

Exigências de qualidade no balanceamento de rotores rígidos

SUMÁRIO

A norma internacional ISO1940/1 é amplamente aceita como referência para determinar a qualidade de balanceamento de rotores rígidos. Este trabalho é apresentado como um tutorial de referência do usuário, desta norma e das suas aplicações práticas.

Um método simplificado é mostrado determinando o desequilíbrio residual permissível para várias classificações do rotor. A ênfase é dada a alocar o desequilíbrio residual permissível para determinar os planos da correção nas configurações do rotor, tais como os rotores assimétricos, estreitos e em balanço. Finalmente, uma comparação de várias classes de qualidade de balanceamento é feita com tolerâncias de contrapeso na MIL-STD-167-1 e com API.

INTRODUÇÃO

A organização de normas internacional, ISO, publicou o padrão 1940/1 "exigências de qualidade no balanceamento de rotores rígidos," o que foi adotado pelo American National Standards Institute, ANSI, como S2.19-1975, "Exigências de qualidade no balanceamento de corpos rígidos rotativos." Foi adotada também por padrões Britânicos como o BS 6861: Parte 1, e pelos Alemães como VDI 2060.

A ISO 1940/1 requer uma compreensão do balanceamento e de sua terminologia se o padrão pretende ser compreendido e usado corretamente. O leitor é encaminhado à "seção da terminologia do balanceamento" para um sumário dos termos usados neste artigo.

USANDO A NORMA

o uso da norma envolve as seguintes etapas:

1. Selecione uma classe de qualidade de "G número" da tabela 1 baseando-se no tipo do rotor.
2. Use figura 1 (A ou B) do gráfico para determinar o valor específico residual permissível do desequilíbrio, o e_{per} para a velocidade máxima de operação do rotor e do número G selecionado. Multiplique então o e_{per} pelo peso do rotor para obter o desequilíbrio residual permissível, U_{per} .
3. Aloque U_{per} aos planos de correção baseando-se na configuração do rotor.

Para executar a etapa 1, se requer simplesmente que o usuário encontre o tipo do rotor que melhor se assemelhe ao que será balanceado.

A etapa 2 é mais delicada porque se requer usar o gráfico da figura 1, para encontrar o desequilíbrio específico permissível, e a seguir multiplicá-lo pela massa do rotor e ter uma constante para converter U_{per} às unidades apropriadas (grama-milímetros ou ounce-inches). Esta etapa pode ser simplificada usando algumas equações simples para calcular diretamente U_{per} .

Etapa 3, alocando U_{per} , não é executada frequentemente porque não se compreende facilmente. Conseqüentemente, as seguintes páginas fornecem um método simplificado para etapa 2 e descrevem os procedimentos para etapa 3.

Tabela 1 Classes de qualidade de balanceamento para vários grupos dos rotores rígidos representativos

Classe de qualidade do balanceamento	Produto da relação $e_{per} \times \omega$ (1) (2) mm/s	Tipos de rotor - Exemplos Gerais
G 4.000	4.000	Virabrequins(3) dos motores diesel marinhos lentos, montados com números desiguais de cilindros(4)
G 1.600	1.600	Virabrequins de motores grandes rígidos montados, de dois cilindros
G 630	630	Virabrequins de motores grandes rígidos, de quatro cilindros Virabrequins de motores diesel marinhos elasticamente montados
G 250	250	Virabrequins de motores diesel rápidos, rigidamente montados, de quatro cilindros (4)
G 100	100	Virabrequins de motores diesel rápidos, com seis ou mais cilindros (4) Motores completos (gasolina ou diesel) para carros, caminhões ou locomotivas (5)
G 40	40	As rodas de carro, bordas da roda, conjuntos de roda, eixos da movimentação Virabrequins de motores rápidos de quatro ciclos elasticamente montados, com seis ou mais cilindros(4) Virabrequins de motores de carros, caminhões e locomotivas
G 16	16	Eixos da movimentação (eixos de hélice, eixos cardan) com exigências especiais Partes de máquinas de esmagar Partes da máquinas para agricultura Componentes individuais de motores (gasolina ou diesel) para carros, caminhões e locomotivas Virabrequins dos motores com seis ou mais cilindros sob exigências especiais
G 6.3	6.3	Partes de máquinas, de indústrias de processo Engrenagens principais de turbinas marinhas (serviço mercante) Centrífugas Rolos de máquinas de fabricação de papel, rolos de impressão Ventiladores industriais Rotores de turbina a gás, na aviação Volantes Bombas Impulsoras Máquinas ferramenta e partes gerais de máquinas Armaduras elétricas médias e grandes (de motores elétricos que têm ao menos 80 milímetros de altura do eixo), sem exigências especiais Armaduras elétricas pequenas, frequentemente produzidas em série, em aplicações tolerantes à vibração e/ou com montagens isolantes de vibração Componentes individuais dos motores, sob exigências especiais
G 2.5	2.5	Turbinas a gás e vapor, incluindo turbinas principais marinhas (serviço mercante) Cilindros e discos de memória de computador Turbo-compressores Movimentação de máquina-ferramenta Armaduras elétricas médias e grandes com exigências especiais Armaduras elétricas pequenas que não qualifiquem para uma ou ambas as circunstâncias especificadas na classe de qualidade G 6.3 Bombas a turbina
G 1	1	Turbinas a gás e vapor, incluindo turbinas principais marinhas (serviço mercante) Movimentações de gravador e fonógrafo de fita (gramophone) Movimentações de máquina de moer Armaduras elétricas pequenas com exigências especiais
G 0.4	0.4	Eixos, discos e armaduras de moedores de precisão Giroscópios

1) $\omega = 2\pi \cdot n/60 \approx n/10$, se 'n' é medido em rpm e ω em radianos por segundo

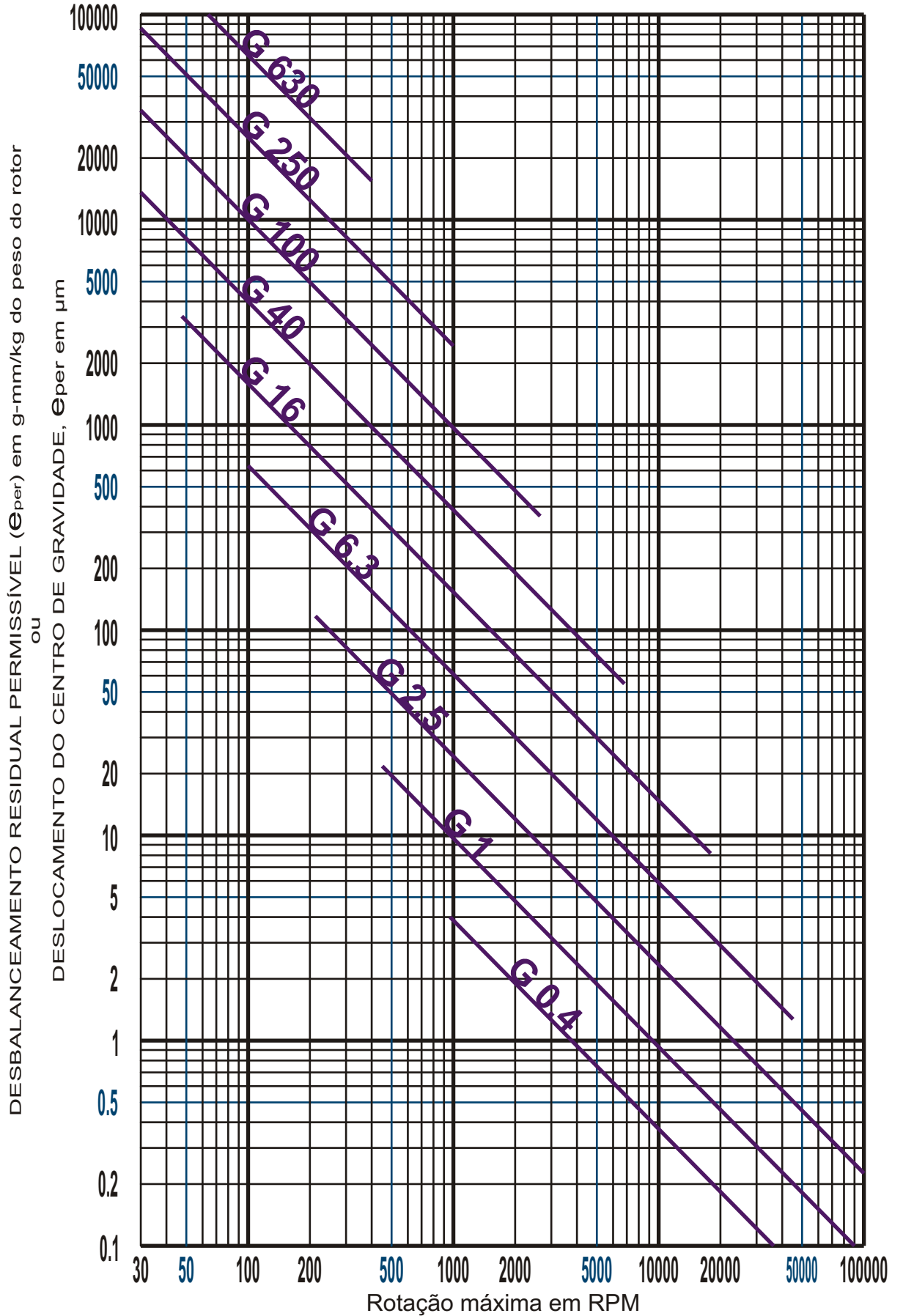
2) para alocar o desequilíbrio residual permissível aos planos da correção, consulte a "Alocação de U_{per} aos planos da correção."

3) um crankshaft/drive é um conjunto que inclui um eixo de manivela, um volante, uma embreagem, uma polia, um amortecedor da vibração, parte girante de um eixo de conexão, etc..

4) para as finalidades desta parte de ISO 1940/1, os motores diesel lentos são aqueles com uma velocidade do pistão de menor que 9 m/s; os motores diesel rápidos são aqueles com uma velocidade do pistão maior que 9 m/s.

5) nos motores completos, a massa do rotor compreende a soma de todas as massas que pertencem ao crankshaft/drive descrito na nota 3 acima.

FIG1-MÁXIMO DESBALANCEAMENTO RESIDUAL PERMISSÍVEL, e_{per}
(ISO 1940/1)



Balanceamento - Graus de qualidade

A figura 1 mostra os graus de qualidade do balanceamento para uma grande variedade e/ou tipo de rotores. O valor 'G + número' é o produto do desbalanceamento específico pela velocidade angular do rotor na velocidade nominal de operação, e é uma constante para rotores do mesmo tipo.

$$G = e \times \omega = \text{constante}$$

$$\omega = 2\pi n/60 \approx n/10, \text{ se 'n' é medido em rpm e } \omega \text{ em radianos por segundo}$$

Isto é baseado no fato de que rotores geometricamente similares girando à mesma velocidade têm esforços similares no rotor e nos seus apoios.

Os graus da qualidade de balanceamento são separados pelo fator 2.5. No entanto várias classificações 'G' para valores intermediários podem ser usadas para satisfazer requisitos especiais. Por exemplo, uma bomba standard tem grau sugerido de qualidade de G6.3, porém motivos especiais podem requerer um grau superior em qualidade como o G4, para satisfazer a sua instalação em áreas especiais.

Determinando o desbalanceamento residual permissível (U_{per})

$$U_{per} = e_{per} \times m$$

(m = massa do rotor)

O desbalanceamento residual permissível é uma função da faixa 'G__', do grau, do peso do rotor e da máxima velocidade nominal de rotação.

Em vez de usar o gráfico para calcular o valor do desequilíbrio específico para um valor de G, numa rotação determinada e então multiplicá-lo pelo peso do rotor, usando as unidades apropriadas do uso, U_{per} pode ser calculado usando a seguinte fórmula:

$$U_{per} \text{ (g-mm)} = 9549 \times G \times \text{Kg} / \text{RPM}$$

U_{per} : desbalanceamento permissível em gramas/milímetros.

(g-mm): o produto sempre o mesmo. Maior peso, menor raio. Menor peso, maior raio.

9549: constante para calcular com unidades em milímetros e quilogramas.

G: grau de tolerância. por exemplo 6,3

Kg: peso do rotor em quilogramas.

Exemplo: $9549 \times 6,3 \times 175 / 1100 = 9570 \text{ (g-mm)} (U_{per})$

raio de compensação: 180mm, por tanto $9570/180 = 53,17g$

por ser rotor simétrico $U_{per}/2 = 26,6g$ (desbalanceamento residual admissível por plano, a 180mm de raio)

Relocação de U_{per} nos planos de correção

U_{per} é o total permissível de desbalanceamento residual e deverá ser alocado nos planos de correção baseando-se nas dimensões e nas características do rotor.

Para rotores balanceados num só plano de correção, a totalidade de U_{per} deve ser aplicada ao único plano de correção.

Para rotores balanceados em dois planos de correção, U_{per} deve se distribuir em cada plano de correção baseando-se nas dimensões e nas características do rotor.

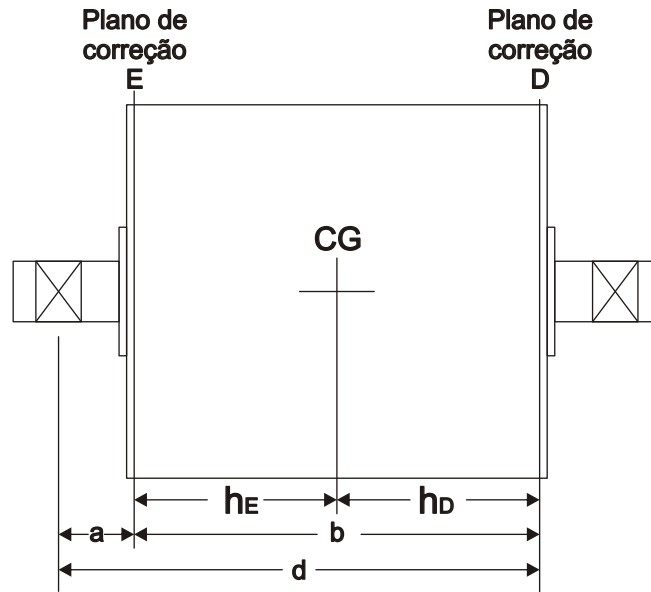


Fig. 2 Rotores Simétricos

Regras para rotores simétricos

1. Os dois planos de correção estão entre os apoios.
2. A distância 'b' é maior que 1/3 de 'd'
3. Os planos de correção são equidistantes ao centro de gravidade (CG)

$$U_{\text{per esquerda}} = U_{\text{per direita}} = U_{\text{per}}/2$$

Quando os planos de correção não estão equidistantes do centro de gravidade

$$U_{\text{per esquerda}} = U_{\text{per}} (h_D / b)$$

$$U_{\text{per direita}} = U_{\text{per}} (h_E / b)$$

O U_{per} da esquerda ou o U_{per} da direita nunca pode ser menor que 30% ou maior que 70% de U_{per} . Caso contrário use as regras para rotores estreitos.

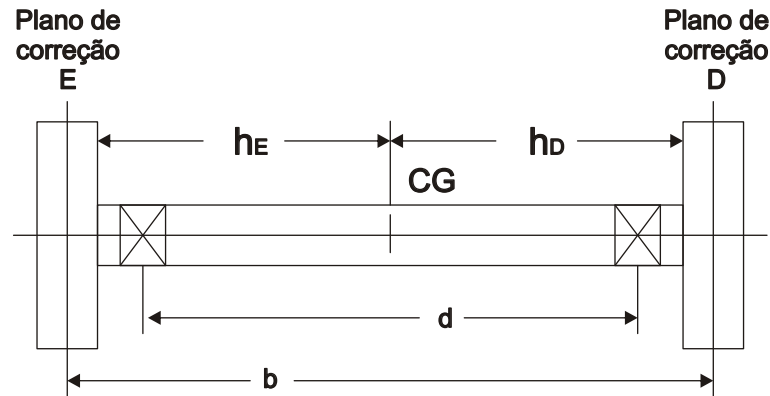


Fig. 3 Rotores com planos de correção 'externos'

Regras para rotores com planos de correção 'externos'

1. Ambos os planos devem estar 'por fora' dos apoios.
2. $b > d$

Ajustar U_{per} pelo raio d/b

$$U_{per} = U_{per} (d/b)$$

Quando os planos de correção não estão equidistantes do centro de gravidade:

$$U_{per} \text{ esquerda} = U_{per} (h_D / b)$$

$$U_{per} \text{ direita} = U_{per} (h_L / b)$$

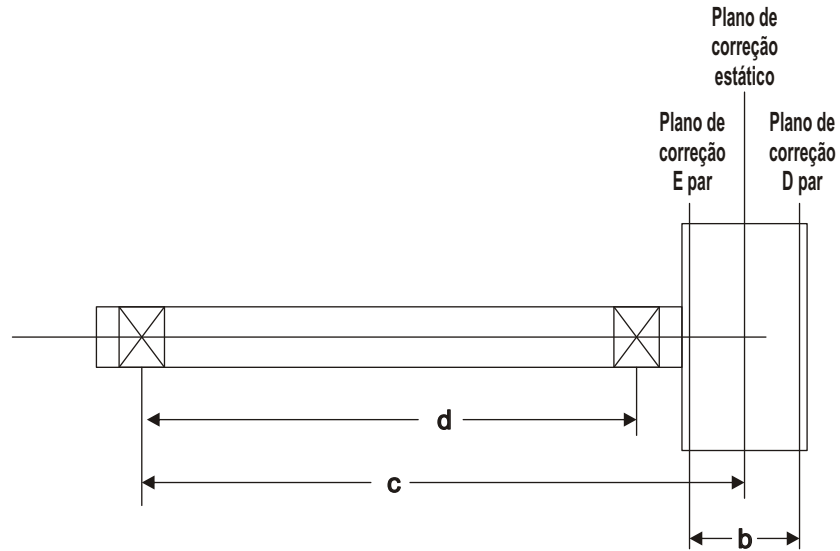


Fig. 4 Rotores com planos de correção 'em balanço'

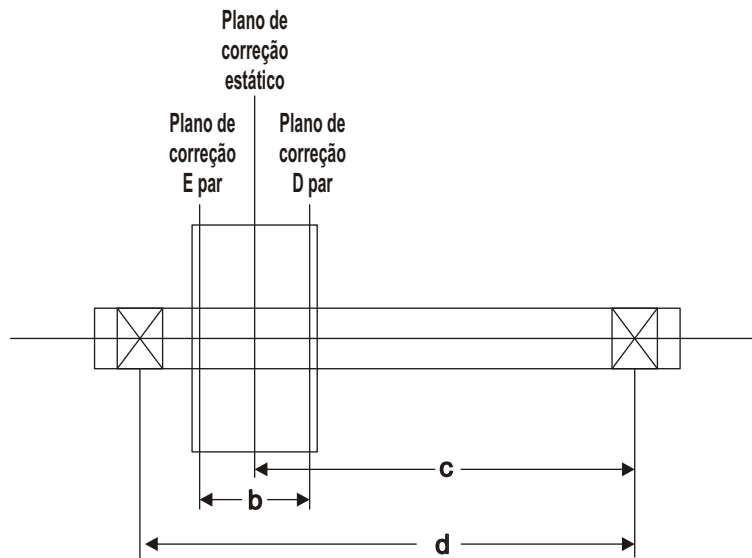


Fig.5 Rotores Estreitos

Regras para rotores estreitos ou com os planos de correção 'em balanço'

1. A distância entre os planos de correção é menor que 1/3 da distância entre os apoios.
2. Supõe-se cargas dinâmicas permissíveis iguais nos rolamentos.
3. Os pares de correções são feitas a 180°, separado em seus planos respectivos.
4. O plano para correções estáticas pode ser um terceiro plano ou qualquer um dos planos usados para correções dos pares.
5. Aloque U_{per} como o desequilíbrio residual da estática e dos pares como segue:

$$U_{per \text{ estático}} = U_{per}/2 \times d/2c$$

$$U_{per \text{ pares}} = U_{per}/2 \times 3d/4b$$

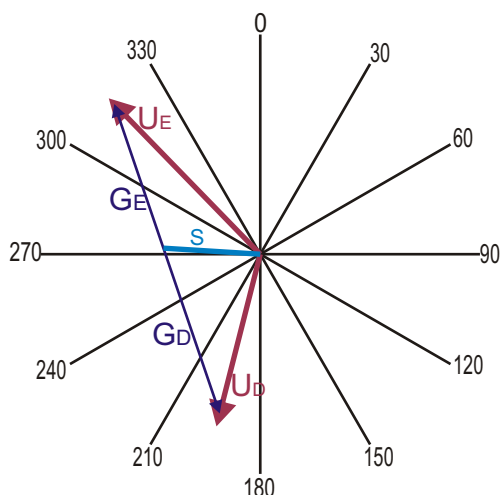


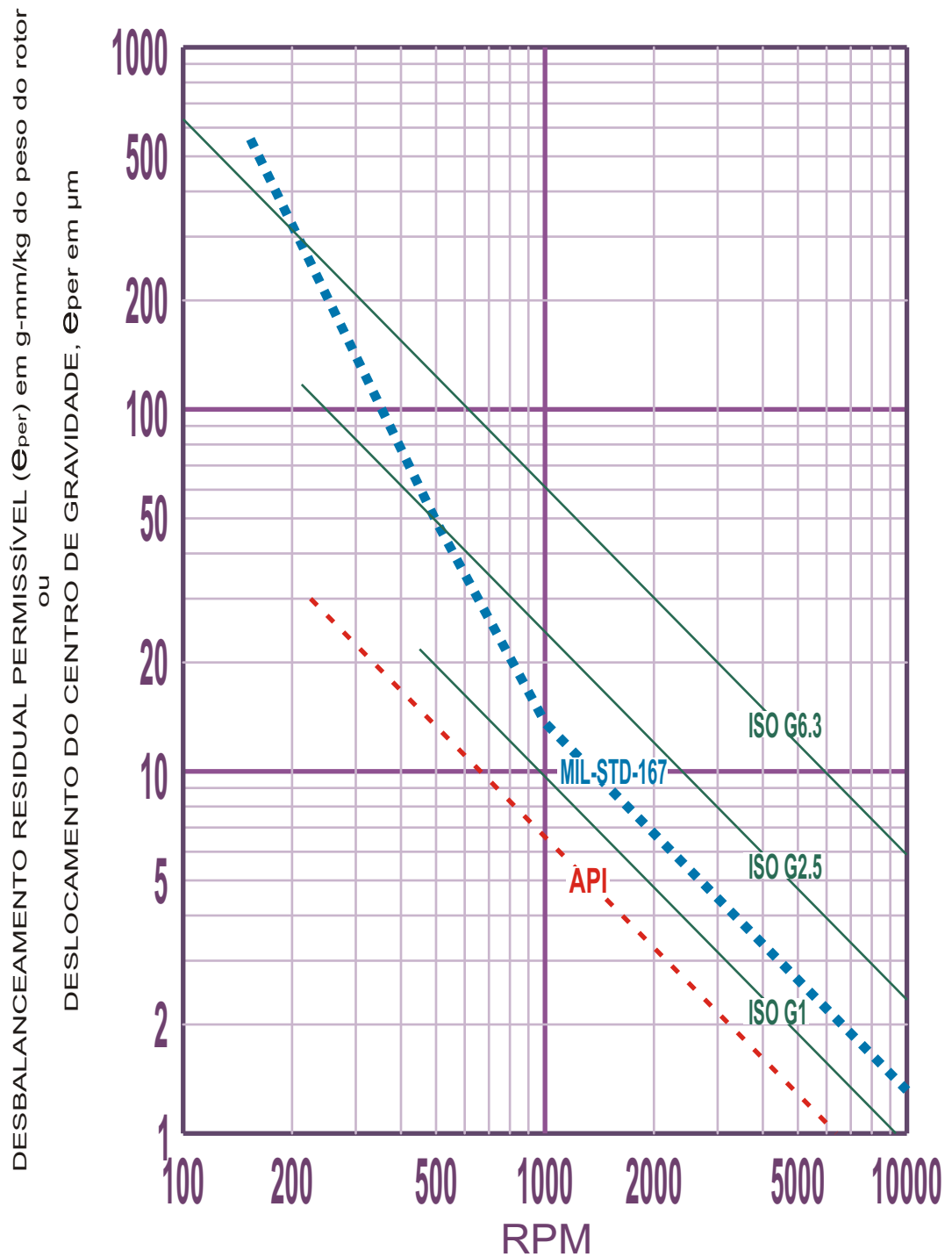
Fig.6 Derivação gráfica do par estático

Os alocamentos permissíveis do desequilíbrio para os rotores 'estreitos ou em balanço' requerem que os dois planos de correção do desequilíbrio estejam divididos em equivalentes de desbalanceamento estático e de pares. Isto pode ser feito graficamente traçando os dois vetores dos planos U_E e U_D como mostrado em figura 6.

Conecte os vetores U_E e U_D conforme mostrado.

O vetor da origem ao ponto médio do vetor C_E-C_D é o '1/2' do desequilíbrio estático do rotor. Os vetores C_E e C_D são os desequilíbrios dos pares.

Figura 7 - Comparação de tolerâncias entre as normas API, ISO & MIL-STD-167-1



COMPARAÇÃO DAS NORMAS

A pergunta freqüente é, "como comparar as classes de qualidade da ISO 1940/1, com outros padrões de balanceamento, tais como a API e a MIL-STD-167-1?"

Uma tabulação do gráfico e dos dados da comparação aparece na figura 7.

Três classes da ISO (6.3, 2.5 e 1.0), de MIL-STD-167-1 e de API, padrões de qualidade de balanceamento são comparados no formulário tabular e gráfico.

TERMINOLOGIA DE BALANCEAMENTO

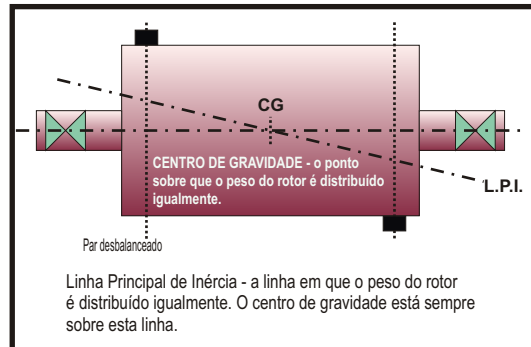
CLASSE de QUALIDADE - GXXX - para rotores rígidos, G, é o produto do desequilíbrio específico, e a da velocidade angular máxima de serviço do rotor.

A velocidade angular de serviço é o RPM de serviço expresso em radianos por segundo.

$$G = e \times \omega = \text{constante}$$

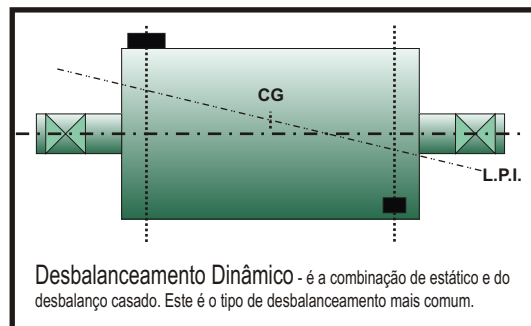
CENTRO DE GRAVIDADE (C.G.) - o ponto em um corpo através do qual a resultante dos pesos de suas partículas componentes passa para todas as orientações do corpo com respeito a um campo gravitacional

PLANO DE CORREÇÃO (BALANCEAMENTO) - plano perpendicular à linha central do eixo de um rotor em que a correção pelo desequilíbrio é feita.



DESBALANÇO CASADO - condição do desequilíbrio em que a Linha Principal de Inércia atravessa a linha central do eixo no centro de gravidade.

VELOCIDADE CRÍTICA - velocidade na qual a ressonância do sistema é excitada. A ressonância pode ser dos suportes do mancal (modalidade rígida) ou da deformação do rotor (modalidade flexional).



Desbalanceamento Dinâmico - é a condição de desbalanceamento onde a LPI não é paralela e nem se cruza com a linha central do eixo.

