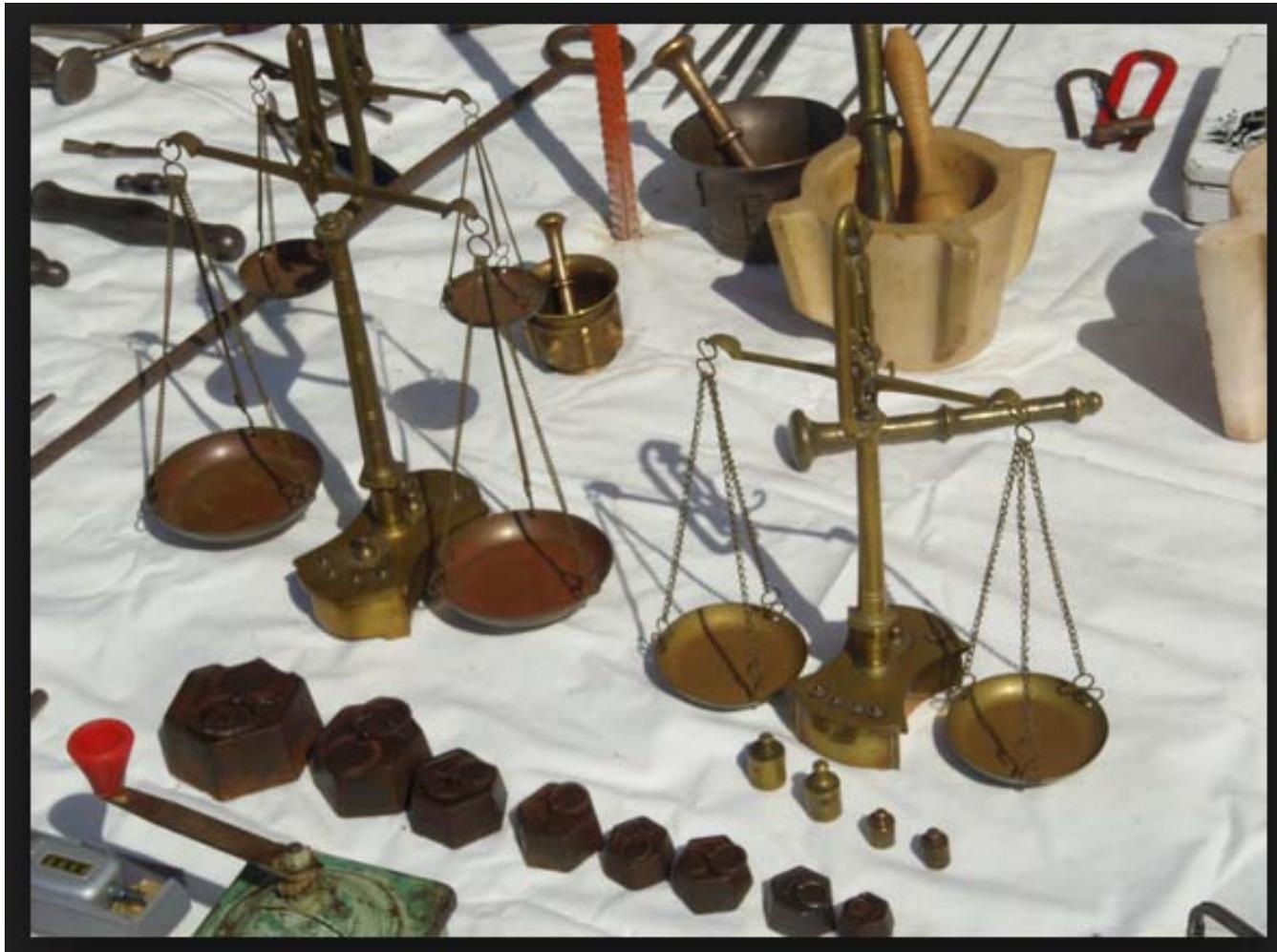


Capítulo 5 - Medição de massa e força



5.1 - Medição de massa

5.1.1 - Introdução

Massa é considerada uma grandeza fundamental, e seu padrão é um cilindro de platina-irídio, chamada o quilograma padrão, mantido em Sévres, França.



Outros padrões nacionais podem ser comparados com este padrão através de balanças de braços iguais (balanças analíticas) com uma precisão de uma parte em 10^7 , para massas de 1 kg.

Massas OIML (Organização Internacional de Metrologia Legal)

A OIML R 111 especifica forma, dimensões, valores nominais, natureza do material usado na construção de massas e atribui classes de exactidão: E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3, M1-2, M2-3.



As massas OIML são utilizadas para calibrar e verificar balanças e para calibrar massas de classe inferior.



Table 1 Maximum permissible errors for weights (\pm δw in mg)

Nominal value ^a	Class E ₁	Class E ₂	Class F ₁	Class F ₂	Class M ₁	Class M ₁₋₂	Class M ₂	Class M ₂₋₃	Class M ₃
5 000 kg			25 000	80 000	250 000	500 000	800 000	1 600 000	2 500 000
2 000 kg			10 000	30 000	100 000	200 000	300 000	600 000	1 000 000
1 000 kg		1 600	5 000	16 000	50 000	100 000	160 000	300 000	500 000
500 kg		800	2 500	8 000	25 000	50 000	80 000	160 000	250 000
200 kg		300	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000	60 000	100 000
100 kg		160	500	1 600	5 000	10 000	16 000	30 000	50 000
50 kg	25	80	250	800	2 500	5 000	8 000	16 000	25 000
20 kg	10	30	100	300	1 000		3 000		10 000
10 kg	5.0	16	50	160	500		1 600		5 000
5 kg	2.5	8.0	25	80	250		800		2 500
2 kg	1.0	3.0	10	30	100		300		1 000
1 kg	0.5	1.6	5.0	16	50		160		500
500 g	0.25	0.8	2.5	8.0	25		80		250
200 g	0.10	0.3	1.0	3.0	10		30		100
100 g	0.05	0.16	0.5	1.6	5.0		16		50
50 g	0.03	0.10	0.3	1.0	3.0		10		30
20 g	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5		8.0		25
10 g	0.020	0.06	0.20	0.6	2.0		6.0		20
5 g	0.016	0.05	0.16	0.5	1.6		5.0		16
2 g	0.012	0.04	0.12	0.4	1.2		4.0		12
1 g	0.010	0.03	0.10	0.3	1.0		3.0		10
500 mg	0.008	0.025	0.08	0.25	0.8		2.5		
200 mg	0.006	0.020	0.06	0.20	0.6		2.0		
100 mg	0.005	0.016	0.05	0.16	0.5		1.6		
50 mg	0.004	0.012	0.04	0.12	0.4				
20 mg	0.003	0.010	0.03	0.10	0.3				
10 mg	0.003	0.008	0.025	0.08	0.25				
5 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				
2 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				
1 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				

Inmetro - Calibração - Divisão de Metrologia Mecânica Lamas (Laboratório de Massa)

Massas-padrão para comparação direta:

1mg - 5g; Classe E1

10g - 1kg; Classe E1

2kg - 20kg; Classe E1

1mg - 5g; Classe E2

10g - 1kg; Classe E2

2kg - 20kg; Classe E2

1mg - 5g; Classe F1

10g - 1kg; Classe F1

2kg - 20kg; Classe F1

10kg - 50kg; Classe F1

100kg - 500kg; Classe F1

5.1.1 - Introdução

Existem, basicamente, dois tipos de balanças para medição da massa.

- Balanças mecânicas
 - Balanças analíticas ou balanças de dois pratos
 - Balanças de um prato
- Balanças eletrônicas

5.1.2 - Balanças mecânicas

5.1.2.1 - Balança de dois pratos:

Representação de uma das balanças utilizadas por Berzelius (primeiras décadas do Séc. XIX)



Balança de mesa de dois pratos em latão e base de madeira. Alemanha, 1910.



Balança de dois pratos em aço e base de granito. EUA, 1933.

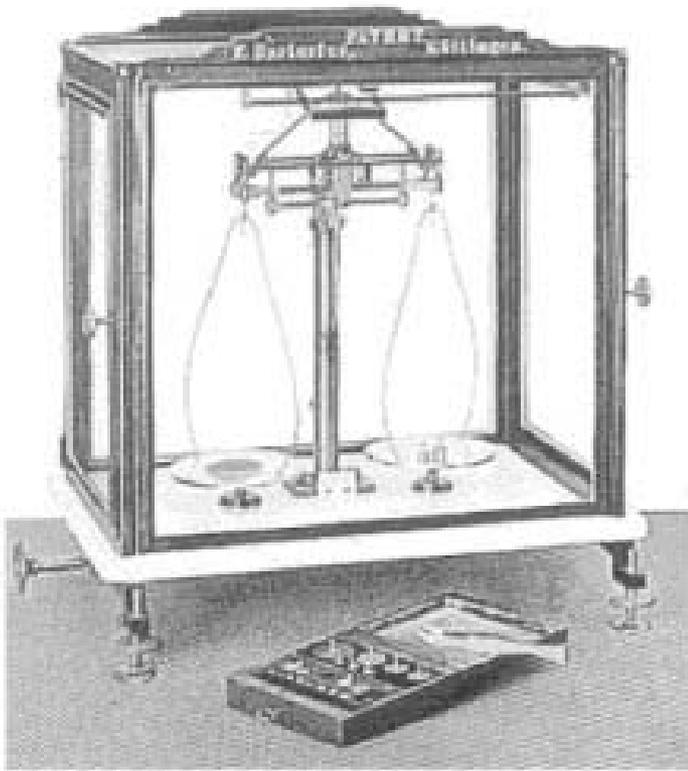
5.1.2.1 - Balança de dois pratos

Modelo de balança proposta por Sartorius em 1870.

Forma clássica da balança de dois pratos ao longo do séc. XX.

A balança de dois pratos é a mais antiga e tradicional balança analítica.

Possui dois pratos ligados a um travessão, a qual era suspensa pelo seu centro por um cutelo.

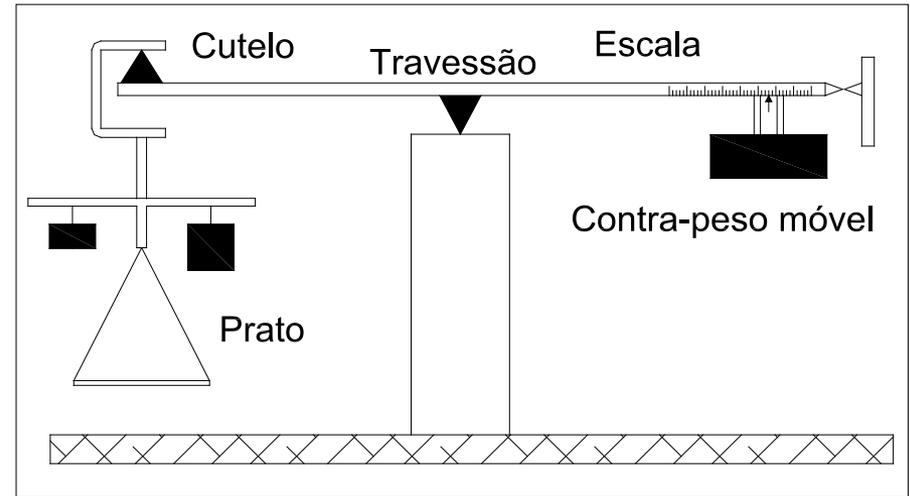
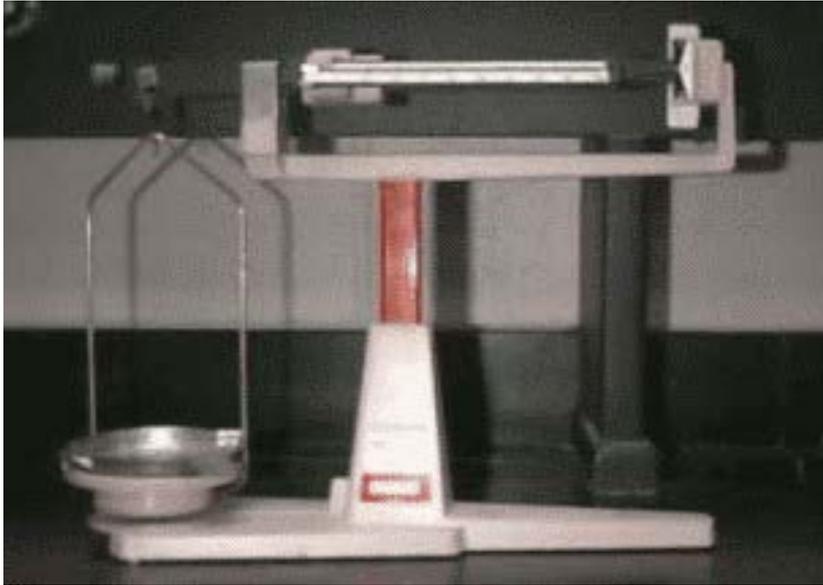


O objeto a ser pesado era colocado em um dos pratos e no outro prato utilizavam massas padrão para equilibrar o sistema assim medindo a massa.

O processo de equilibrar o sistema com massas é muito lento e tedioso.



5.1.2.2 - Balanças de um prato



Surgiu no mercado em 1946.

Sua praticidade de medição era muito superior à tradicional de dois pratos.

Atualmente fora de uso comum, mas durante muito tempo foi utilizada em medição geral de massa (comércio e indústria).

Balanças de um prato, construída em diversas dimensões e modelos para extensa faixa de medição.



5.1.3 - Balanças eletrônicas

Com o surgimento de elementos e circuitos eletrônicos foi possível o aperfeiçoamento dos diversos tipos de balança, além do desenvolvimento de novos sistemas de pesagem.



Balança Eletrônica Computadora Digital.

Projetada para a venda de produtos por peso.

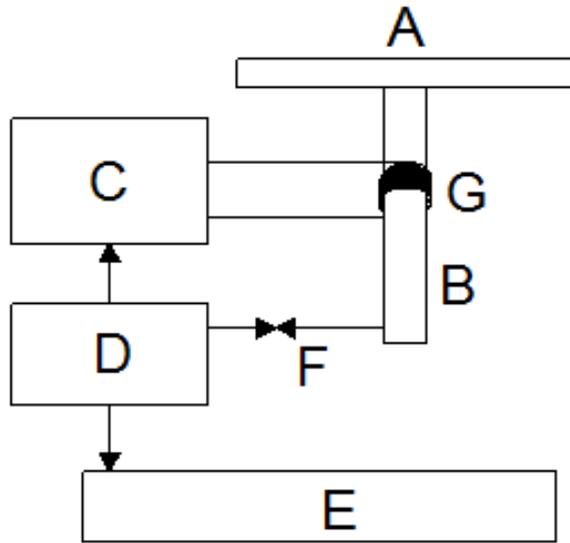
Algumas modernas balanças eletrônicas permitem não só a pesagem rápida e eficiente de produtos, como também o cálculo simultâneo de seu preço, em função da massa medida.



Balança Eletrônica de Bancada

Alta resolução de pesagem, boa exatidão, alta velocidade de resposta nas pesagens.

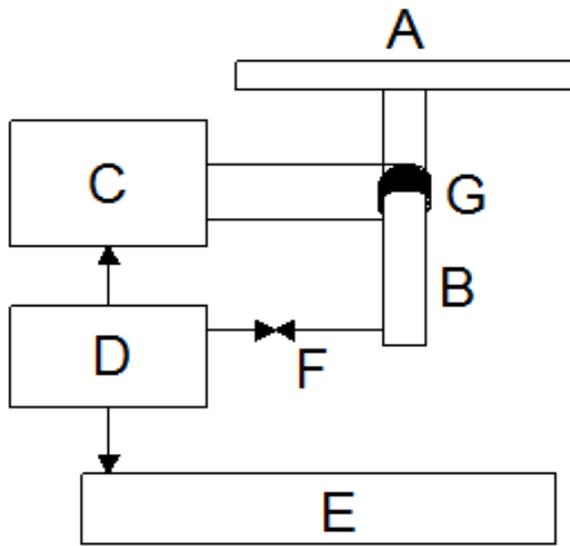
Um dos princípios usados nas balanças eletrônicas é a aplicação de uma força contrária de origem eletromagnética ao suporte do prato da balança.



- A - Prato da balança
- B - Cilindro metálico
- C - Fonte de corrente controlada
- D - Controlador eletrônico
- E - Indicador digital
- F - Sensor de posição
- G - Bobina

O prato fica sobre um cilindro metálico oco, envolto por uma bobina que se ajusta no pólo interno de um ímã cilíndrico.

Uma corrente elétrica na bobina cria um campo magnético que suporta ou levita o cilindro metálico, o prato, um braço indicador do sensor de posição e o objeto sobre o prato.



- A - Prato da balança
- B - Cilindro metálico
- C - Fonte de corrente controlada
- D - Controlador eletrônico
- E - Indicador digital
- F - Sensor de posição
- G - Bobina

A corrente é ajustada, de modo que o nível do braço indicador fique na posição nula quando o prato está vazio.

Quando um objeto é colocado no prato da balança, o deslocamento do cilindro para baixo deve ser compensado.

O braço indicador e o prato movem-se para baixo, o que diminui a quantidade de luz que atinge a fotocélula do sensor de posição.

Esta diferença de intensidade de luz na fotocélula é o sinal erro que alimenta o controlador eletrônico, cuja ação de controle atua sobre a fonte de corrente no sentido de aumentar a corrente que alimenta a bobina, criando assim um campo magnético maior, o que faz o prato voltar à sua posição original.

A corrente necessária para manter o prato e o objeto na posição nula é diretamente proporcional à massa do objeto somada a massa do prato e do cilindro.

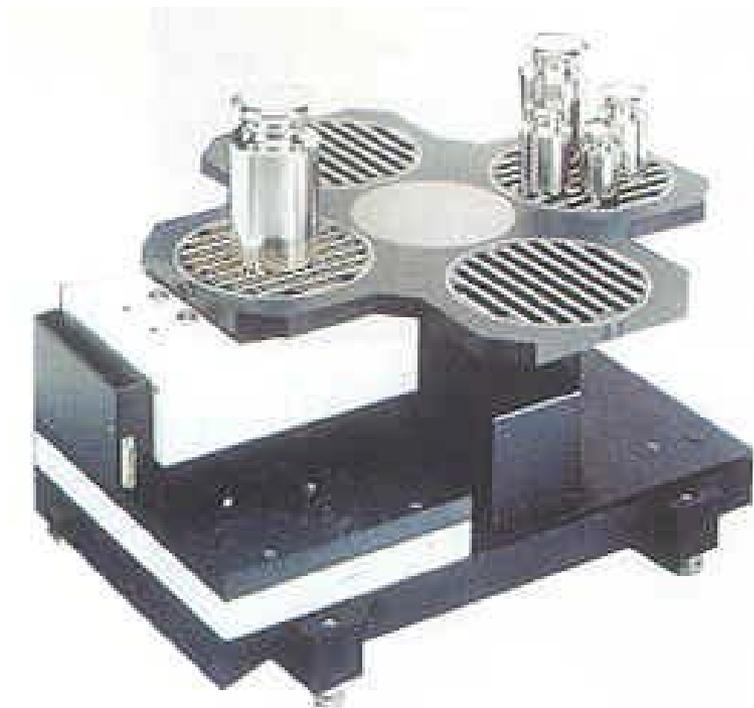
Um microprocessador converte a intensidade de corrente em massa, sendo mostrada no visor.

As balanças eletrônicas geralmente possuem um controle automático de tara, o qual permite a taragem, ou seja, permite ao display mostrar zero já com um peso adicionado (por exemplo, um frasco de pesagem).



A 1ª microbalança fabricada no Brasil, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), construída pelo Prof. François Karl Neitz, em 1968. Acervo do Museu da Química Prof. Athos da Silveira Ramos

As balanças eletrônicas são de vários tipos, com leituras de escala de várias quilogramas passando por 0,1 mg (micro-balança) até 0,1 μ g (ultra-microbalança).



Micro-balanças de incerteza de 0,1 mg

Balanças eletrônicas: exemplos de configuração e uso



Balança Rodoviária Eletromecânica

Deve atender as mais rígidas exigências em pesagem rodoviária.

Deve possuir alta durabilidade e baixo custo de manutenção ao longo do tempo.



Balanças Eletrônica de Tendal

Para aplicações de recebimento e expedição de produtos em frigoríficos, matadouros, açougues, supermercados e etc.



Sistema de Enchimento de Tambores e Baldes

Sistema automático de envase através do peso, não é necessário a correção da quantidade do produto em função de variações de viscosidade ou densidade por mudanças de temperatura.

Armazenagem de parâmetros de até 20 produtos.



Sistema Eletrônico de Pesagem de Fluxo

Sistema ideal para pesagem de produtos de fluxo livre, sólidos ou líquidos, proporcionando uma precisão de pesagem igual ou melhor a de uma balança estática, mantendo um fluxo contínuo de materiais.



Balanças Eletrônicas Modulares

Analíticas, de Precisão e de Alta Capacidade.

Com a flexibilidade de incorporar melhorias conforme a evolução do produto ou exigências da aplicação.



Balanças Eletrônicas Portáteis

Ideais para usuários que exigem exatidão em pesagem de pequenas amostras, conferência de embalagem de alimentos, pesagem e contagem de pequenas peças e etc.

5.1.4 - Fatores que influenciam a medição em balanças

A precisão e a confiabilidade das medições estão diretamente relacionadas com a localização da balança.

Os principais itens a serem considerados para uma medição confiável são:

- Características da sala de pesagem e da bancada
- Condições do ambiente
- Cuidados básicos
- Influências Físicas

5.1.4.1 - Características da sala de pesagem e da bancada

- Evitar a luz direta do sol e correntes de ar.
- Isolar choques e vibrações
- A bancada deve ser rígida, não podendo ceder ou deformar durante a operação de pesagem
- Ser anti-magnética (não usar metais ou aço) e protegida das cargas eletrostáticas (não usar plásticos ou vidros)

5.1.4.2 - Condições do ambiente

- Manter a temperatura da sala constante.
- Manter a umidade entre 45% e 60% (deve ser monitorada sempre que possível).
- Não pesar próximo a irradiadores de calor.
- Colocar as luminárias distantes da bancada, para evitar distúrbios (radiação). O uso de lâmpadas fluorescentes é menos crítico.
- Evitar pesar perto de equipamentos que usam ventiladores.

5.1.4.3 - Cuidados básicos

- Verificar sempre o nivelamento da balança.
- Deixar sempre a balança no modo *stand by*, evitando a necessidade de novo tempo de aquecimento (*warm up*).

5.1.4.4 - Influências físicas possíveis na medição

- A) Temperatura
- B) Variação de massa
- C) Eletrostática
- D) Magnetismo



5.2 - Medição de força

5.2.1 - Introdução

Existe uma correlação direta entre força e massa, dada pela segunda Lei de Newton, força resultante é igual a massa vezes aceleração.

Na calibração de sensores de força pode-se utilizar corpos de massas conhecidas (massas-padrão) para exercer sua força-peso sobre o medidor.

Desta maneira, é necessário conhecer a aceleração da gravidade, g , no local onde será utilizado o sensor de força, caso este seja calibrado com massas-padrão.

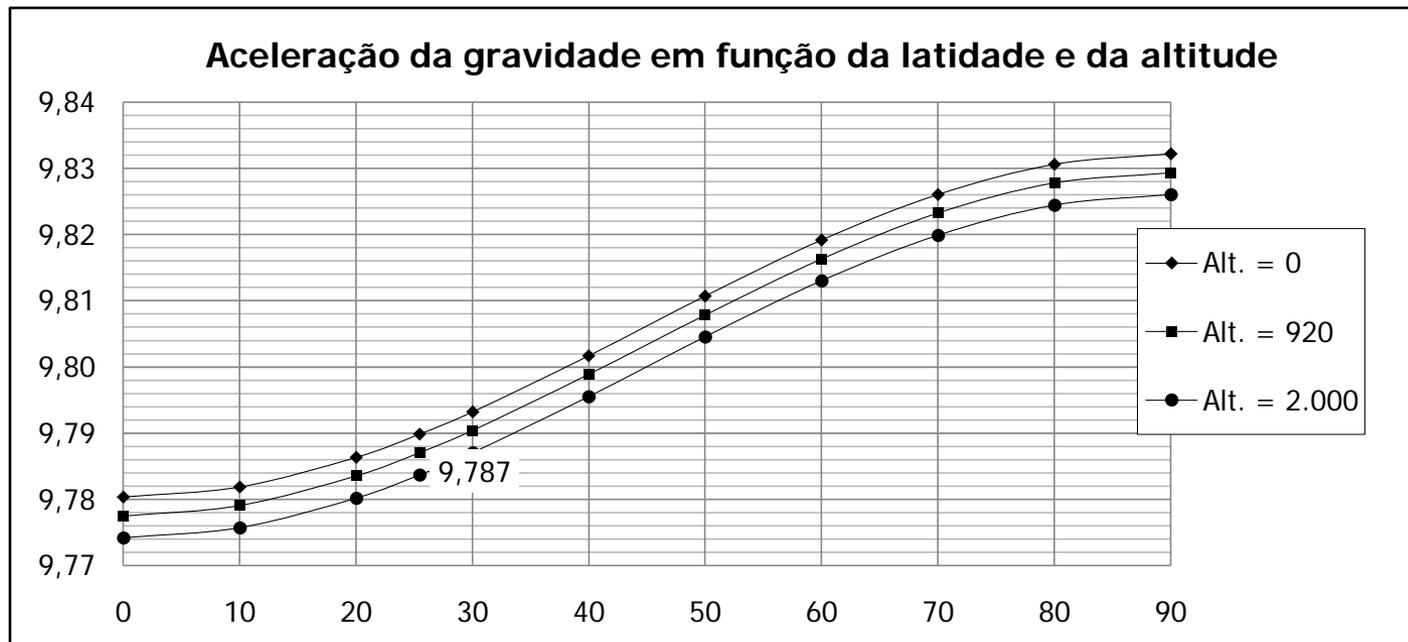
5.2.1 - Introdução

Segundo Hermert, a aceleração varia com a latitude e a altitude de acordo com a equação:

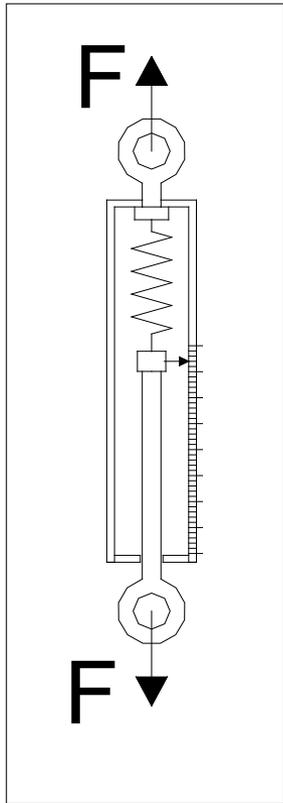
$$g = 9,80616 - 0,025928.\cos 2\phi + 0,000069.\cos^2 2\phi - 0,000003086.h$$

[m/s²]

onde ϕ é a latitude e h é a altitude em relação ao nível do mar no local.



5.2.2 - Dinamômetro de mola



Utiliza como princípio de funcionamento a propriedade da elasticidade linear dos materiais metálicos:

$$F = K \cdot x \quad [N] = [N/m] \cdot [m]$$

onde x é a deformação da mola de elasticidade K .

A escala na parte fixa do dinamômetro de mola é feita para indicar diretamente a força F , exercida nas extremidades.

Alguns modelos de dinamômetros

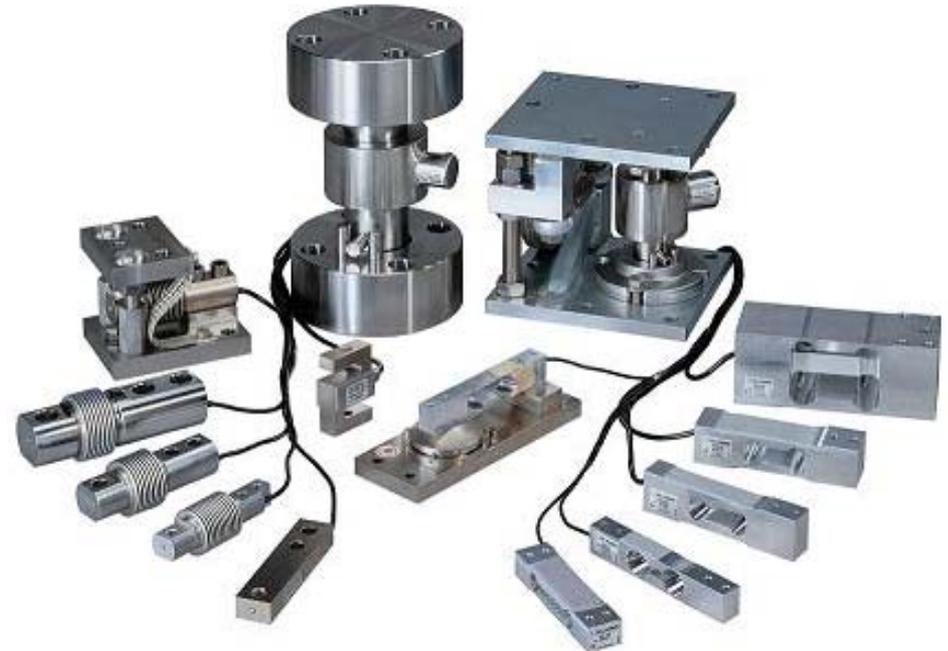


5.2.3 - Células de carga

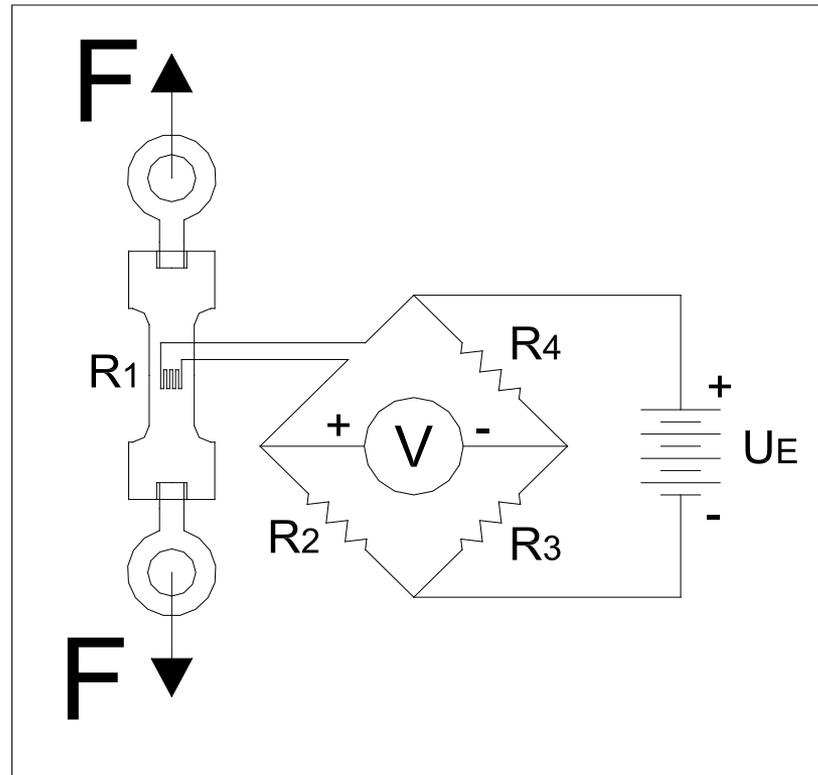
5.2.3.1 - Definição

Células de carga são transdutores de força que utilizam sensores de deformação (strain gages) para medir deformação de uma barra sob o efeito da força externa a ser medida, sendo este arranjo denominado célula de carga com strain-gage.

Existem diversos modelos de células de carga disponíveis no mercado, sendo as mais simples as do tipo barra sob tensão/compressão ou flexão



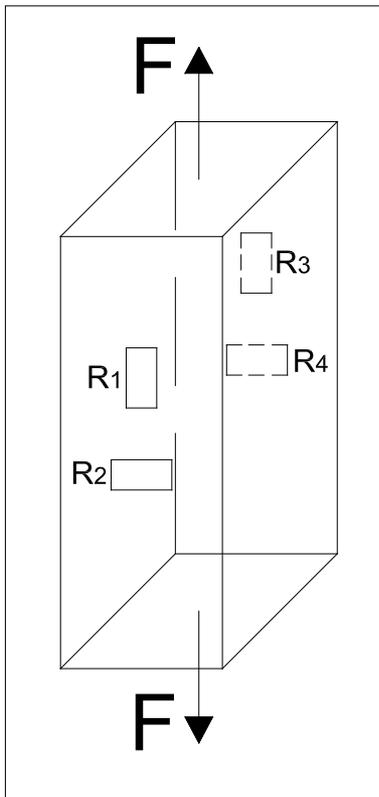
Normalmente utiliza-se o circuito em ponte de Wheatstone para medição da resistência, sendo o circuito mais simples aquele com um quarto de ponte, e o circuito mais utilizado com em ponte completa.



Um quarto de ponte (Quarter bridge)

5.2.3.2 - Equacionamento de uma célula de carga

A análise das características de uma célula de carga visa estabelecer a relação entre a grandeza a ser medida, no caso força aplicada, e a grandeza elétrica de saída, U_A/U_E , em mV/V, medida na ponte de Wheatstone.



Considerando o arranjo mais simples de uma barra sob tração (ver figura) para a célula, utiliza-se a relação tensão / deformação como base para o modelo:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \varepsilon = \sigma / E$$

ε = Deformação [m/m]

σ = Tensão [N/m²]

E = Módulo de elasticidade do material [N/m²]

Equacionamento de uma célula de carga

Deformação nos sensores:

$$\varepsilon_1 = \sigma \cdot E$$

$$\varepsilon_2 = -\nu \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_3 = \sigma \cdot E$$

$$\varepsilon_4 = -\nu \varepsilon_3$$

ν = Coef. de Poisson

Tração da barra:

$$\varepsilon_1, \varepsilon_3 > 0$$

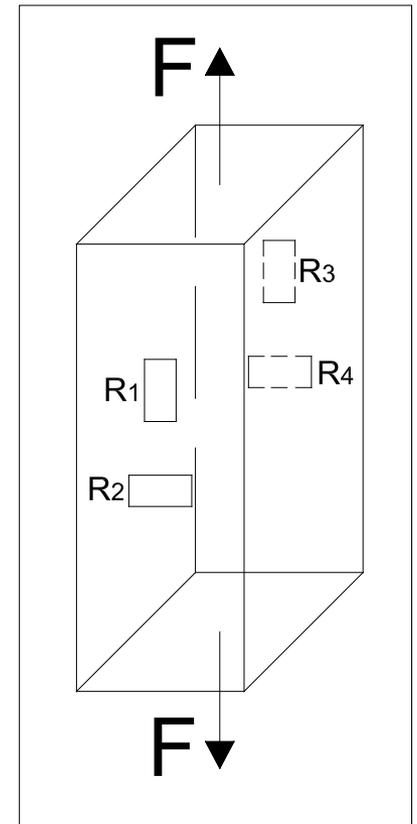
$$\varepsilon_2, \varepsilon_4 < 0$$

Compressão da barra:

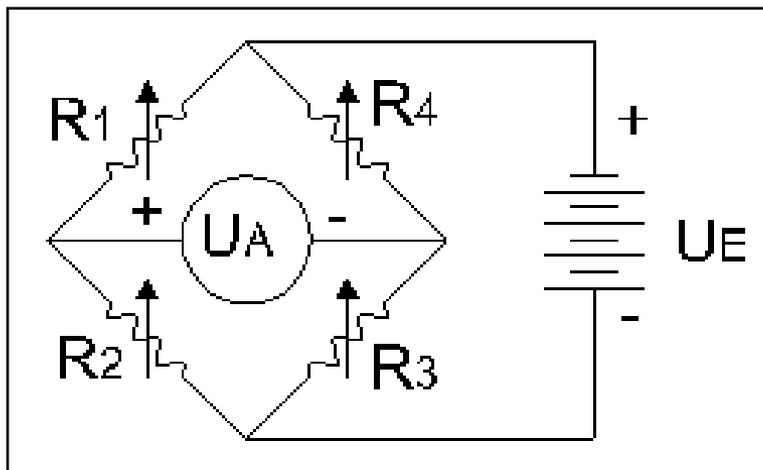
$$\varepsilon_1, \varepsilon_3 < 0$$

$$\varepsilon_2, \varepsilon_4 > 0$$

Para cada sensor a deformação será medida através da variação de resistência multiplicada pelo fator k :



$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$



A equação da ponte completa (full bridge) quando a variação da resistência é bem menor que o valor da resistência de cada sensor é:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Consequentemente:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Correlacionando as deformações através do coeficiente de Poisson:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_1 + \varepsilon_3 + \nu \varepsilon_3)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_1 + \varepsilon_3 + \nu\varepsilon_3)$$

Com $\nu = 0,3$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$, tem-se:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (2,6 \cdot \varepsilon)$$

Como $\varepsilon = \sigma/E$ e $\sigma = F/A$

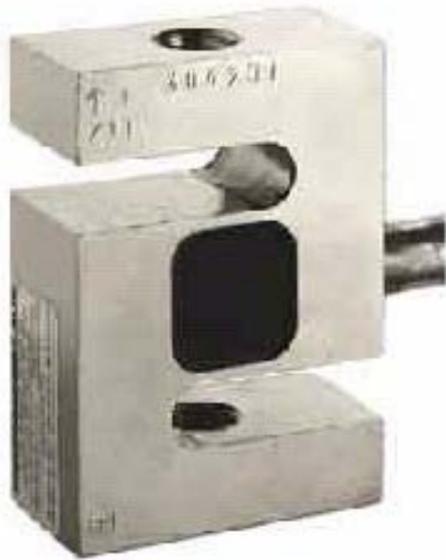
$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \left(2,6 \cdot \frac{F}{AE} \right)$$

Determina-se a força aplicada na célula de carga, que será medida a partir da indicação de U_A/U_E (medida elétrica).

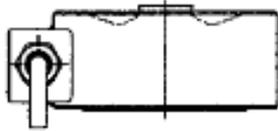
$$F = 1,538 \frac{AE}{k} \frac{U_A}{U_E}$$



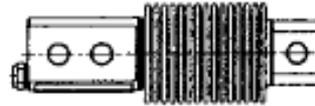
Configurações típicas de células de carga



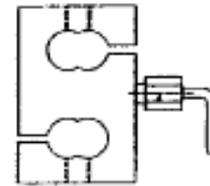
Configurações típicas de células de carga



C2A (1...10t)



Z6 (5...1000kg)



RSC (0.05 ... 5t)



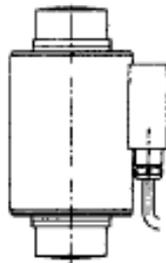
RTN (1...470t)



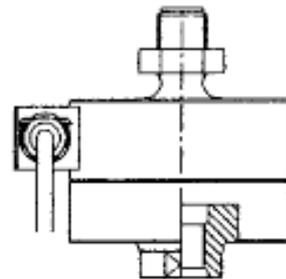
Z7 / HLC (0.5...10t)



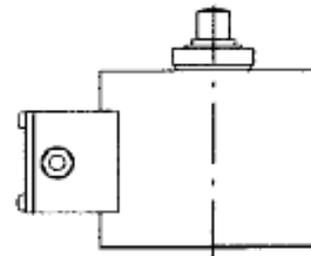
PW (3...660kg)



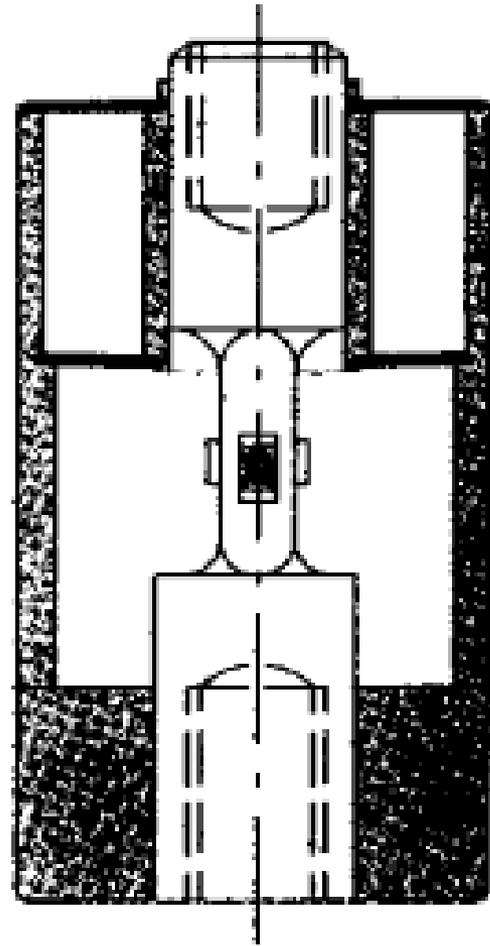
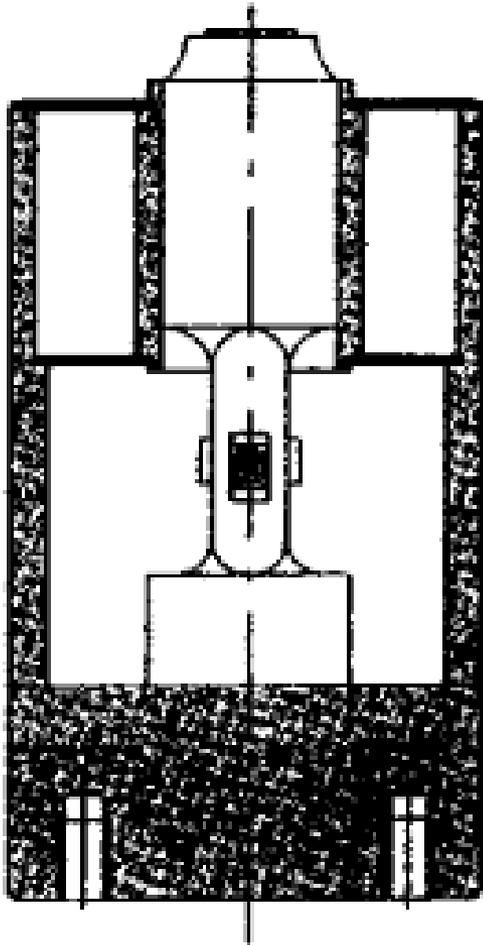
C16 (20...200t)

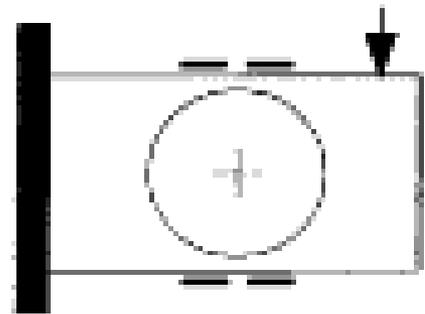
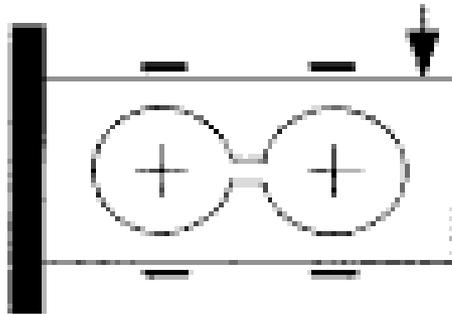
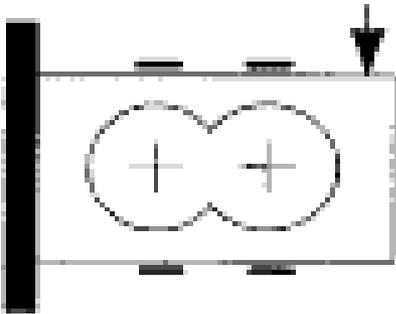
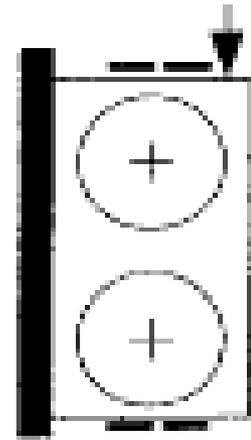
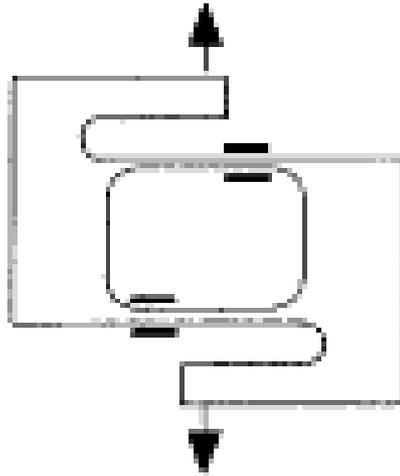
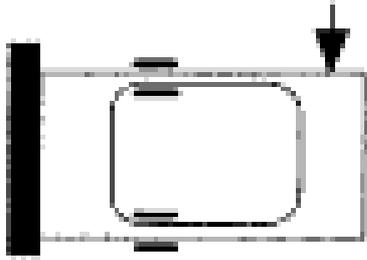


U2A (0.05...20t)



C1/C3 (1...500t)





Aplicações de células de carga

Célula de carga para Ponte Rolante

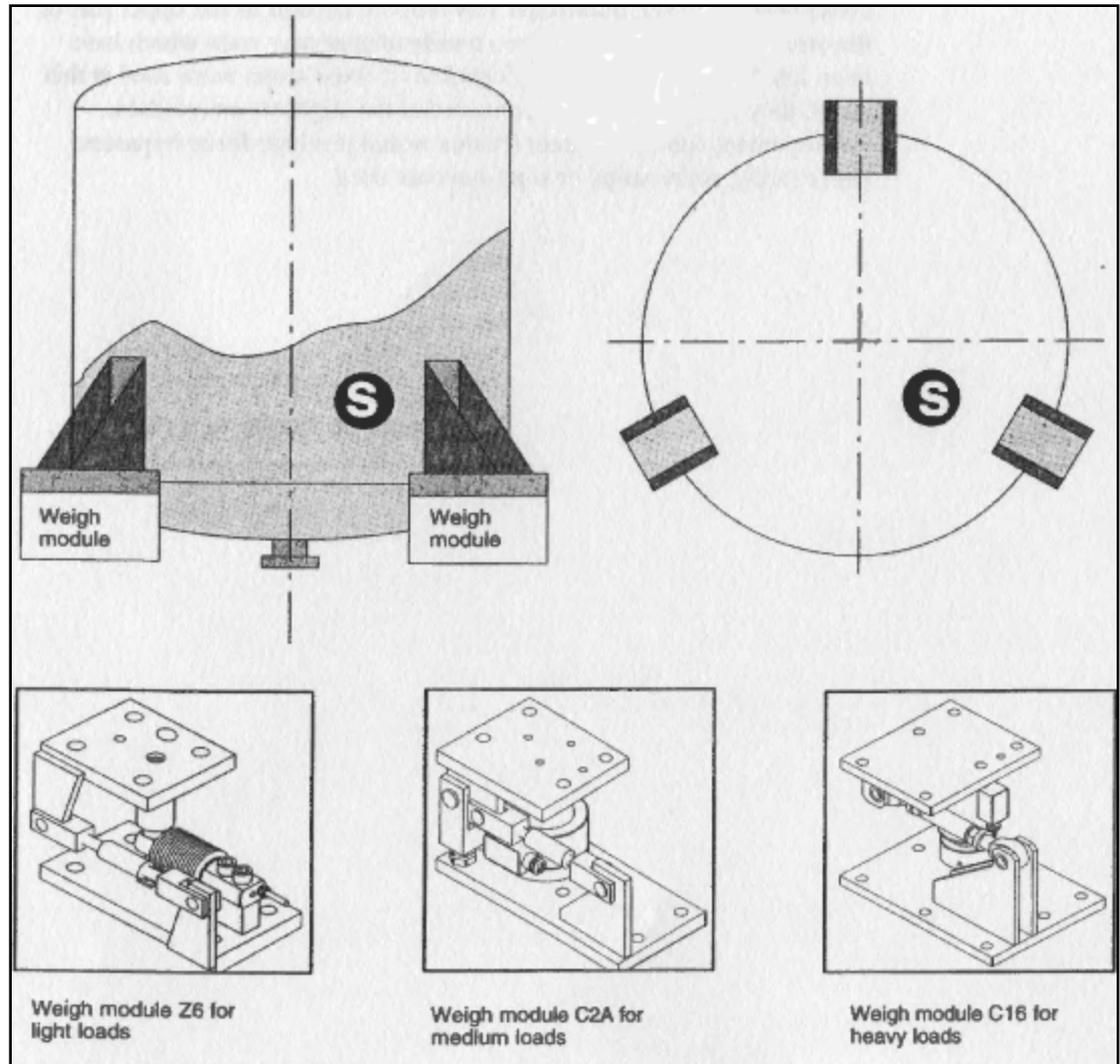
- Ideal para estimativa de peso em pontes rolantes
- Apresenta uma grande variedade de usos e facilidade de operação.



Aplicações de células de carga

Célula de carga para Tanques

- Facilita leitura de massa estocada.



Exemplo de cálculo

A célula de carga C16/60t possui sensibilidade nominal de 2mV/V (relação entre o sinal de saída pela tensão de excitação na carga máxima).

Conhecendo a voltagem de excitação e a sensibilidade de uma célula de carga é possível calcular a carga aplicada, medindo-se a tensão de saída.

Determine a carga aplicada para a célula C16 se a tensão de excitação for igual a 5 [V] e o valor medido da saída foi 4 mV.

