

# ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DA ESPESURA ÓTIMA DA CAMADA DE CEMENTAÇÃO EM PINOS DE PISTÃO <sup>(1)</sup>

WOLFGANG BANDEL <sup>(2)</sup>

MARCELO GARCEZ LOBO <sup>(3)</sup>

## RESUMO

*Neste trabalho os autores, após analisarem os esforços que atuam sobre os pinos de pistões de motores de combustão interna, fazem um apanhado geral das teorias existentes sobre o efeito das camadas cementadas na resistência dos pinos; são analisadas as teorias referentes à flexão, fadiga, desgaste, impacto e cisalhamento.*

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os pinos de pistões são feitos de aço-liga de baixo teor de carbono, sendo suas superfícies submetidas ao tratamento de cementação (alguns pinos são isentos de cementação no furo interno).

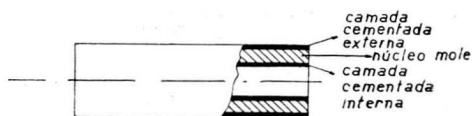


Fig. 1 — Seção longitudinal de um pino de pistão, indicando as camadas de cementação.

Os aços mais usados para pinos pela indústria automobilística nacional são: SAE 5115, 4320 e 8620. (A composição química desses aços pode ser vista na tabela 1).

- (1) Contribuição Técnica n.º 521, a ser apresentada ao XIX Congresso Anual da ABM. Trabalho feito pelos autores durante o estágio que realizaram na Metal Leve S.A., em 1963, quando ainda estudantes do 5.º ano de Engenharia do I.T.A. (Instituto Tecnológico de Aeronáutica).
- (2) Engenheiro de Aeronáutica pelo I.T.A. e Engenheiro da Metal Leve S.A.; São Paulo, SP.
- (3) Engenheiro de Aeronáutica pelo I.T.A. e Engenheiro da Cebec S.A.; São Paulo, SP.

A dureza superficial dos pinos, após a cementação é de 60 a 64 Rockwell C.

A espessura especificada da camada de cementação varia muito de pino para pino (mesmo em pinos de dimensões semelhantes), donde se conclui que provavelmente os fabricantes não adotam um critério uniforme para estabelecer esta espessura.

TABELA 1

Composição química dos aços mais usados para pinos pela indústria automobilística nacional

Nº SAE	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Ni	% Cr	% V	% Mo
5115	0,13 a 0,18	0,70 a 0,90	max 0,04	max 0,04	0,20 a 0,35	--	0,70 a 0,90	--	--
4320	0,17 a 0,22	0,45 a 0,65	max 0,04	max 0,04	0,20 a 0,35	1,65 a 2,00	0,40 a 0,60	--	0,20 a 0,30
8620	0,18 a 0,23	0,70 a 0,90	max 0,04	max 0,04	0,20 a 0,35	0,40 a 0,70	0,40 a 0,60	0,15 a 0,25	--

TABELA 2

Verificação das camadas cementadas de alguns pinos de motores nacionais

Pino	camada cementada externa (mm)	camada cementada interna (mm)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	espessura mínima da parede (mm)	Relação entre cam.cement. e espes.parede
1	0,4-0,6	-	21,95	15	3,5	0,17
2	0,6-0,3	0,6 max	19,05	9,5	4,8	0,29
3	0,6-0,8	0,8 max	19,05	12,7	3,2	0,50
4	0,4-0,7	0,4 max	20,0	14,0	3,0	0,37
5	0,4-0,6	-	23,5	16,5	3,5	0,17
6	0,7-1,0	-	30,0	14,0	8,0	0,12
7	0,9-1,2	-	23,5	16,7	3,4	0,35
8	0,6-0,8	0,3 max	17,5	11,4	3,0	0,36
9	0,3-0,6	0,5 max	18,0	11,0	3,5	0,31

Neste trabalho, procuramos verificar se é possível estabelecer algum critério (teórico ou baseado em ensaios) para especificação da profundidade ideal de cementação.

Fizemos um apanhado geral de algumas teorias referentes ao assunto, a fim de determinar como os diversos esforços atuantes sobre os pinos são influenciados pela camada cementada. Para complementar os dados teóricos foram feitos ensaios de flexão estática em pinos cementados com espessuras de cementação diversas.

## 2. ANÁLISE DAS CARGAS E ESFORÇOS

As forças que agem sobre o pistão e que nos interessam no caso são:

- forças provenientes da pressão dos gases; e
- forças de inércia (provenientes do movimento alternativo das partes móveis).

Estas forças se transmitem ao pino, originando nêlo o seguinte diagrama de carregamento (fig. 2):

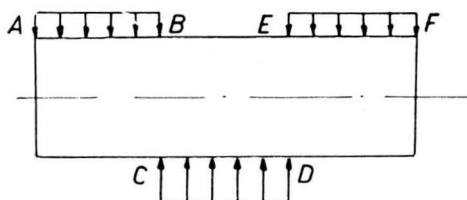


Fig. 2 — Diagrama de carregamento de um pino, em virtude das forças que nele atuam.

Esta distribuição de cargas dá origem aos seguintes esforços:

- tensões devidas à flexão do pino;
- solicitações de fadiga em virtude de ocorrer flexão alternadamente num e noutro sentido durante a rotação do motor;
- esmagamento superficial (nos trechos  $\overline{AB}$ ,  $\overline{CD}$  e  $\overline{EF}$ ) e desgaste;

- tensões de impacto, que aparecem no caso de pré-ignição, de detonação, de freiação brusca do motor, etc., e
- tensões de cisalhamento em BC e ED.

### 3. INFLUÊNCIA DA CAMADA CEMENTADA NA RESISTÊNCIA

#### 3.1. Flexão estática

3.1.1. Pela teoria desenvolvida no ASME Handbook — Metals Engineering Design — 1953, a cementação melhora a resistência à flexão estática. Afirma a teoria que a resistência cresce em proporção linear com o aumento da espessura “*t*” da camada cementada (até um determinado valor máximo de “*t*”), chegando a ser de 50% a 80% maior que a resistência à tração do aço não cementado.

No caso, a espessura ideal da camada cementada seria:

$$t_{\text{ideal}} = \frac{D}{2} \left( 1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \right)$$

onde:

- t* = espessura da camada cementada;
- D* = diâmetro externo do pino;
- $\sigma_b$  = resistência à tração do material;
- $\sigma_a$  = resistência à tração melhorada, devido à cementação.

Esta teoria é baseada em considerações teóricas de resistência, segundo as quais a região cementada tem maior resistência à tração que a região não cementada. Porém não leva

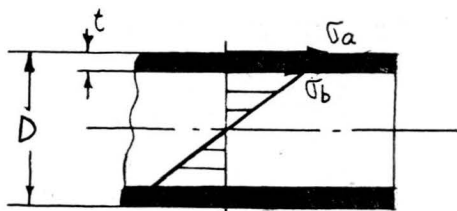


Fig. 3 — Distribuição das tensões num pino submetido a flexão estática. Ver na figura 4 os ensaios realizados nos laboratórios da Metal Leve S.A.

em conta as tensões residuais que surgem nos pinos, em virtude do tratamento térmico.

A teoria citada não nos parece muito razoável. Tomemos como exemplo, um pino de diâmetro de 20 mm: de acordo com aquela fórmula, para obter um aumento de apenas 25% na resistência à flexão, seria necessária uma camada cementada de 2 mm de espessura. Na realidade, porém, um pino de diâmetro de 20 mm costuma ser cementado com apenas 0,3 a 0,7 mm e não 2 mm (aliás, essa espessura de 2 mm seria

$\circ$  = pino ensaiado

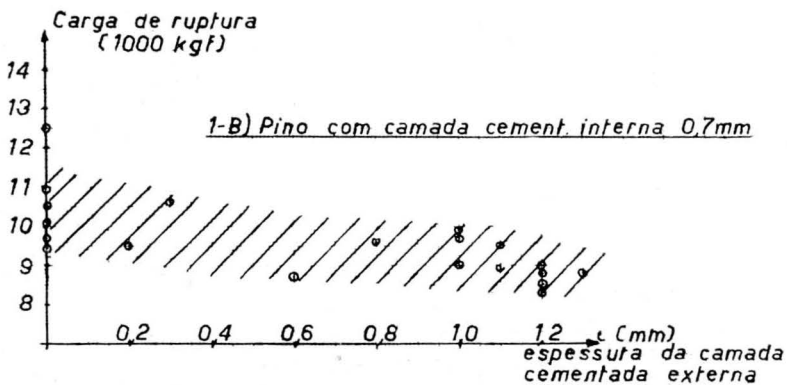
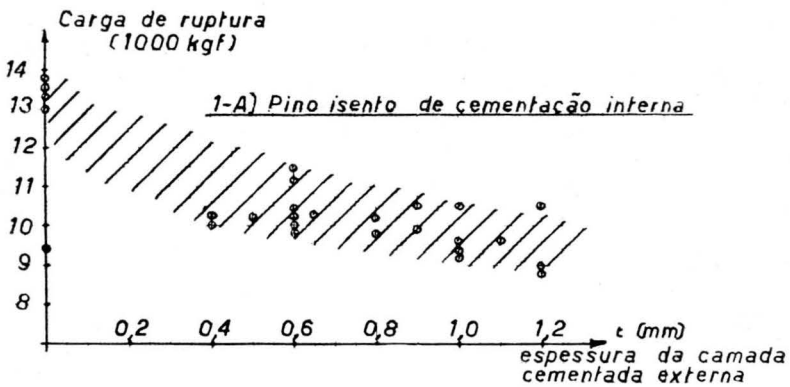


Fig. 4 — Estudo da influência da camada cementada na flexão estática. Efeito ao aumento da camada cementada externa.

Convenção:  $\circ$  = pino ensaiado.

muito grande comparada com a espessura da parede de pinos com tais dimensões).

3.1.2. Ensaios de flexão estática realizados no Laboratório Central da Metal Leve S/A., em setembro de 1963, com mais de 100 pinos de mesmas dimensões e mesmo material, com diversas espessuras de camada de cementação interna e externa, levaram a resultados que não estão de acordo com esta teoria (vide fig. 4).

Êstes ensaios foram executados com um pino, cujo material é aço SAE 5115 e cujos diâmetros externo e interno são 28,5 mm e 20 mm, respectivamente.

A dispersão relativamente grande dos resultados obtidos nesses ensaios nos fazem supor que além da espessura da camada cementada, haja outras variáveis que influam de maneira preponderante na resistência à flexão, como por exemplo tratamento anterior sofrido pela barra de que é feito o pino, deformações durante a usinagem, variações na composição do material, acabamento superficial, tamanho de grão, etc. (Fizemos uma verificação do tamanho do grão e constatamos que o mesmo cresce com o aumento da camada cementada, ou seja, com o tempo de austenitização no forno de cementação).

### 3.2. *Fadiga*

Todos os autores concordam que a cementação melhora a resistência à fadiga, muito embora discordem na explicação teórica de tal fato. (Comumente a melhora da resistência à fadiga é atribuída às tensões residuais resultantes do tratamento térmico).

O "Handbook of Experimental Stress Analysis — 1950", traz uma ótima comparação entre os resultados de vários autores e suas explicações. Neste capítulo são abordados os trabalhos experimentais realizados por: Mickel e Sommer, Wiegand, Woodvine e Peterson e Lessels.

3.2.1. Mickel e Sommer fizeram ensaios de compressão cíclica em pinos cementados de diversas maneiras (superfície externa, levaram a resultados que não estão de acordo com esta O material utilizado foi aço, com as seguintes propriedades: Composição em %: C — 0,11 a 0,18; Si — 0,2 a 0,3; Mn — 0,3 a 0,4; Cr — 0,20; Cu — 0,25. Resistência à tração do núcleo — 91 kg/mm<sup>2</sup>. Dureza da superfície — 53-56 RC.

Após os ensaios verificaram que havia pouca variação na resistência à fadiga, para os diversos tipos de condições do furo (sem cementação, com cementação igual à da superfície

externa, e com cementação igual à metade da superfície externa); somente neste último caso (camada interna igual à metade da externa) apresentou uma pequena melhoria da resistência à fadiga do pino.

Concluíram Mickel e Sommer que este método de ensaio ou este tipo de aço, não são influenciados pelas tensões residuais, no que diz respeito à fadiga, ou pelo menos as tensões residuais não são o elemento determinante.

3.2.2. Wiegand fez o mesmo tipo de ensaio com pinos de aço com a seguinte composição, em %: C — 0,15; Cr — 2,0; Ni — 2,0; Mo — 0,25.

Wiegand encontrou melhor resistência à fadiga em pinos com cementação interna; demonstrou que esta melhoria é devida às tensões residuais da cementação, e não devido à melhor resistência à tração da camada cementada. (Para afirmar isto, fez ensaios que levaram à conclusão de que a camada cementada não causa aumento sensível da resistência à tração).

3.2.3. Woodvine contrariou Wiegand mostrando que a resistência à tração da camada cementada é aproximadamente 50% maior que a resistência à tração estática do núcleo.

3.2.4. Peterson e Lessels verificaram que o endurecimento superficial melhora a resistência à fadiga, mas que as tensões residuais pouco influem nesse fenômeno. Segundo estes autores, o que mais influi são as propriedades físicas, dureza e mudança da micro-estrutura.

O autor deste capítulo do "Handbook of Experimental Stress Analysis", ressalta que há falta de dados e de estudos a respeito do assunto e as explicações são geralmente muito superficiais e simplificadas.

Ainda a respeito da resistência à fadiga, o ASM — Metals Handbook — 1961, menciona ensaios feitos com aço 8620 em amostras de 1/4" de diâmetro. Seus resultados levaram à conclusão que quanto mais grossa a camada cementada, maior é a resistência à fadiga. Foram, porém, feitos ensaios somente com duas espessuras diferentes de camadas cementadas, e os resultados apresentaram uma grande dispersão.

### 3.3. *Desgaste*

Quanto à relação entre camada cementada e desgaste, a única literatura que encontramos foi o Metals Handbook — 1961, cujos dados se resumiam a alguns conselhos práticos:

Por um lado sugere 0,025" (0,6-0,7 mm) como valor satisfatório para um aço-liga com dureza 40 RC no núcleo.

Outra sugestão apresentada é a de especificar a profundidade de cementação de acôrdo com o desgaste tolerável da peça; no caso, aconselha uma camada de espessura mínima igual a 5 vêzes o desgaste tolerável.

Finalmente, aconselha utilizar uma camada cementada, de espessura não maior que 20% da espessura da parede, principalmente para seções finas da ordem de 10 mm ou menos.

Esta última regra, que aconselha camadas cementadas que não excedam 20% da espessura total, nos parece bastante razoável. Porém, observando os valores da espessura das camadas cementadas de alguns pinos de pistão de motores nacionais (vide tabela 2), notamos que, dentre os 9 pinos analisados, sòmente 3 satisfazem aquela regra. Isto significa que os 6 pinos restantes apresentam uma camada cementada desnecessariamente grande, talvez com prejuízo para a resistência do pino, e certamente com prejuízo para o custo do mesmo.

#### 3.4. *Impacto*

A camada cementada, tendo alto teor de carbono, é extremamente frágil, isto é, tem baixa resistência ao impacto. O impacto que por ventura venha a sofrer o pino, será resistido pelo núcleo, não cementado. Portanto, no que diz respeito ao impacto, o ideal seria não haver cementação do pino.

#### 3.5. *Cizalhamento*

As tensões de cizalhamento serão críticas se:

- a área da seção de cizalhamento fôr muito pequena (diferença entre diâmetros externo e interno pequena);
- se houver uma mudança brusca de seção (mudança do diâmetro interno), nas proximidades da seção passível de sofrer cizalhamento. Isto acarretaria uma concentração de tensões prejudicial ao pino.

Evitados os dois casos acima, o cizalhamento não será crítico.

### 4. CONCLUSÕES

4.1. Os poucos trabalhos que existem a respeito do assunto analisado, são muitas vêzes discordantes entre si. Um ponto importante sôbre o qual os autores não discordam é que a camada cementada aumenta a resistência à fadiga; porém quan-



to aumenta, como aumenta e porque aumenta já são partes explicadas de maneiras diversas.

4.2. De uma maneira geral, as conclusões dos autores são no sentido de recomendar menores espessuras de cementação, das que foram encontradas nos pinos nacionais analisados.

4.3. Para que chegássemos a uma conclusão definitiva, seriam necessários ensaios de fadiga que representassem da melhor maneira possível os esforços reais que atuam sobre o pino. Estes ensaios, porém, deixaram de ser feitos por não dispormos de aparelhos adequados. A carga necessária para ruptura de um pino é muito elevada em relação à de um corpo de prova padronizado para máquinas usuais de teste de fadiga. Por exemplo, o pino que foi ensaiado estáticamente na Metal Leve S/A., sofreu ruptura com uma carga de flexão da ordem de 10.000 kg. Supondo que a ruptura por fadiga se desse com metade da carga de ruptura estática, teríamos 5.000 kg. As máquinas de fadiga de que pudemos dispôr forneciam uma carga máxima da ordem de 500 kg, ou seja, 10 vêzes menos que a carga necessária.

Não projetamos, porém, um pino para ensaio que fraturasse com 500 kg, pois êsse pino seria excessivamente pequeno; não poderia dispôr de furo interno e não poderíamos, pois, reproduzir nêle os esforços reais atuantes.

#### AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à METAL LEVE S/A. a oportunidade que lhes foi oferecida de realizar êste trabalho, e a cooperação prestada pelos seus Departamentos de Engenharia e Laboratórios.

#### BIBLIOGRAFIA

1. M. HETÉNYI — *Handbook of Experimental Stress Analysis* — 1950.
2. ASM Metals Handbook — 1960.
3. H. WIEGAND — *Oberflaesche und Dauerfestigkeit* — 1940.
4. *Metals Engineering Design*. ASME Handbook — 1953.
5. J. M. LESSELS — *Strength and Resistance of Metals* — 1954.