CORPOS DE TRANSMISSÃO, TOMADA DE FORÇA E REDUTOR

As caixas de engrenagens atuam como trem de força e realizam essa função de transmissão de potência por meio da transmissão do movimento das rodas dentadas. As peças da transmissão que protegem esse processo para que ocorra com segurança e contra elementos nocivos vindos de fatores externos podem ser chamadas de corpos de transmissão.

É preferível que os corpos de transmissão tenham resistência mecânica, resistência térmica, resistência à corrosão, capacidade de absorção de impactos e estanqueidade ao óleo. Por isso, na fabricação do corpo de transmissão são usadas determinadas matérias-primas.



Figura 1: Corpo do redutor KRD.28

Ferro fundido

O termo ferro fundido não designa um único material, mas uma família de materiais cujo principal componente é o ferro e que contêm uma quantidade significativa de carbono e silício. Os componentes microestruturais básicos dos ferros fundidos são as formas químicas e morfológicas assumidas pelo carbono e a matriz metálica contínua na qual o carbono e/ou os carbonetos estão dispersos. Os ferros fundidos contêm componentes microestruturais chamados grafita, carboneto, ferrita, perlita, martensita, austenita e bainita. A presença de elementos residuais, a adição de elementos de liga, a mudança no comportamento de solidificação e o tratamento térmico aplicado após a solidificação permitem produzir diferentes tipos de ferro fundido com as propriedades mecânicas desejadas.

Na indústria automotiva são usados habitualmente dois tipos de ferro fundido nos corpos de transmissão e de tomadas de força Split Shaft. São eles:

1. Ferro fundido de grafita lamelar (GG)

É um tipo de ferro fundido em que a maior parte do carbono de sua composição se encontra, após a solidificação, na forma de lâminas de grafita livre. Ao ser quebrado, sua superfície tem aparência cinza escura. Esse ferro fundido, de cor parda devido à grafita, é chamado de ferro fundido de grafita lamelar ou FERRO FUNDIDO CINZENTO.

A composição do ferro fundido cinzento inclui, além do ferro que constitui sua estrutura principal, carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre. Esses elementos geralmente vêm do FERRO-GUSA. O enxofre é um elemento indesejado no ferro fundido cinzento. Uma pequena quantidade de fósforo é benéfica.

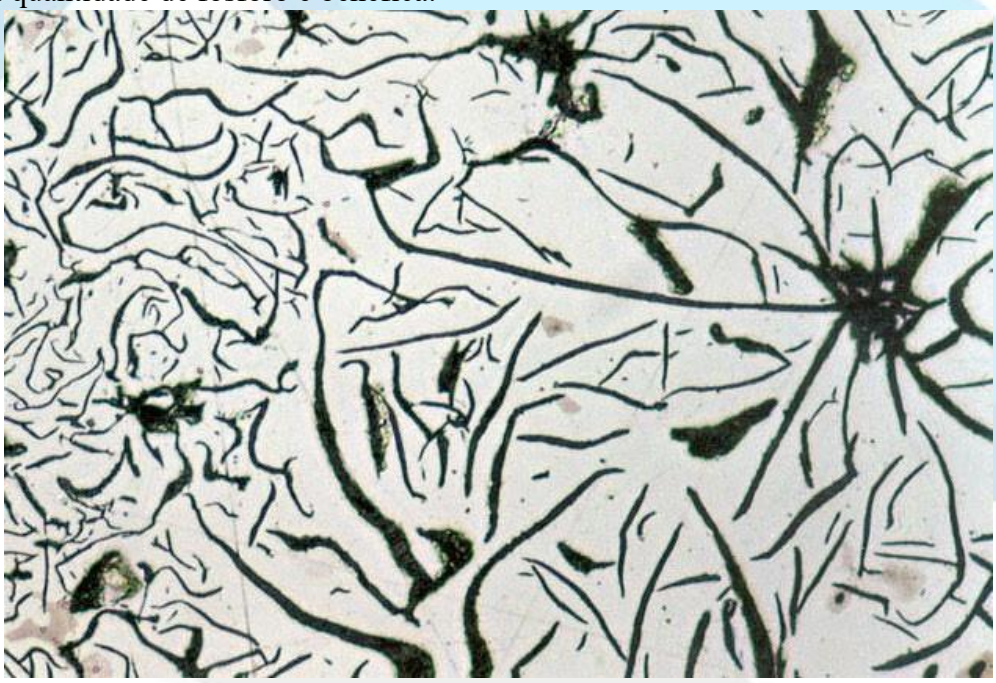


Figura 2: Microestrutura do ferro fundido de grafita lamelar

Os ferros fundidos de grafita lamelar são usados com frequência na indústria automotiva. Quanto à aplicabilidade de tratamento térmico e à resistência, são tão bons quanto o aço.

Os ferros fundidos de grafita lamelar também são agrupados de acordo com seus componentes químicos e propriedades físicas.

	DIN	EN
Grade	GG25	EN-GJL-250
comparable with	Meehanite GD250	
Standard	DIN 1691	EN 1561
Alloy number	0.6025	EN-JL 1040

Chemical composition		Mechanical properties	
C	2,90 - 3,65		
Si	1,80 - 2,90	**Rm**	155 - 275
Mn	0,50 - 0,70	**HB**	160 - 250
S	0,10 max.		
P	0,30 max.		

kg/dm^3 ca. 7,2

Characteristics GG25 is the most common flake cast iron grade. It offers a good combination of strength and wear resistance. It is recommended for uses where a balance is required between mechanical characteristics and machinability. Cast iron with flake graphite, predominant pearlitic structure. Heat treatment is not recommended.

	DIN	EN
Grade	GG30	EN-GJL-300
comparable with	Meehanite GB300	
Standard	DIN 1691	EN 1561
Alloy number	0.6030	EN-JL 1050

Chemical composition		Mechanical properties	
C	2,90 - 3,65		
Si	1,80 - 2,90	**Rm**	170 - 325
Mn	0,10 - 0,30	**HB**	190 - 260
S	0,10 max.		
P	0,30 max.		

kg/dm^3 ca. 7,2

Charactristics Offers a higher wear resistance, strength and heat treatment response compared to GG20 and GG25 while still possessing reasonable machinability and excellent surface finish. GG30 can be hardened by conventional methods to Rc 50 on the bar surface.

	DIN	EN
Grade	GG35	EN-GJL-350
comparable with	Meehanite GA350	
Standard	DIN 1691	EN 1561
Alloy number	0.6035	EN-JL 1060

Chemical composition		Mechanical properties	
C	2,90 - 3,65		
Si	1,80 - 2,90	**Rm**	210 - 375
Mn	0,50 - 0,70	**HB**	240 - 300
S	0,10 max.		
P	0,30 max.		

kg/dm^3 ca. 7,2

Characteristics GG35 is an excellent wear resistance cast iron grade while still possessing reasonable machinability characteristics. GG35 can be hardened by conventional methods to Rc 50 on the bar surface.

Figura 3: Comparação dos ferros fundidos de grafita lamelar

Como se vê na Figura 3, existem diferentes tipos de ferro fundido de grafita lamelar. Eles são designados por um sistema de codificação como GG25, GG30 etc. Em GG25, a parte 'GG' indica que se trata de ferro fundido de grafita lamelar, e a parte '25', que resiste a uma resistência à tração de 250 Mpa. Observa-se que as propriedades de resistência à corrosão e de resistência superficial melhoram à medida que o valor numérico aumenta. No entanto, o custo também aumenta na mesma proporção.

2. Ferro fundido de grafita esferoidal (GGG)

O ferro fundido de grafita esferoidal é aquele em que a grafita de sua composição tem forma esférica. Também é chamado de FERRO FUNDIDO DÚCTIL (NODULAR). Adiciona-se uma pequena quantidade de magnésio (Mg) ou cério (Ce) ao ferro fundido em estado líquido para que o carbono passe da forma lamelar para a esférica. A forma das lâminas de grafita nos ferros fundidos cinzentos é o principal fator que reduz sua resistência, tenacidade e ductilidade, devido à tendência a gerar trincas. Esse ferro fundido obtido de forma especial é chamado de ferro fundido de grafita esferoidal devido à estrutura de sua grafita.

O ferro fundido de grafita esferoidal é usado em diversas aplicações como substituto do ferro fundido cinzento, do aço fundido e das ligas de metais não ferrosos. Em muitos países é conhecido como "nodular cast iron, ductile iron, fonte spheroidal graphite, kufelgrapfit gusseisen, spheregus". Seu nome nas normas turcas é FERRO FUNDIDO DE GRAFITA ESFEROIDAL e sua abreviatura é "GGG". Em outra abordagem, os ferros fundidos de grafita esferoidal podem ser descritos como uma forma mais avançada dos ferros fundidos de grafita lamelar.

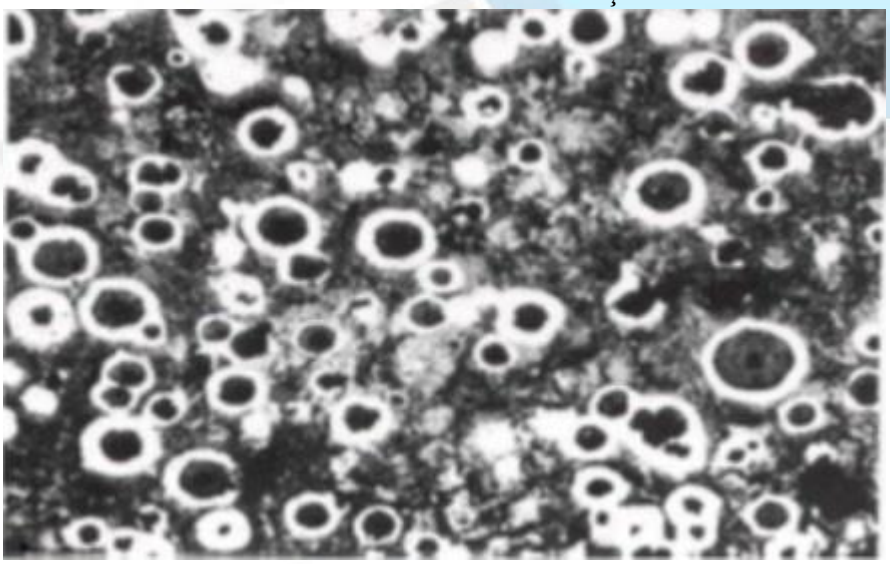


Figura 4: Microestrutura do ferro fundido de grafita esferoidal

Os ferros fundidos de grafita esferoidal podem ser usados em aplicações em que os de grafita lamelar podem ser insuficientes. Sobretudo em termos de resistência, são superiores aos ferros fundidos de grafita lamelar. Assim como estes, os ferros fundidos de grafita esferoidal se dividem em grupos.

Grade	GGG40	EN-GJS-400-15
comparable with	Meehanite SF400	
Standard	DIN 1693	EN 1563
Alloy number	0.7040	EN-JS 1030

Chemical composition		Mechanical properties	
C	3,40 - 3,85		
Si	2,30 - 3,10	**Rm**	400
Mn	0,10 - 0,30	**Rp 0,2**	250
S	0,02 max.	**A5**	15
P	0,10 max.	**HB**	130-180

kg/dm³ ca. 7,2
Characteristics GGG40 is the most common used nodular cast iron. Nodular cast iron has predominately a ferritic structure. Offers superior machinability combined with optimal impact, fatigue, electrical conductivity and magnetic permeability. Fur use beneath 0°C a special grade (GGG40.3 or EN-GJC400-18-LT) can be produced with a very high inpacttest value.

	DIN	**EN**
Grade	GGG50	EN-GJS-500-7
comparable with	Meehanite SFP500	
Standard	DIN 1693	EN 1563
Alloy number	0.7050	EN-JS 1050

Chemical composition		Mechanical properties	
C	3,40 - 3,85		
Si	2,30 - 3,10	**Rm**	500
Mn	0,10 - 0,30	**Rp 0,2**	320
S	0,02 max.	**A5**	7
P	0,10 max.	**HB**	170-240

kg/dm³ ca. 7,2
Characteristics Has a ferritic /pearlitic structure. Offers higher wear resistance, strength and heat treatment response compared with GGG40 while still possessing reasonable machinability and excellent surface finishing.

	DIN	**EN**
Grade	GGG60	EN-GJS-600-3
comparable with	Meehanite SP600	
Standard	DIN 1693	EN 1563
Alloy number	0.7060	EN-JS 1060

Chemical composition		Mechanical properties	
C	3,40 - 3,85		
Si	2,30 - 3,10	**Rm**	600
Mn	0,10 - 0,30	**Rp 0,2**	360
S	0,02 max.	**A5**	3
P	0,10 max.	**HB**	200-260

kg/dm³ ca. 7,2
Characteristics Has a predominately pearlitic structure. Very good machinability combined with higher wear resistance, strength and less elongation than GGG50.

	DIN	**EN**
Grade	GGG70	EN-GJS-700-2
comparable with	Meehanite SP700	
Standard	DIN 1693	EN 1563
Alloy number	0.7070	EN-JS 1070

Chemical composition		Mechanical properties	
C	3,40 - 3,85		
Si	2,30 - 3,10	**Rm**	700
Mn	0,10 - 0,30	**Rp 0,2**	400
S	0,02 max.	**A5**	2
P	0,10 max.	**HB**	240-300

kg/dm³ ca. 7,2
Characteristics Pearlitic structure with higher mechanical values than GGG50 and GGG60 with an even better wear resistance. Despite the high hardness still reasonable machinability and excellent surface finish.

Figura 5: Comparação dos ferros fundidos de grafita esferoidal

Como se vê na Figura 5, existem diferentes tipos de ferro fundido de grafita esferoidal. Eles são designados por um sistema de codificação como GGG40, GGG50 etc. Em GGG40, a parte 'GGG' indica que se trata de ferro fundido de grafita esferoidal, e a parte '40', que resiste a uma resistência à tração de 400 Mpa. Observa-se que as propriedades de resistência à corrosão e de resistência superficial melhoram à medida que o valor numérico aumenta. No entanto, o custo também aumenta na mesma proporção.

De acordo com as propriedades indicadas, observa-se que os ferros fundidos de grafita esferoidal são mais duráveis que os de grafita lamelar.

Table 1. **Properties in cast-on test pieces**

Grade according to DIN 1693 Part 1		Ruling wall thickness of the casting	Thick-ness of cast-on test piece	Tensile strength R_m	0.2 % yield limit $R_{p\,0,2}$ [1]	Elon-gation at break A_5	Absorbed energy [2] (DVM specimens) at −20 °C A		Reference data
Symbol	Material number	mm	mm	N/mm² min.	N/mm² min.	% min.	average of 3 speci-mens	individ-ual value	Structure
							Joule min.		
GGG-40.3	0.7043	from 30 to 60 over 60 to 200	40 70	390 370	250 240	15 12	14 12	11 9	predominantly ferritic
GGG-40	0.7040	from 30 to 60 over 60 to 200	40 70	390 370	250 240	15 12	–		predominantly ferritic
GGG-50	0.7050	from 30 to 60 over 60 to 200	40 70	450 420	300 290	7 5	–		ferritic/ pearlitic
GGG-60 [3]	0.7060	from 30 to 60 over 60 to 200	40 70	600 550	360 340	2 1	–		pearlitic/ ferritic
GGG-70 [3]	0.7070	from 30 to 60 over 60 to 200	40 70	700 650	400 380	2 1	–		predominantly pearlitic

1) Instead of the 0.2 % yield limit it is permissible in the case of the ferritic grade to quote the yield point obtained from the testing machine diagram, due regard being paid to the more restricted process conditions compared with DIN 50 145, as referred to in the Explanations.

2) For other test temperatures the values for absorbed energy are to be agreed.

3) Tensile strength and elongation are not guaranteed if minimum hardness values are specified for reasons of increased wear resistance.

Figura 6: Outra abordagem de comparação dos ferros fundidos de grafita esferoidal

Elementos que aumentam a resistência à corrosão dos ferros fundidos

A corrosão é um dos problemas mais comuns nos metais. Na indústria existem fatores que aumentam a resistência à corrosão.

Cromo (Cr): para aumentar a resistência à corrosão e à oxidação, pode-se adicionar cromo desde que não ultrapasse 35%.

Níquel (Ni): verificou-se que aumenta a resistência à corrosão quando usado com Cr. Ligas com 14% de Ni e 1.5% de Cr podem ser resistentes à corrosão.

Silício (Si): o silício forma na superfície uma camada protetora de SiO_2, pois aumenta a capacidade de passivação do ferro. Essa camada protege contra a corrosão. Para o Si, recomenda-se um teor de 14%.

Cobre (Cu): o cobre também pode ser usado como agente anticorrosivo, mas não é muito preferido devido às suas propriedades negativas.

Ligas de alumínio

O primeiro motivo para usar ligas de alumínio é reduzir o peso da transmissão no veículo. No entanto, sua principal desvantagem é o custo mais alto em comparação com o ferro fundido cinzento. As ligas de alumínio têm melhor usinabilidade que o ferro fundido cinzento.

Outra vantagem das ligas de alumínio é que sua condutividade térmica é muito maior que a dos ferros fundidos cinzentos, o que também evita o superaquecimento dos componentes internos da transmissão.

Na escolha do alumínio para o corpo de transmissão, as ligas diferem entre si. São elas:

ETINORM	ETIAL-110	ETIAL-120	ETIAL-140	ETIAL-141	ETIAL-145	ETIAL-147	ETIAL-150	ETIAL-160
PESO ESPECÍFICO (gr/cm3)	2,76	2,68	2,66	2,66	2,69	2,76	2,67	2,76
FAIXA DE FUSÃO (oC)	525-625	575-630	575-585	575-585	535-590	520-580	525-580	540-595
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (cal/ cm.soC)	0,32	0,35	0,37	0,29	0,21	0,25	-	0,23
RESISTÊNCIA À CORROSÃO	MODERADA	MUITO BOA	MUITO BOA	MUITO BOA	BOA	MODERADA	MODERADA	MODERADA
FUNDIBILIDADE	MUITO BOA	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	BOA	BOA	EXCELENTE	BOA
USINABILIDADE	BOA	MODERADA	MODERADA	MODERADA	BOA	BOA	BOA	BOA
OXIDAÇÃO ANÓDICA	Apenas proteção superficial							
OUTRAS PROPRIEDADES E USOS	Boa fundibilidade e soldabilidade; cabeçotes e tampas de cárter de motores a combustão.	Utensílios de cozinha, equipamentos para alimentos, acessórios marítimos e diversas peças fundidas de seção fina.	Peças fundidas de seção fina e mistas, caixas de motor, caixas de medição, peças de bombas e ambiente marinho.	Peças fundidas sob pressão mistas e de parede fina.	Fundição em areia e em coquilha, peças fundidas, pistões e outras peças de motor	Fundição em coquilha, base de ferro.	Usada em peças fundidas sob pressão de alta resistência.	Usada em peças fundidas sob pressão que exigem bom acabamento superficial.

Figura 7: Propriedades físicas e químicas das ligas de alumínio

ETINORM	ETIAL-171	ETIAL-175	ETIAL-177	ETIAL-180	ETIAL-195	ETIAL-220	ETIAL-221	ETIAL-509
PESO ESPECÍFICO (gr/cm3)	2,64	2,76	2,68	2,74	-	-	2,77	2,6
FAIXA DE FUSÃO (oC)	575-595	520-580	-	570-525	-	-	541-647	520-620
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (cal/ cm.soC)	0,27	0,25	0,38	0,24	-	-	0,35	0,24
RESISTÊNCIA À CORROSÃO	MUITO BOA	MODERADA	BOA	BOA	BOA	RUIM	RUIM	EXCELENTE
FUNDIBILIDADE	EXCELENTE	BOA	BOA	BOA	BOA	RUIM	RUIM	BOA
USINABILIDADE	MODERADA	BOA	MODERADA	BOA	BOA	MUITO BOA	MUITO BOA	MUITO BOA
OXIDAÇÃO ANÓDICA	Apenas proteção superficial							
OUTRAS PROPRIEDADES E USOS	Boas propriedades de fundição resistente, resistência à corrosão e estanqueidade à pressão.	Resistente a trincas a quente e com ótima fluidez. Usada em pistões de motores de combustão interna.	Usada na fabricação de aros estanques à pressão na indústria automotiva.	Liga de uso geral com amplo campo de aplicação. Usada em peças fundidas sob pressão.	Usada na fabricação de pistões e blocos de cilindros de motores de combustão interna.	Usada em fundição em areia e em coquilha e em caixas de engrenagens	Usada em fundição em areia e em coquilha, aplicações gerais de engenharia e aviões.	Corpos fundidos resistentes à corrosão de máquinas de cozinha e escritório, instrumentos ópticos, peças fundidas decorativas e fundição sob pressão.

Figura 8: Propriedades físicas e químicas das ligas de alumínio (cont.)

Elementos que aumentam a resistência à corrosão das ligas de alumínio

Assim como nos ferros fundidos, também há elementos que aumentam a resistência à corrosão das ligas de alumínio. O material de construção e o efeito do elemento adicionado à liga nem sempre coincidem. Por exemplo, enquanto o cromo (Cr) aumenta a resistência à corrosão nos ferros fundidos, o mesmo não ocorre nas ligas de alumínio.

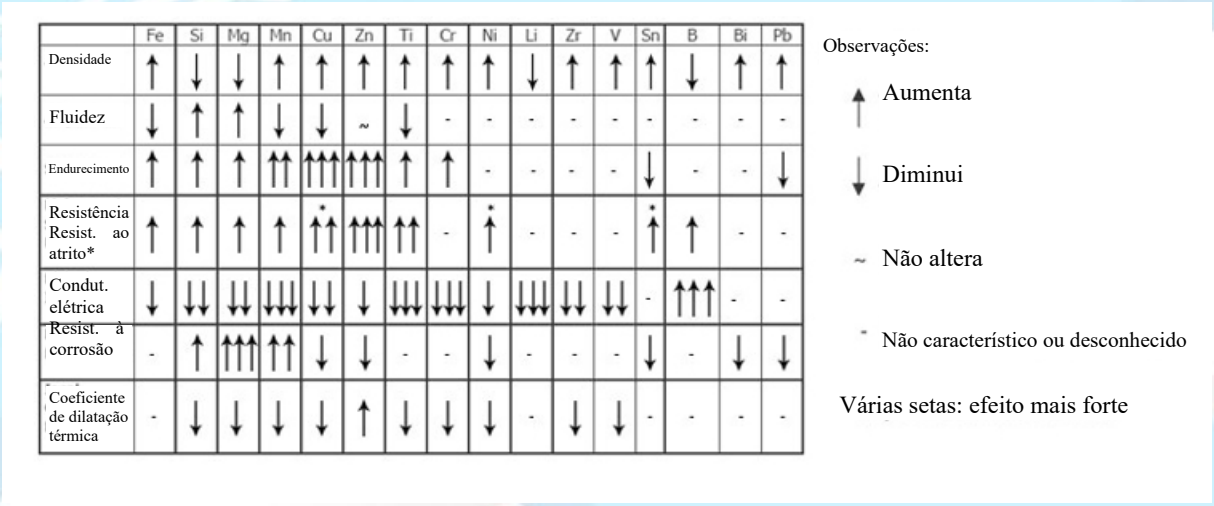


Figura 9: Contribuição dos elementos adicionados à liga de alumínio para suas propriedades físicas

Como se vê na Figura 9, o magnésio (Mg), o manganês (Mn) e o silício (Si) aumentam a resistência à corrosão. No entanto, ao usá-los, é preciso considerar alguns parâmetros. Por exemplo, o silício (Si), usado para evitar a corrosão, também pode alterar outras propriedades, o que nem sempre é desejável. O magnésio (Mg) é o elemento anticorrosivo mais usado nas ligas de alumínio.

Ligas de alumínio com magnésio

O alumínio é usado há cerca de 50 anos em transmissões e tomadas de força Split Shaft devido à sua resistência a altas temperaturas e à capacidade de suportar esforços mecânicos, e hoje começou a substituir o ferro fundido. O corpo de alumínio é 66% mais leve que o de ferro fundido, enquanto o de liga de magnésio é 75% mais leve. Além de mais leve, o magnésio tem alta resistência a impactos e ao esmagamento e absorve o som e a vibração melhor que o alumínio. Essa redução de peso resulta em menor consumo de combustível e menores emissões de escape.

As vantagens do magnésio e das ligas de magnésio são as seguintes:

- É o de menor densidade entre todos os elementos estruturais metálicos (1738 kg/3).
- Proporciona alta resistência específica.
- Tem boa fundibilidade e é adequado para fundição sob alta pressão.
- Pode ser torneado e fresado em altas velocidades.
- Pode ser bem soldado em condições de atmosfera controlada.

Diferentes fabricantes de transmissões e tomadas de força Split Shaft

Segundo as pesquisas realizadas, os materiais usados pelos diferentes fabricantes de transmissões e tomadas de força Split Shaft podem variar conforme as condições. Abaixo é mostrado como exemplo o material usado por um fabricante.

Bevel gearboxes BG Series

Materials and components

Housing
- cubic shape
- material: grey cast iron EN-GJL-250 (UNI EN 1561)
- all 6 sides machine finished
- on request: stainless steel

Covers and hubs
- material: grey cast iron EN-GJL-250 (UNI EN 1561)
- machining: internal centring tolerance **h7**, outer centring tolerance **f7**
- on request: stainless steel

Solid shafts
- material: carbon steel C45E +H +QT (UNI EN 10083-2), hardened and tempered
- machining: cylindrical end, ground in tolerance **j6**, with key according to DIN 6885 Part 1
- on request: stainless steel
  shaft end with spline profile according to DIN 5480
  shaft end machined to drawing

Hollow shafts
- material: input hollow shaft - carbon steel C45E +H +QT (UNI EN 10083-2), hardened and tempered
  output hollow shaft - alloy steel 39 NiCrMo 3 (UNI EN 10083-3), hardened and tempered
- machining: cylindrical end, ground in tolerance **H7**, with keyway according to DIN 6885 Part 1
- on request: stainless steel
  bore with spline profile according to ISO 14

Bevel gears
- material: alloy steel 20 MnCr 5 (UNI EN 10084), case-hardened and tempered
- toothing: GLEASON, with spiroidal tooth
- running in with lapping in pairs

Seals
- oil seals in NBR, on request in VITON
- O-rings in NBR

Bearings
- taper roller bearings on solid output shaft and input shafts
- ball bearings on hollow input shaft for motor flange
- on request: larger bearings for higher radial and/or axial load capacity

Figura 10: Materiais usados na transmissão cônica BG da empresa Servomech

CONCLUSÃO

Na indústria automotiva, pode-se optar por uma ampla gama de materiais para os corpos de transmissões e tomadas de força Split Shaft. Para escolher, é importante definir determinadas prioridades. Por exemplo, enquanto as ligas de alumínio se destacam pela leveza e condutividade térmica, os ferros fundidos parecem mais vantajosos em resistência e custo.

O ferro fundido GGG50 usado em nossa empresa é de qualidade relativamente alta; no entanto, existem ferros fundidos mais resistentes à corrosão. O mais importante nesse aspecto é verificar se o material GGG50 fundido pelo fornecedor usa a proporção correta de elementos de liga. Ao mesmo tempo, no processo de esferoidização da grafita, é preciso adicionar diversos elementos metálicos ao material em estado líquido da fase de grafita lamelar. É necessário controlar rigorosamente com que precisão a empresa fornecedora faz isso. Da mesma forma, o material ETIAL- 171 usado como liga de alumínio também pode ser considerado bom. Embora existam ligas de alumínio com melhor resistência à corrosão, o cálculo de custos é um aspecto importante que não deve ser ignorado na escolha dos materiais.

Como mostra a Figura 10, a empresa Servomech usou como material do corpo o EN-GJL-250, ou seja, o ferro fundido de grafita lamelar GG25 mencionado no relatório. Embora a escolha do GG25, de qualidade relativamente baixa, seja um aspecto a considerar, a escolha do 20MnCr5 como material das engrenagens também é um fator que não deve ser ignorado na seleção do material das engrenagens que projetamos. Pois, embora essa empresa esteja disposta a abrir mão da qualidade do material do corpo, não abriu mão de forma alguma do material das engrenagens.