

ENSAIOS de GRIPAGEM de ENGRENAGENS ADI

Luís Magalhães*; J. Seabra**

*CETRIB-INEGI

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto- Portugal

**Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto-Portugal



RESUMO

O conhecimento do comportamento do Ferro Nodular Austemperado (ADI) como material empregue no fabrico de engrenagens é complementado, neste trabalho, com a realização de ensaios de gripagem em banco de ensaios FZG com engrenagens produzidas nesse material. O estudo das condições de contacto impostas ao longo dos ensaios é caracterizado por recurso a uma análise teórica baseada na teoria Elastohidrodinâmica e complementado por um conjunto de análises experimentais, incluindo técnicas de análise de superfície (rugosimetria, observação em microscópio electrónico de varrimento, etc.) e de análise metalúrgica (espectroscopia, ferrografia), entre outras. O desempenho das engrenagens ensaiadas é comparado com o de engrenagens fabricadas em aço cementado quando submetidas a testes realizados em condições idênticas.

1 INTRODUÇÃO

O ADI (Austempered Ductile Iron) é um material de utilização ainda pouco frequente ao nível da maior parte das empresas metalomecânicas. Se este facto se deve principalmente à insegurança que muitos projectistas ainda revelam sobre a prescrição do seu uso, não se pode ignorar que, na base dessa insegurança, está a pouca divulgação que os principais produtores mundiais de ADI fizeram, até hoje, sobre as prestações deste material. Apesar disso, sabe-se que o ADI tem vindo a ser utilizado com regularidade, desde meados dos anos setenta, em componentes produzidos por algumas das maiores empresas da indústria automóvel em todo o

mundo (General Motors, BMW, Renault, FIAT, etc.).

O conhecimento da constituição de cada ADI, bem como dos parâmetros do seu processo de produção (elementos fundamentais para a caracterização de cada variante deste material) têm sido, em muitos casos, mantidos sob reserva, alegadamente por questões de segredo comercial das principais empresas que o produzem e utilizam. Além disso, sabe-se também que foram realizados testes exaustivos com componentes fabricados em ADI, nomeadamente com engrenagens, mas os resultados respectivos só raramente foram publicados [1].

É possível encontrar várias publicações relativas a este material, sendo a maior parte delas de cariz académico, onde se podem consultar resultados de muitos ensaios específicos com ADI. No entanto, estes são, na sua maioria, obtidos através da utilização de provetes e não com componentes reais solicitados de forma idêntica à da sua utilização quotidiana. Desta forma, e se ao nível das propriedades mecânicas (e outras) já é possível estabelecer uma gama de características associada às variantes mais correntes de ADI, ainda há um grande caminho a percorrer até que se consiga uma caracterização segura do desempenho do ADI em determinadas aplicações específicas, como são, por exemplo, as engrenagens

Esta situação foi o fundamento da realização de um trabalho teórico-prático sobre o desempenho de engrenagens ADI em condições promotoras de severo desgaste superficial e de gripagem. Para isso foram produzidas duas engrenagens, fabricadas em variantes distintas de ADI, que foram submetidas a ensaios de gripagem no banco de ensaios FZG do CETRIB-INEGI. O objectivo foi o de complementar o conhecimento do comportamento deste tipo de material quando usado em engrenagens.

São apresentados, em seguida, os principais procedimentos e resultados obtidos a partir destes ensaios.

2 ADI

2.1 Produção

O ADI é um material que se produz a partir de um ferro fundido contendo grafite esferoidal (vulgarmente designado por *ferro nodular* ou *ferro fundido nodular* e, em inglês, SGI - *spheroidal graphite iron*). Após a produção de um dado componente em ferro nodular, este é sujeito a um tratamento térmico - a Austêmpera - que impõe uma transformação estrutural ao material de

base dando origem ao ADI. Só em casos particulares é que o tratamento de austêmpera antecede a fabricação do componente, dado que o ADI é um material de maquinagem muito difícil.

2.2 Austêmpera

O tratamento de Austêmpera inclui duas fases principais (ver figura 1): numa primeira etapa o material é aquecido até temperaturas suficientemente altas (cerca de 900°C) para que a sua estrutura se transforme totalmente em Austenite; numa segunda fase, e após um arrefecimento brusco, o material é mantido a uma temperatura relativamente baixa (da ordem dos 300 °C) durante um determinado espaço de tempo. Durante este período a estrutura austenítica do material vai sendo progressivamente transformada em ferrite e, eventualmente, em carbonetos. No final desta etapa, um ADI ideal é constituído apenas por ferrite (disposta de modo idêntico ao da ferrite bainítica - aglomerados muito compactos de agulhas) e de austenite estabilizada (austenite enriquecida em carbono). Tempos muito curtos de tratamento podem dar origem à presença de martensite, e tempos demasiado longos causam a precipitação de carbonetos no seio da austenite: são duas situações que fragilizam notavelmente o material e que são, normalmente, evitadas.

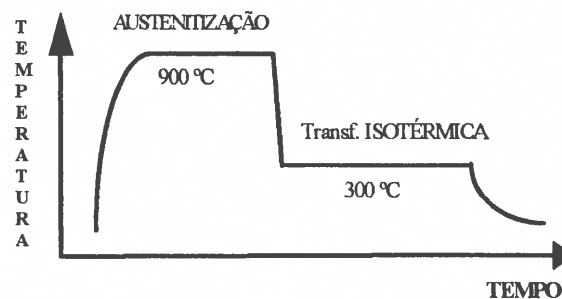


Figura 1 - Ciclo térmico típico de um tratamento de austêmpera [2]

Os parâmetros adoptados durante este tratamento, em conjunto com as

características do próprio material de base (qualidade, tipo de estrutura e de elementos de liga presentes), conduzem à obtenção de ADIs com características bastante diferentes entre si. Neste sentido, é importante notar que quaisquer propriedades e valores associados a características de ADI são sempre referentes a uma variedade específica, nunca podendo ser observados com um carácter geral para qualquer outra variante deste material. Neste sentido, muitos autores apontam o ADI não como *um* material mas sim como uma *família* de materiais.

2.3 Características mecânicas

Tipicamente, um ADI pode apresentar uma resistência mecânica elevada (ao nível dos aços ligados de alta resistência, podendo atingir valores da ordem dos 1600 MPa de tensão de rotura) [3], e uma óptima resistência ao desgaste superficial (conseguem-se, em determinadas condições de funcionamento de engrenagens, taxas de desgaste 50% mais baixas que as registadas com engrenagens fabricadas em aço cementado)[4]. O ADI é um material relativamente dúctil, cujo alongamento à rotura pode atingir valores da ordem dos 12% e, apesar da sua dureza pós-produção não ser muito elevada, constata-se um endurecimento superficial notável em componentes que, em funcionamento, estão sujeitos a contactos com transferência de carga, chegando a dureza a atingir valores locais de cerca de 900 HV1 [5]. Este endurecimento está associado a um fenómeno estrutural em que se verifica uma transformação da austenite estabilizada em martensite nas zonas em que esta é solicitada mecanicamente.

2.4 Outras propriedades

O ADI é motivo de interesse sobretudo pela sua grande resistência ao desgaste superficial. No entanto, este tipo

de material possui outras características importantes, como sejam o seu baixo peso específico ou a sua grande capacidade de amortecimento de vibrações, que permitem produzir engrenagens mais leves e silenciosas que as engrenagens convencionais em aço. Além disso, em todos os passos do processo produtivo quer dos componentes quer do material em si, conseguem-se reduções significativas dos custos quando comparados com os resultantes da produção dos mesmos componentes em aço.

Este aspecto é particularmente importante no caso das engrenagens, sobretudo porque:

- o ferro nodular é mais barato que o aço ligado de alta resistência;
- o tratamento de austêmpera é mais barato que o de cementação ou nitruração;
- a maquinaria do ferro nodular é mais fácil e barata que a do aço;
- o ferro nodular pode ser vazado, permitindo o fabrico de peças por moldação;

3 ENSAIOS

3.1 Ensaios de gripagem

Os ensaios de gripagem realizados seguiram a normalização DIN 51354 [6], de acordo com o procedimento do ensaio FZG A/8.3/90 [6]. Este ensaio destina-se a testar a capacidade protectora de um determinado óleo lubrificante, sendo sempre realizado recorrendo a uma engrenagem-padrão fabricada em aço 20 MnCr5 cementado [7]. Neste caso particular, e como o objectivo não é testar o óleo mas sim a engrenagem, o procedimento foi “invertido”, isto é, os ensaios foram realizados com engrenagens ADI distintas utilizando sempre o mesmo tipo de óleo lubrificante. Este processo permite, por comparação com outros ensaios realizados com o mesmo tipo de lubrificante, determinar a resistência ao desgaste e à gripagem de cada uma das engrenagens (este tipo de ensaio é sempre comparativo).

projector de perfis (com uma ampliação de 15 vezes). As pequenas diferenças encontradas (relativamente aos perfis teóricos) não eram significativas.

Para mais tarde poder determinar o tipo de evolução do estado das superfícies ao longo dos ensaios, alguns dentes dos pinhões e das rodas foram analisados por rugosimetria. Isto permitiu caracterizar as superfícies no seu estado oriundo de maquinagem (no final dos ensaios esta análise foi repetida, caracterizando as superfícies à posteriori). O valor da rugosidade inicial média encontrado foi de cerca de 2 μm (Ra), em ambos os casos, o que denuncia um acabamento pouco “fino” (uma engrenagem-padrão FZG apresenta valores da ordem dos 0.5 μm Ra). As estrias de maquinagem eram constituídos por sulcos da ferramenta de rectificação dispostos transversalmente em relação ao sentido do escorregamento entre dentes quando em funcionamento.

3.5 Caracterização do material

O ferro nodular utilizado para a produção das engrenagens foi ligado com 1% de cobre e 0.5% de manganês. O tratamento de austêmpera foi efectuado de modo diferente para cada engrenagem,

tendo uma sido tratada isotermicamente a 280°C e a outra a 360°C [2].

Foram feitas medições de dureza que mostraram que o ADI tratado a 280°C, de acordo com as expectativas teóricas, é um material mais duro que o tratado a 360°C (40 HRC contra 30 HRC deste último).

A produção de amostras a partir de dentes dos pinhões ensaiados permitiu a observação das estruturas de ambas as variantes ao microscópio. O uso do microscópio electrónico de varrimento possibilitou a verificação do tipo de ferrite presente em cada variante. O ADI tratado a 280°C possuía uma estrutura composta por ferrite bainítica do tipo inferior, e o outro por ferrite bainítica do tipo superior (em qualquer dos casos não foi observada a presença de carbonetos ou outras fases estranhas).

A constituição destes dois tipos de ferrite é sensivelmente diferente, sendo a ferrite bainítica inferior uma estrutura mais compacta e tenaz, enquanto a ferrite bainítica superior, contendo um maior teor de austenite estabilizada, confere ao material maior ductilidade.

A grafite presente no material produzido apresentava uma distribuição bastante uniforme, sendo a sua quantidade

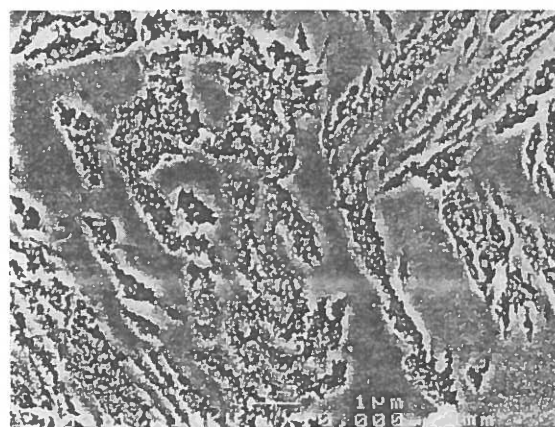
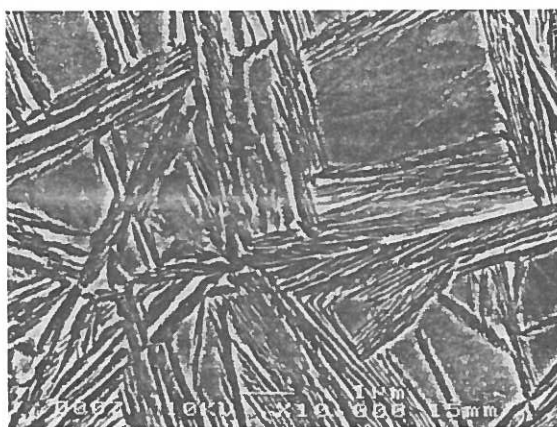


Figura 3 - Aspecto de microestruturas de ADIs : [2]
à esquerda, contendo ferrite bainítica inferior;
à direita, contendo ferrite bainítica superior;

e tamanho normais para o tipo de ferro nodular utilizado.

Como complemento desta análise, observações realizadas através do microscópio óptico permitiram caracterizar o tipo de desgaste encontrado nas superfícies de trabalho dos dentes, bem como detalhes que contribuíram para o estudo do comportamento destas engrenagens durante os ensaios.

3.6 Caracterização das engrenagens

Para que o ensaio normalizado de lubrificantes A/8.3/90 seja válido, permitindo a comparação directa dos resultados obtidos com outros realizados segundo os mesmos procedimentos, as características da engrenagem padrão têm que cumprir especificações normalizadas (engrenagem FZG tipo A) [7], conforme a Tabela 1.

TABELA 1 - Características de uma engrenagem FZG tipo A [7]

Entreixo	91.5	mm
Largura do dentado	20	mm
Diâmetro primitivo do pinhão	73.2	mm
Diâmetro primitivo da roda	112.5	mm
Módulo	4.5	mm
Número de dentes do pinhão	16	
Número de dentes da roda	24	
Correcção de geração do pinhão	0.8532	
Correcção de geração da roda	-0.5	
Ângulo de pressão	20	graus
Ângulo de pressão efectivo	22.5	graus

As engrenagens ADI ensaiadas cumpriam todas as especificações geométricas normalizadas excepto no tocante à largura do dentado. Em vez dos 20 mm normalizados, estas engrenagens foram produzidas com uma largura de dentado de 16 mm. Esta opção visou garantir que os níveis de pressão superficial desenvolvidos perante as solicitações dos ensaios fossem os mesmos para estas engrenagens e para engrenagens de aço

cementado: como o ADI tem um módulo de Young inferior ao do aço, a área de contacto gerada perante uma mesma carga é maior neste material, conduzindo a menores pressões de contacto. Como o objectivo foi estudar o comportamento das superfícies, optamos por equalizar as pressões no contacto, garantido condições locais, ao nível do contacto, semelhantes às verificadas em engrenagens de aço ao longo do ensaio FZG.

3.7 Lubrificante

Em todos os ensaios foi utilizado o mesmo tipo de óleo lubrificante: uma variedade parafínica de óleo base (ISO VG68 [8]) sem aditivos.

Apesar de se saber que este tipo de óleo não garante a integridade das superfícies dos dentes das engrenagens-padrão FZG em aço ao longo de muitos estágios do ensaio de gripagem, esta opção permite evitar a introdução de novos parâmetros na análise das situações de contacto geradas nestes ensaios. De facto, é difícil estimar a contribuição e a influência dos mecanismos de actuação da maior parte dos aditivos de extrema pressão no desempenho das superfícies dos dentes das engrenagens, podendo os resultados obtidos ser demasiado dependentes da sua presença e, assim, "mascarar" a capacidade de resistência ao desgaste das próprias superfícies.

O lubrificante não é renovado nem são adicionadas quaisquer quantidades suplementares desde o primeiro até ao último estágio de funcionamento da engrenagem durante cada ensaio FZG. No final de cada estágio de cada um dos ensaios, é recolhida uma amostra do lubrificante destinada a análise posterior por técnicas de ferrometria e ferrografia.

4 RESULTADOS

4.1 Resumo

Tendo sido produzidas duas engrenagens (a primeira austemperada a 280 °C e a segunda a 360°C), foram planeados quatro ensaios. No entanto, como se verificou uma fractura de um dente da engrenagem austemperada a 360°C durante o seu primeiro ensaio, apenas foi possível concretizar três dos quatro testes inicialmente previstos.

A Tabela 2 apresenta as condições de controle da temperatura do lubrificante e do número de estágios que as engrenagens realizaram até à gripagem para cada um dos ensaios efectuados.

Para efeitos de comparação, a Tabela 3 apresenta resultados de dois ensaios realizados nas mesmas condições (com as mesmas solicitações e com o mesmo tipo de óleo lubrificante) com engrenagens-padrão FZG (tipo A, em aço 20MnCr5 cementado).

A capacidade de resistência das superfícies ADI nas condições dos ensaios efectuados (solicitações severas, atingindo quase 2GPa de pressão de contacto, estando as superfícies protegidas por um lubrificante sem aditivos e de baixa viscosidade) foi nitidamente superior à das engrenagens de aço ensaiadas em condições semelhantes.

4.2 Parâmetros

No final de cada estágio destes ensaios foi recolhida uma amostra do óleo lubrificante para análise por ferrometria e registada a sua temperatura. Os gráficos presentes nas figuras 4 e 5 mostram a evolução desses parâmetros, para cada caso, ao longo dos ensaios respectivos.

TABELA 2 - Parâmetros dos ensaios realizados com engrenagens em ADI

ENGRENAGEM	TRATAMENTO	TEMPERATURA	ESTÁGIO FINAL
ADI 280 face A	280°C / 1h	livre	11 (GRIPAGEM)
ADI 280 face B	280°C / 1h	150°C	11 (GRIPAGEM)
ADI 360 face A	360°C / 1h	livre	12 (FRACTURA)

TABELA 3 - Parâmetros de ensaios realizados com engrenagens em aço.

ENGRENAGEM	TRATAMENTO	TEMPERATURA	ESTÁGIO FINAL
AÇO 20MnCr5	cementado	livre	4 (GRIPAGEM)
AÇO 20MnCr5	cementado	100°C	6 (GRIPAGEM)

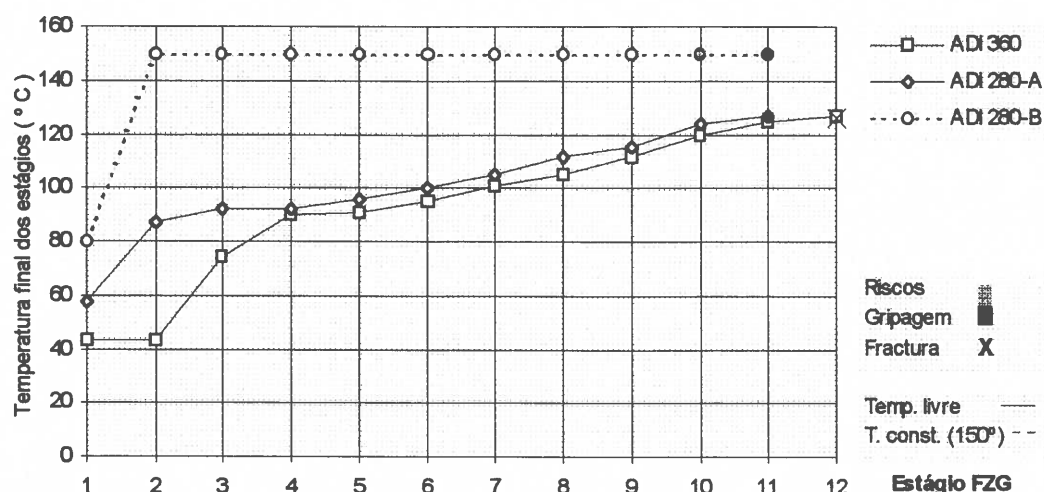


Figura 4 - Evolução da temperatura do lubrificante ao longo dos ensaios [2].

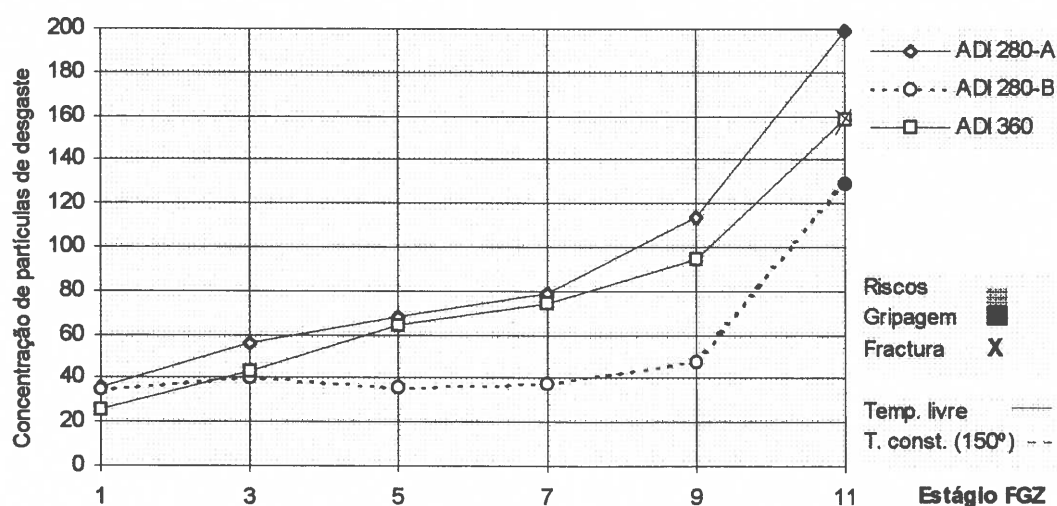


Figura 5 - Evolução do número de partículas de desgaste presentes no lubrificante ao longo dos ensaios [2].

A observação destes gráficos permite estabelecer algumas conclusões, nomeadamente:

- a resposta, em termos de temperatura e de taxa de desgaste, é mais próxima nos ensaios realizados a temperatura livre com as diferentes variantes de ADI do que para o mesmo ADI quando ensaiado ou em condições de temperatura livre ou constante (150°C);

- nos ensaios a temperatura livre, o ADI 360 apresentou uma melhor resistência ao desgaste,

não chegando a atingir a gripagem das superfícies dos seus dentes até ao estágio 12 (altura em que um dos dentes da roda fracturou, obrigando a terminar o ensaio);

- no ensaio a temperatura constante, as condições de funcionamento da engrenagem tratada a 280°C foram mais favoráveis do que no ensaio a temperatura livre, o que se deduz pelo baixo aumento do número de partículas metálicas libertadas para o óleo ao longo do ensaio.

A alta temperatura do lubrificante terá sido, neste caso, responsável por uma rotação mais eficaz, proporcionando superfícies de trabalho mais uniformes, e permitindo uma baixa taxa de desgaste ao longo dos estágios seguintes. No entanto, e como se pode ver pelos valores apresentados, os primeiros riscos de adesão surgiram logo no estágio 10, e a gripagem ocorreu de forma generalizada no estágio 11, acompanhada de um aumento súbito do número de partículas libertadas para o óleo.

4.3 Análise teórica

Através de expressões de cálculo baseadas em pressupostos da teoria EHD foram calculados alguns parâmetros tribológicos que permitem uma melhor caracterização das condições de funcionamento destas engrenagens. São apresentados valores da *Espessura específica (mínima) de filme lubrificante* (figura 6) e da *Temperatura máxima no contacto* (figura 7).

Os valores da espessura específica de filme lubrificante apresentados foram calculados a partir dos valores da espessura mínima de filme (corrigida termicamente) e dos valores de rugosidade média (R_a) das

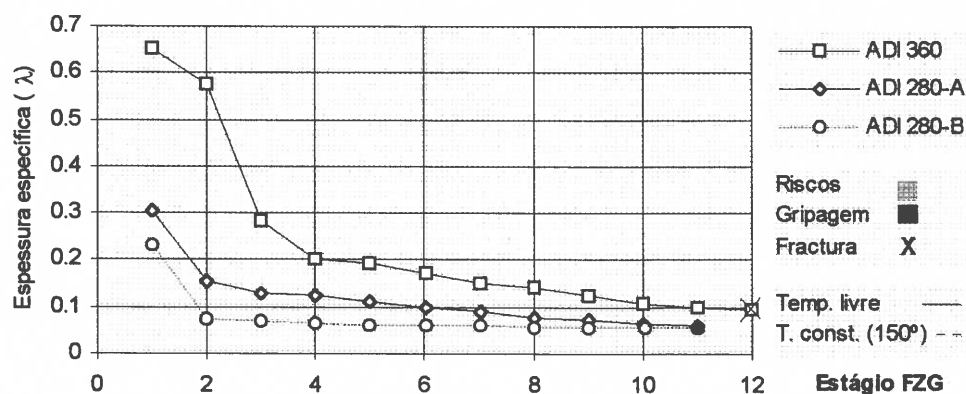


Figura 6 - Espessura específica de filme (λ) calculada ao longo dos ensaios [2].

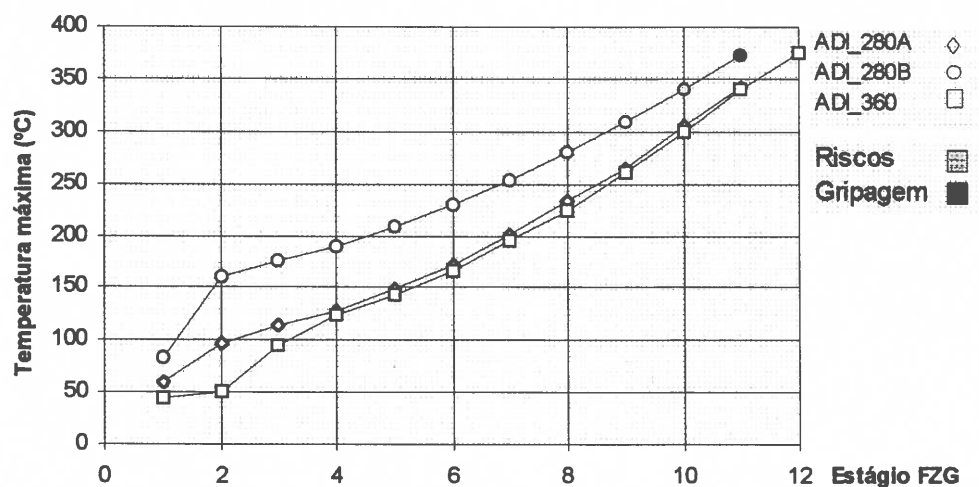


Figura 7 - Temperatura máxima no contacto calculada ao longo dos ensaios [2].

engrenagens, medidos em alguns dentes dos pinhões no final dos ensaios. Em termos teóricos, estes valores apontam para um regime de lubrificação muito próximo do limite, isto é, a protecção conferida às superfícies pelo óleo lubrificante foi diminuta, sobretudo no caso da engrenagem tratada a 280°C. Por outras palavras, a relação entre a altura das rugosidades das superfícies e a espessura de filme lubrificante mostra que ocorreram interações de uma forma generalizada entre as superfícies dos dentes em contacto, situação que promove a ocorrência de processos de adesão intermetálica e, portanto, a gripagem.

Se se pode verificar que, nestas condições, a gripagem de engrenagens em aço é praticamente imediata, resta justificar o desempenho evidenciado por estas engrenagens como sendo fruto de características inerentes ao próprio material. Neste aspecto, o papel da grafite presente no ADI assume, certamente, uma influência preponderante.

Os valores apresentados da *temperatura máxima* são uma estimativa do valor máximo da temperatura desenvolvido no seio do contacto. Estes valores representam a soma do valor da temperatura medida do lubrificante, no final de cada estágio, com o valor máximo calculado da *temperatura flash*. Trata-se de um conjunto de valores um pouco conservador (a estimativa da temperatura que atingem as superfícies dos dentes, quando a engrenagem trabalha em banho de óleo, contabiliza apenas 0.47 da *temperatura flash*), mas que permite, em termos de critérios de gripagem, verificar que os primeiros sintomas de adesão ocorrem, nas engrenagens ensaiadas, para temperaturas locais máximas sempre superiores a 300°C, isto para o ADI tratado a 280°C.

Para a determinação da *temperatura flash* máxima (e de alguns outros parâmetros) são analisadas sucessivas posições sobre linha teórica de engrenamento da engrenagem em teste, o

que significa que é simulado o contacto que ocorre, em cada ponto, ao longo de todo o flanco activo de um dado dente dessa engrenagem. Os valores máximos ou mínimos detectados (como, por exemplo, a máxima *temperatura flash* ou à mínima *espessura de filme*) nem sempre ocorrem sobre a mesma posição do flanco em análise. Em qualquer caso, são sempre considerados as situações em que ocorrem os valores extremos da variável em questão.

4.4 Análise das superfícies

4.4.1 Rugosimetria

A medição da rugosidade da superfície dos dentes antes e após os ensaios de gripagem permitiu comparar a evolução sofrida por essas superfícies ao longo dos ensaios (obviamente, os dentes medidos à posteriori não continham riscos de adesão).

Alguns dos valores obtidos são apresentados na Tabela 4. A observação destes valores permite constatar que:

- a rugosidade inicial foi substancialmente atenuada nas superfícies das três engrenagens, com particular relevo na tratada a 360°C (material mais macio). O valores da rugosidade média (R_a) passaram de cerca de 2 μm para 0.4 μm nesta engrenagem;

- a engrenagem ADI 280, quando ensaiada a temperatura livre, mostrou ser aquela em que as superfícies foram menos alteradas, sobretudo ao nível das rugosidades mais pronunciadas (R_t e R_{max} diminuíram cerca de 30%, enquanto a rugosidade média desta engrenagem baixou entre 60 a 70%). Esta evolução está de acordo com a maior dureza desta variante de ADI.

TABELA 4 - Valores medidos de alguns parâmetros de rugosidade [2].

	Pinhão 280/A		Pinhão 280/B		Pinhão 360/A	
	antes	após	antes	após	antes	após
Rt	16.81	11.13	16.64	6.26	16.43	4.28
Rmax	16.00	11.13	15.99	5.80	15.14	4.16
Rz-D	12.07	5.30	11.17	4.55	12.15	2.72
Ra	2.26	0.86	2.27	0.74	2.24	0.40
Rq	2.89	1.23	2.82	0.95	2.85	0.53
Mr1	7.30	10.00	8.87	9.05	9.00	9.30
Rpk	2.02	0.97	1.99	0.74	1.79	0.32
Rk	6.26	1.69	7.09	1.99	5.96	1.03
Rvk	3.97	2.61	3.36	1.26	3.89	0.78
Mr2	84.33	85.15	88.43	84.05	83.55	84.35

4.4.2 Análise microscópica

Considerando o aspecto microscópico das superfícies (após observação através do microscópio electrónico de varrimento) em conjunto com os valores da rugosimetria, percebe-se que a alteração profunda que as superfícies sofreram proporcionou, ao longo dos ensaios, uma superfície cada vez mais plana e uniforme dos dentes das engrenagens, que, em muitas das zonas observadas, era formada por um filme de material de constituição incaracterística. De facto, uma alteração tão grande do perfil das superfícies conjugada com uma taxa de desgaste relativamente baixa (o número de partículas metálicas encontradas no óleo retirado destes ensaios foi sempre inferior ao dos ensaios de engrenagens em aço) dá a entender que o material que inicialmente se encontrava nos “picos” das rugosidades terá sido progressivamente reintegrado sobre as próprias superfícies. Este fenómeno pode ter acontecido por simples deformação plástica destes “picos” mas, certamente, muitas das partículas de desgaste formadas terão sido acomodadas no filme superficial referido anteriormente. Este filme, segundo a análise espectrográfica revelou, é constituído por uma profusão de elementos, oriundos quer do lubrificante

quer do próprio material, onde a presença de grafite é uma constante. Também a cor progressivamente mais escura das amostras de óleo retiradas ao longo dos ensaios denotou uma presença cada vez mais forte deste elemento, sendo de esperar que a sua presença sobre as superfícies constitua o principal factor justificativo da grande capacidade de resistência à adesão evidenciada por este material.

Um outro aspecto posto em evidência pela análise microscópica foi a tendência à fissuração encontrada em ambas as variantes de ADI ensaiadas. A observação de uma secção interior dos dentes (corte perpendicular às superfícies de trabalho), revelou a presença de um número considerável de fissuras, todas muito semelhantes, em qualquer destes materiais. Estas fissuras encontram-se sobretudo imediatamente abaixo da superfície, na zona onde se desenvolvem as máximas tensões de corte devidas à pressão de Hertz, e tendem a propagar-se entre nódulos de grafite ou entre os nódulos e a superfície. Neste aspecto, é importante notar que o número de fissuras subsuperficiais encontradas é bastante superior ao número de fendas que são visíveis aflorando a própria superfície. De acordo com muitos autores, a capacidade do ADI transformar a sua austenite estabilizada em martensite quando

solicitado mecanicamente (processo que ocorre com um aumento de volume de 4%) é a grande responsável pela inibição da propagação destas fissuras. Supõe-se que a concentração de tensões junto à frente de propagação das fissuras despoleta esta transformação da austenite, o que conduz, por efeito do aumento de volume localizado, ao retardamento da sua propagação ou mesmo ao “fecho” da própria fenda.

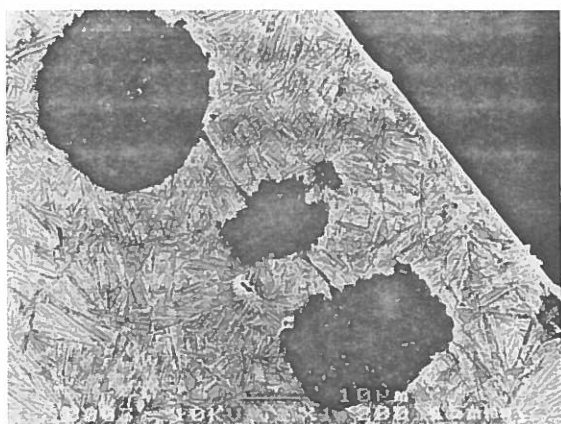


Figura 8 - Aspecto de fissura entre nódulos de grafite [2].

Como a análise microscópica do interior dos dentes foi feita depois dos ensaios, não é possível saber se a iniciação destas fissuras ocorreu para valores moderados da carga imposta às engrenagens ou se é resultado dos altos valores de pressão superficial impostos às superfícies nos últimos estágios dos ensaios FZG. Se a primeira situação tiver ocorrido, então é possível que os ADIs ensaiados apresentem problemas graves no seu comportamento à fadiga de longos ciclos. De qualquer forma, este problema só pode ser esclarecido através da realização de outro tipo de ensaios, nomeadamente ensaios de fadiga de longos ciclos.

5 DISCUSSÃO

5.1 Dos ensaios realizados

Perante os resultados obtidos nestes ensaios, é possível concluir que, perante o tipo de solicitações correspondentes ao ensaio FZG A/8.3/90, e quando lubrificadas com óleo-base sem aditivos, a capacidade de resistência aos fenómenos de adesão e à gripagem de engrenagens construídas em ADI é nitidamente superior à de engrenagens semelhantes fabricadas em aço cementado.

Perante situações de funcionamento englobando altas pressões superficiais e grandes taxas de escorregamento, contando ainda com um baixo nível de protecção conferido pelo lubrificante (com baixa viscosidade e sem aditivos) e com um acabamento superficial “grosseiro”, o desempenho destas engrenagens é notável. Não se trata de afirmar que o ADI permite produzir engrenagens “melhores” que as fabricadas em aço (estas superam sem problemas o estágio 14 FZG se lubrificadas com um óleo aditivado), mas sim de constatar que em situações de funcionamento particularmente desfavoráveis, que conduziriam à gripagem rápida de engrenagens em aço, o ADI consegue resistir muito bem ao desgaste superficial e à gripagem.

Em termos da resistência à flexão ou à fadiga por flexão (considerando a rotura do dente da engrenagem tratada a 360°C), estes resultados não são conclusivos. A engrenagem fracturada foi tratada de modo a apresentar uma maior ductilidade e resistência ao desgaste - o que de facto se verificou - em detrimento da sua resistência mecânica. Mesmo assim, com um só exemplar ensaiado, não é possível afirmar que a ocorrência não tenha sido casual, fruto, por exemplo, de uma má distribuição de carga devida a imperfeições geométricas de fabrico. A engrenagem tratada a 280°C, por sua vez, não foi solicitada com o nível de esforços correspondente ao estágio 12, não tendo

sendo possível aferir qualquer limite em termos de resistência à flexão. Não foram encontradas fissuras de flexão na base dos seus dentes na análise microscópica feita após ensaios, o que, de certa forma, garante que, para os níveis de carga correspondentes ao estágio 11 FZG (450 Nm, 1.8GPa) o material demonstra resistência capaz.

5.2 Trabalhos futuros

O ensaio FZG de gripagem é um ensaio específico, e as conclusões apresentadas assumem, assim, um carácter restrito. Para que o conhecimento do comportamento deste material seja complementado, torna-se fundamental a realização de ensaios de fadiga com engrenagens nos quais se contemplem várias possibilidades de utilização, isto é, se simultaneamente diferentes espectros de carregamento, diferentes velocidades de funcionamento e, obviamente, outros tipos de lubrificantes e de materiais (qual será o comportamento de uma engrenagem em que o pinhão seja de aço e a roda de ADI quando lubrificada com um óleo de alta viscosidade contendo aditivos e funcionando numa caixa de velocidades de um automóvel, por exemplo, ao fim de 50000 Km?).

Além deste aspecto, a literatura apresenta exemplos diversos de ADIs produzidos a partir de ferros nodulares de constituições diferentes entre si, e muitos dos resultados publicados são obtidos a partir de ADIs completamente distintos, seja ao nível dos elementos de liga presentes seja ao nível dos tratamentos térmicos efectuados. Com muitas das combinações metalúrgicas em fase ainda experimental, o ADI é um material que pode proporcionar um desenvolvimento futuro importante, e a variedade de testes e ensaios a realizar ainda é enorme.

CONCLUSÃO

Tendo em consideração as vantagens associadas ao uso deste material, quer em termos económicos quer em termos do aproveitamento de algumas das suas características particulares, parece lícito afirmar que o ADI é um potencial substituto do aço para a fabricação de engrenagens, sobretudo em casos em que os esforços impostos ao maquinismo não têm valores extremamente elevados e em que a lubrificação é feita com óleos-base ou óleos e/ou engrenagens de menor qualidade, dispensando o uso de aditivos.

AGRADECIMENTOS:

Pela colaboração desinteressada e imprescindível participação neste trabalho, agradece-se a disponibilidade manifestada pelas seguintes entidades:

- . Professor Henrique Santos
- . FERESPE
- . A. Brito, Indústria Portuguesa de Engrenagens, Lda.
- . Engenheiros Jorge Castro e Beatriz Graça (CETRI-INEGI)

REFERÊNCIAS:

- [1] Harding, R. A.
"The use of austempered ductile iron for gears"
comunicação apresentada no 2o congresso mundial de engrenagens, Paris, 1986.
- [2] Magalhães, L.
"Resistência ao Desgaste e Gripagem de Engrenagens em Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI)"
Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em Julho de 1995.

- [3] Santos, H.M.C.M., Pinto, A. M. P., Torres, V. M. G.
"Cu-Mn ADI: A low cost high performance material"
 CMUP, FEUP
- [4] Hornung K., Hauke, W.
"Austempered Ductile Iron (ADI), A Material For Gears"
 resultados de testes da GEORGE FISHER LTD.(Suíça), do GEAR RESEARCH INSTITUTE (Universidade de Munique) e da BMW (Bavarian Motors), Alemanha, publicação de 1984.
- [5] Jokipii, Kalevi
"Kymenite, Austempered Ductile Iron as Material for Gears and Other applications"
 Kymmene-Stromberg Corp., Finlândia.
- [6] Norma alemã DIN 51354
"FZG - Zahnrad - Verspannungs - prüfmaschine"
 Teil 1 : Allgemeine Arbeitsgrundlagen
 Teil 2 : Prüfverfahren A/8.3/90
 für Schmierole"
 Abril 1990
- [7] Winter, H., Michaelis, K.
"FZG Gear Test Rig - Description and Test possibilities"
 publicação da FZG.
- [8] Classe de viscosidade ISO, segundo as normas DIN 51519, DIN 3448, ou NF T60-141

BIBLIOGRAFIA:

- Guedes, L.C. , Guessser, W.L., Duran, P.V., Santos, A.B.
"Utilização de ferros fundidos nodulares bainíticos na fabricação de engrenagens"
 publicação da ABM, Vol. 42, #341, Abril 1986.
- "Gear Measuring Techniques, Double Flank Rolling Testing"**
 Folheto informativo de máquina
"HOMMELWERKE".
- Parkes, L. R.
"Austempered irons and the automotive industry"
 Publicado em "Metals & Materials", Vol. 1, nº1.