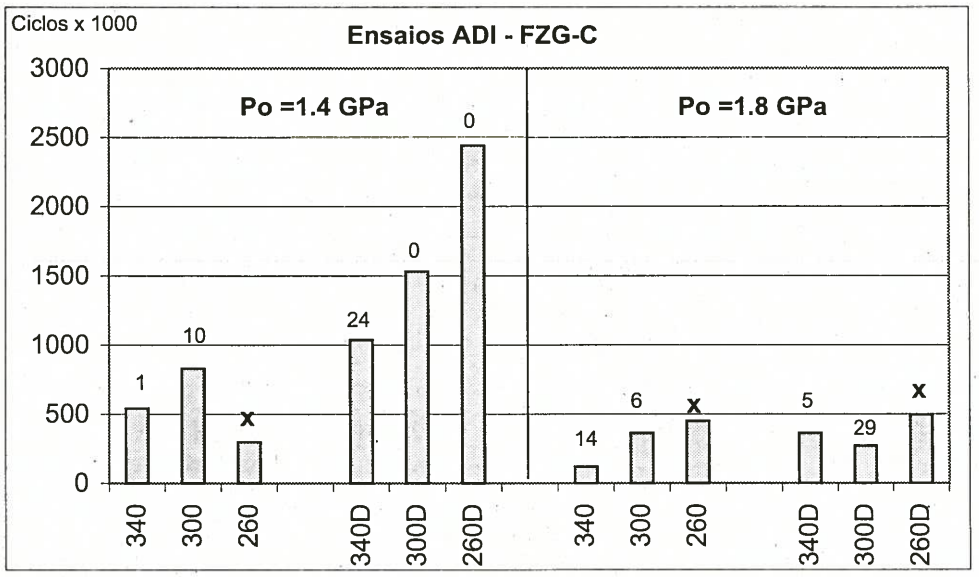


Fig 3 – Resultados dos ensaios de engrenagens.

X – Fractura de dentes da engrenagem
10 – nº de dentes com libertação de escamas de fadiga

Em determinadas condições, normalmente associadas a solicitações menos severas ou a materiais mais resistentes à formação de microfissuras, é provável a ocorrência de "pitting", que corresponde à formação de pequenas crateras de baixa profundidade com o aspecto de picadas. Estas microcrateras também podem apresentar dimensões muito reduzidas, praticamente indistintas a olho nú, conferindo um aspecto baço às superfícies, caso designado por "micropitting.

Quando os binários transmitidos pelas engrenagens são muito elevados os valores das tensões de flexão na base dos dentes podem tornar-se críticos. Nestes casos podem ocorrer sérias deformações plásticas dos dentes ou mesmo a sua ruptura. No conjunto dos ensaios realizados ocorreram três fracturas de dentes.

7.2.2 Número de ciclos

7.2.2.1 *Ensaios a 1.4 GPa*

Em termos do número de ciclos realizado por cada engrenagem, até que uma avaria tenha impedido o seu funcionamento, destacam-se os testes das engrenagens 260D e 300D, em que nenhum dente foi particularmente afectado por defeitos graves de superfície. Nestes dois casos o fenómeno de desgaste preponderante foi o pitting, não se tendo registado a formação de nenhuma escama. Estes testes foram interrompidos quando as vibrações em funcionamento se tornaram demasiado fortes, o que não significa que as superfícies já se encontrassem definitivamente avariadas. Em termos do número de ciclos realizado, o material 260D obteve um resultado bastante superior aos restantes.

Os materiais 340D, 300 e 340 demonstraram desempenhos bastante mais modestos, e o modo de avaria foi sempre a formação de escamas superficiais de fadiga. Apesar de, em termos de número de ciclos, se terem classificado de forma decrescente pela ordem indicada, o número de dentes avariados foi muito maior no caso do material 340D que no caso do material 300, enquanto a variante 340 viu apenas um dente afectado por uma grande escama de superfície.

Uma nota para o material 260, único em que ocorreu uma fractura de um dente à

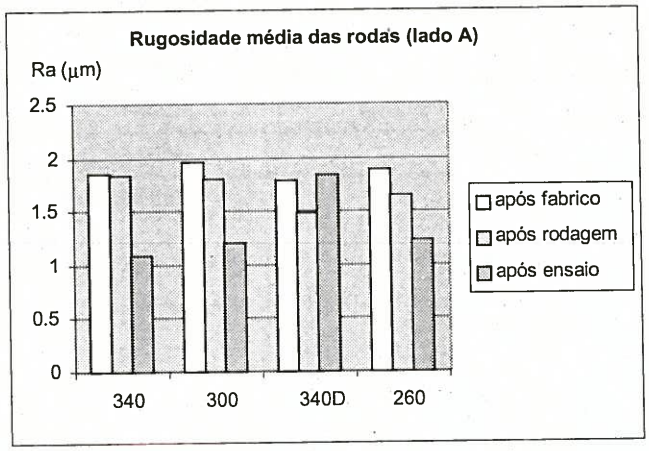


Fig 4 — Valores médios da rugosidade média Ra das rodas das engrenagens.

pressão de 1.4 GPa, facto que pode revelar uma resistência à flexão demasiado baixa para o tipo de aplicação que são as engrenagens de transmissão de potência.

7.2.2.2 *Ensaios a 1.8 GPa*

O material 260D voltou a obter o melhor resultado, em termos do número de ciclos realizado, apesar de este teste ter terminado com a fractura de um dente. No final do teste as superfícies de trabalho dos dentes desta engrenagem encontravam-se ainda em bom estado. O material 260 teve um desempenho idêntico ao da variante 260D. Em qualquer destes casos a insuficiente resistência à flexão na base dos dentes foi determinante para a avaria, o que pode ser um factor limitativo do desmpenho destes materiais em determinadas aplicações. A resistência à fadiga de contacto foi, no entanto, a melhor entre todos os materiais ensaiados.

Os piores desempenhos foram os dos materiais 340 e 300D, no primeiro caso pelo reduzido número de ciclos até a avaria das superfícies, e, no segundo, pelo elevado número de dentes afectados por escamas de fadiga.

Apesar de possuírem uma resistência à fadiga de contacto nitidamente inferior que a das variantes 260, os materiais 300 e 340D revelaram um compromisso razoável entre as suas propriedades de resistência à fadiga de contacto e de resistência à flexão na base dos dentes. Os resultados obtidos nos testes a 1.8 GPa foram muito semelhantes nestes dois casos.

7.2.3 Rugosidade superficial

A evolução da rugosidade das superfícies é um parâmetro importante e que está intimamente ligado com as propriedades mecânicas do material.

Durante a fase de rodagem a rugosidade média das superfícies sofreu uma atenuação que foi, de forma geral, proporcional à ductilidade dos ADIs em estudo. Durante os ensaios, e até que os primeiros danos afectassem as superfícies, a rugosidade média também baixou, mantendo a mesma tendência. A Figura 4 mostra um conjunto de valores médios medidos nas superfícies dos dentes das rodas que foram ensaiadas.

Como os tempos de ensaio foram diferentes para cada engrenagem e como as superfícies se começam a deteriorar bastante a partir de certa altura, é importante que se perceba que os valores de rugosidade medidos no final dos testes não possam ser directamente comparados entre si. No caso do material 340D, por exemplo, a rugosidade medida no final dos teste era superior à própria rugosidade resultante do fabrico das superfícies, como se pode ver na Figura 4. Na rodagem verificaram-se atenuações de rugosidade até cerca de 25% e durante os ensaios atingiram-se máximos de atenuação da ordem dos 45% da rugosidade pós-fabrico.

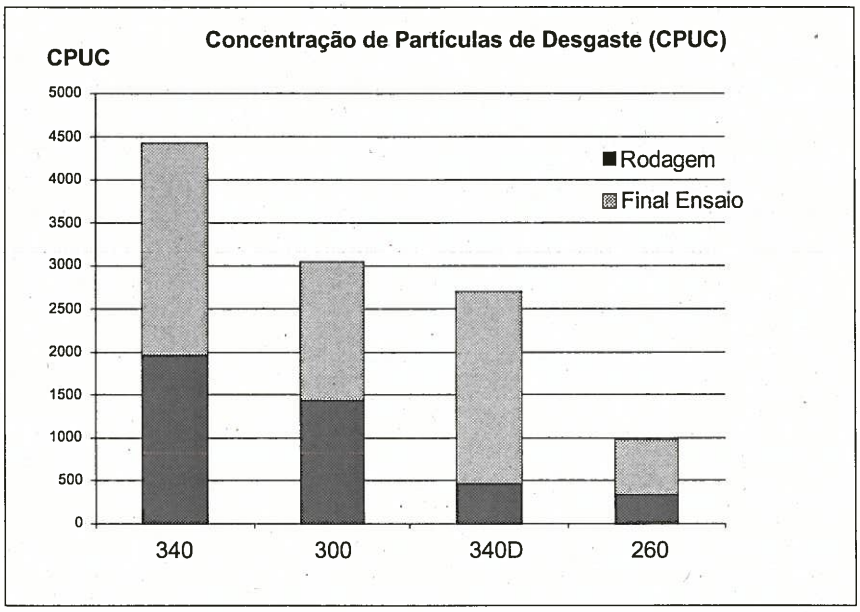


Fig 5 — Concentração de partículas de desgaste encontradas nos lubrificantes dos testes efectuados a 1.4 GPa.

7.2.4 Análise dos lubrificantes

No final de cada ensaio foram recolhidas amostras de lubrificante, o que permitiu contabilizar o número de partículas metálicas libertadas pelas as superfícies. A Figura 5 mostra valores da concentração dessas partículas resultantes dos testes a 1.4 GPa para alguns dos ADIs ensaiados.

A Figura 5 mostra claramente como os materiais mais dúcteis tendem a libertar mais partículas de desgaste, facto que ocorreu de forma sistemática quer na rodagem quer durante os testes propriamente ditos. Deve também ter-se em atenção o facto de estas medições estarem fortemente afectadas pelas avarias que ocorreram em cada caso, uma vez que essas avarias são promotoras da libertação de partículas metálicas para o lubrificante.

7.2.5 Inspecção das superfícies

As superfícies dos dentes das engrenagens foram examinadas através de um vídeo-microscópio durante os ensaios. No final dos testes foram cortados alguns dentes das engrenagens com os quais se fabricaram amostras para serem observadas através do microscópio.

A análise das superfícies revelou diversos fenómenos interessantes, nomeadamente sobre a geometria e dimensões das escamas libertadas, bem como permitiu estimar o grau relativo de desgaste entre as superfícies das diferentes variantes de ADI estudadas.

A título de exemplo são apresentadas neste trabalho algumas imagens representativas de algumas das avarias mais significantes que ocorreram nestas superfícies. As imagens dos flancos activos dos dentes, apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9, foram obtidas a partir do topo de cada dente, pelo que a direcção de rolamento é sempre de cima para baixo relativamente às figuras.

A escala representada em todas as imagens mede sempre 1mm.

Na Figura 6 mostra-se a superfície de fractura de um dente da roda da engrenagem 260, avaria que ocorreu no teste realizado a 1.4 GPa.

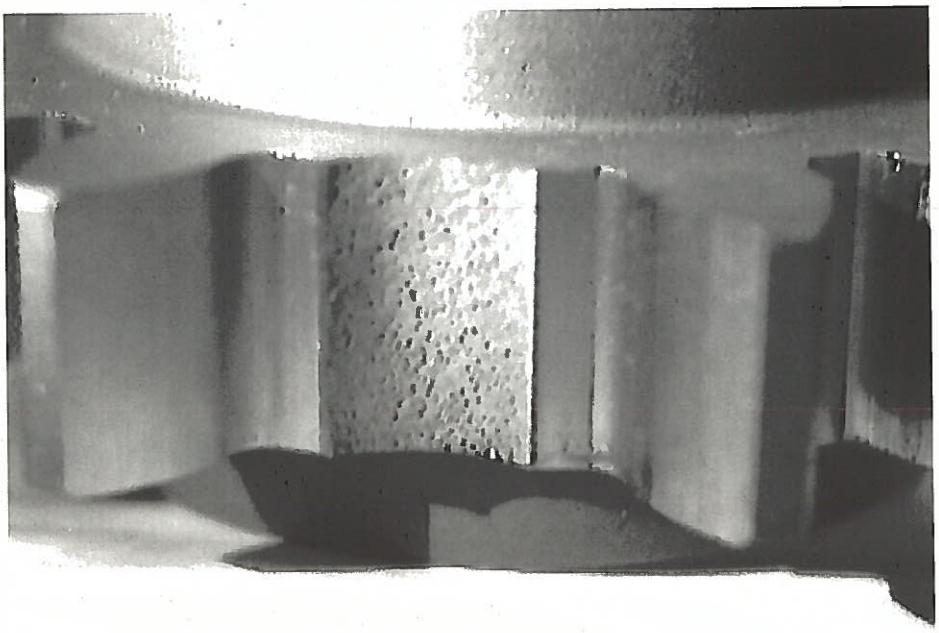


Fig 6 – Superfície de fractura de um dente no pinhão 260.

Fig 7 – Escamas a toda a largura de um dente do pinhão 300D.

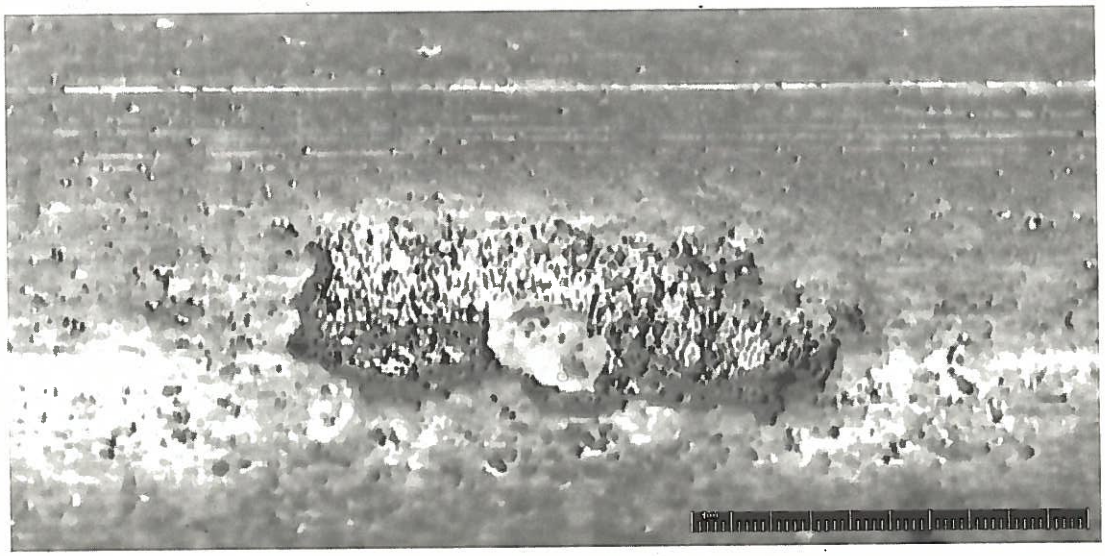


Fig 8 – Pequena escama num dente do pinhão da engrenagem 340D.

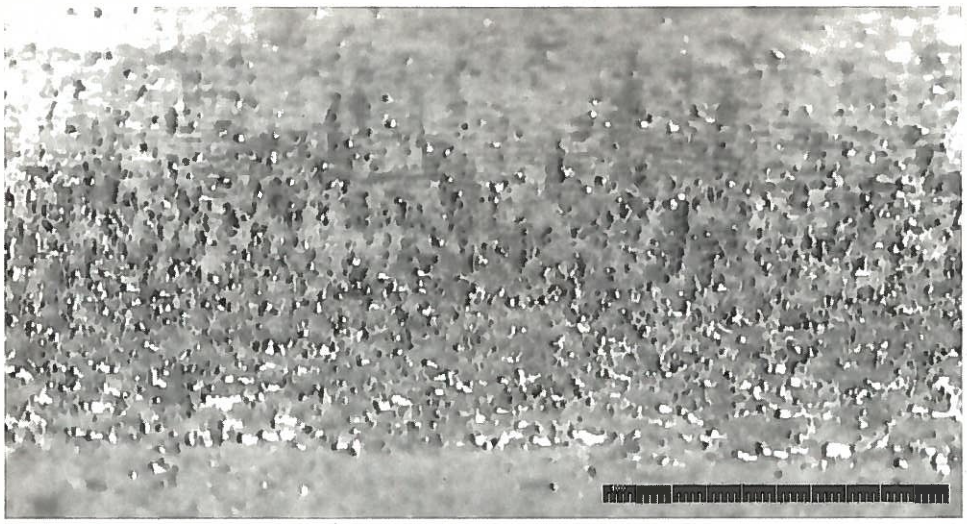


Fig 9 – Pitting num dente da roda 260D.

8. CONCLUSÕES

Em termos de resistência à fadiga de contacto, e para os ensaios realizados no estágio 10 FZG (1.8 GPa), o melhor desempenho foi o da engrenagem austemperada a 190+260ºC (260D), já que esta superou o tempo de ensaio das restantes sem que nenhum defeito severo de superfície afectasse qualquer dente da roda ou do pinhão.

No entanto, a fractura de um dente do pinhão veio revelar uma deficiente capacidade deste material para suportar esforços de flexão elevados. Este facto veio a ser confirmado com a ruptura bastante precoce de um dente da roda no ensaio 260 a 1.4 GPa. No teste 260 a 1.8 GPa foi detectado um aglomerado anormal de nódulos de grafite no bordo traccionado da superfície de fractura do dente partido, que poderá ter contribuído para o sucedido; já a superfície de fractura resultante do teste 260 a 1.4 GPa não apresentava defeitos significativos. O tempo muito curto deste ensaio e o aspecto dos flancos activos dos dentes no fim do teste leva a pensar que, para além das características do material, possa também estar na origem destas fracturas uma geometria de engrenamento de baixa qualidade.

O pior desempenho foi o do material austemperado a 340ºC, que mostrou uma fraca resistência à fadiga de contacto quer pelo curto tempo que resistiu à avaria (a alta e a baixa pressão) quer ainda pela grande severidade das escamas que afectaram os dentes da engrenagem no ensaio a alta pressão.

Entre os tratamentos 300 e 340D os desempenhos são semelhantes, sobretudo nos testes a alta pressão. Se, por um lado, a variante 340D resistiu a um maior número de ciclos até a avaria no ensaio de baixa pressão, por outro lado o número de dentes afectados por fadiga de superfície e a dimensão dos defeitos foi bastante maior que no caso 300, o que impede uma distinção segura entre o desempenho destas duas variantes.

O material 300D poderia ser um compromisso interessante sobretudo tendo em conta o resultado conseguido no teste a 1.4 GPa.

A análise destes resultados aponta para relações próximas entre a resistência à fadiga de contacto e algumas das principais propriedades mecânicas dos materiais ensaiados, nomeadamente a resistência à tracção, a dureza e o alongamento à ruptura. De uma forma simplista, os materiais mais resistentes e duros tendem a resistir melhor ao desgaste superficial. Neste caso concreto os materiais 260 e 260D, de elevada resistência mecânica e dureza, apresentaram elevada resistência superficial mas sofreram

diversas fracturas de dentes, consequência da sua baixa ductilidade.

Estes resultados mostram também de forma clara que as variantes de ADI testadas apresentam uma resistência à fadiga de contacto que é extremamente dependente do valor da pressão de Hertz aplicada. As pressões impostas nestes testes aproximam-se severamente do limite da resistência destas superfícies, e a passagem de 1.4 para 1.8 GPa mostrou ser decisiva no decréscimo brusco de desempenho dos materiais, sobretudo os que foram austemperados a temperaturas mais elevadas. A realização de tratamentos duplos com fase de arrefecimento intermédio mostrou beneficiar a resistência à fadiga de contacto na grande maioria dos testes efectuados.

Em termos de conclusão geral pode afirmar-se que a resistência superficial aumenta significativamente com a dureza e a resistência mecânica do ADI, o que leva a favorecer os tratamentos de austêmpera na gama das temperaturas mais baixas (neste caso 260ºC, tratamento que produz uma matriz repleta de finas partículas aciculares de ferrite – ausferrite inferior). No entanto, este aumento de resistência é acompanhado de uma grande perda de ductilidade, o que fragiliza os materiais e os torna susceptíveis a outro tipo de avarias (no caso das engrenagens diminui sensivelmente a resistência à flexão, o que dá origem à possibilidade de surgimento de fendas na base dos dentes ou mesmo de fracturas graves). Assim entende-se que, para aplicações específicas como as engrenagens, seja necessário optar por um compromisso de propriedades em vez de se maximizar apenas a resistência superficial.

BIBLIOGRAFIA

R. Harding, *"The use of austempered ductile iron for gears"*, 2nd world gear congress, Paris, 1986.

H. Santos, A. Pinto, V. Torres, *"Cu-Mn ADI: A low cost high performance material"*, 58th world foundry congress, Polónia, 1991.

A. Duarte, *"Influência dos Tratamentos Térmicos Específicos de um ADI Sobre o Seu Comportamento à Fadiga de Contacto"*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, FEUP, 2000.

L. Magalhães, J. Seabra, *" Wear and scuffing of austempered ductile iron gears"*, WEAR 215 (237-246), 1997.