9ª lección: **Segunda Ley de Newton (1687). Sistemas no inerciales.**

Segunda Ley de Newton: Movimiento de una partícula.

$$\vec{R} = m \bullet \vec{a}_{abs.} \; \textit{(NEWTON, 1687)}$$

La primera edición del libro *PHILOSOPHIAE NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA* ("Los Principia") se hizo en Londres, en 1687, conservándose el original en el *Trinity College* de Cambridge. El *imprimatur* se dio en 1686.

Comentarios:

1° Se trata de una ecuación vectorial, por lo que es preciso proyectarla para obtener las ecuaciones escalares.

Dado que es una ecuación vectorial, las magnitudes que aparecen en ella son vectores y en consecuencia, tienen características, esto es: módulo, dirección, sentido y punto de aplicación. Esto significa que para obtener las ecuaciones escalares se necesita representar dichos vectores. Surgen así el diagrama de fuerzas (D. de FF.) y el de aceleraciones (D. de AA.)

D. de FF. D. de AA.

2° En el D. de FF. deben estar todas las fuerzas (Recuerde: Fuerza es la acción de un cuerpo sobre otro, BEER y JOHNSTON, p.11) que actúan sobre la partícula, por lo que hay que aislarla.

Sólo hay dos tipos de fuerzas, las que se ejercen por contacto directo y las que se ejercen a distancia. Entre las primeras, la acción del aire, pero como la mayor parte de los experimentos se realizan en el vacío no intervienen tales fuerzas.

Otras fuerzas por contacto directo son las reactivas, esto es las causadas al eliminar las coacciones que ejerce la forma de apoyar los cuerpos o estructuras, etc. En un estudio de partícula no se tienen en cuenta, salvo que la partícula esté unida a un cable, muelle o similar.

A distancia sólo hay dos fuerzas: la gravitatoria y la electromagnética. La primera es causada por la supresión del planeta Tierra que actúa sobre todos los objetos situados en el entorno de su campo de acción y la segunda, por el campo electromagnético, si existiera, que no suele.

3° En D. de AA. habría que calcular la aceleración absoluta (Sistema de referencia inercial, (Véase, más adelante, el apartado "FUERZAS DE INERCIA").

En 2D:

$$\vec{a} = \ddot{x} \bullet \vec{i} + \ddot{y} \bullet \vec{j}$$ cartesianas

¡Error! Marcador no definido.

intrínsecas

Las componentes de la aceleración en cartesianas deben ir siempre en el sentido positivo convencionalmente elegido para los ejes: positivo hacia la derecha y hacia arriba. Sólo así se podrá utilizar los resultados obtenidos en el estudio del movimiento rectilíneo (Lección 6ª: Cinemática del movimiento rectilíneo y del curvilíneo, www.unileon.es, BIBLIOTECA, RECURSOS ELECTRÓNICOS, BULERÍA).

La elección de uno u otro sistema para la expresión de la aceleración tiene algunas pautas que suelen ser concluyentes, a la vez que ignorarlas puede conducir a un planteamiento erróneo del problema o ejercicio, que las más de las veces supondrá complicar -si no imposibilitar-, su resolución.

Así, se deberá emplear cartesianas en el diagrama de aceleraciones cuando se desee estudiar aspectos del movimiento en general. Hay que darse cuenta que las componentes cartesianas de la aceleración son derivadas segundas de la variable posicional que definirá el movimiento real al proyectarlo sobre los ejes y que, al integrarlas, resultarán las respectivas LL.HH. del movimiento, es decir x=x(t) e y=y(t).

Es evidente que si se conoce la LH de un movimiento se puede conocer todo de él: vector velocidad y vector aceleración. Si se elimina el tiempo de las LL.HH. se obtiene la trayectoria y=y(x), y con ella, el radio de curvatura en cualquiera de sus puntos.

Se utilizarán las coordenadas intrínsecas cuando los datos hablen del radio de curvatura (ρ), o del módulo de la velocidad o de su variación temporal.

4° La masa de la 2ª Ley se denomina inercial y a partir de ahora se identificará con la gravitacional. Comentar la influencia de la hipercarga (EL PAÍS, ABC,…) que cuestionaría dicha equivalencia, probada por Eötvös en 1901 y asumida como hipótesis por Einstein en su teoría de la relatividad general (Principio de equivalencia, SERWAY, 101,102).

5° Aplicaciones. Determinación del **movimiento**, ya que se obtiene el vector aceleración, por ello es por lo que debe elegirse una posición genérica de la partícula para la obtención de los diagramas.

Determinación de una fuerza o de una aceleración y si se utilizan intrínsecas, de una velocidad, de un radio de curvatura o de la variación temporal de la primera. Todo ello deberá hacerse a partir de los diagramas en posiciones determinadas, aunque también podrían obtenerse las magnitudes anteriores en posiciones generales, pero es poco frecuente que así se solicite.

6. Restricciones de la formulación. Si en el segundo miembro había que escribir, como se dijo, el vector aceleración absoluta, ello da entrada al movimiento relativo (BEER y JOHNSTON pp.981-983), lo que conduce a que, como observador no inercial que es quien está vinculado a la Tierra y se mueve con ella, en el

segundo miembro de la segunda ley de Newton de un observador no inercial aparecerá "$\vec{a}_{relativa}$", mientras que en el primero, además de las fuerzas de las que se conoce al cuerpo que las causa (BEER y JOHNSTON, p. 11), habrá que añadir la fuerza de inercia de arrastre y la fuerza de inercia de Coriolis (Véase, más adelante, el apartado "FUERZAS DE INERCIA").

$$\vec{R}^* = m \bullet \vec{a}_{relativa} \ (NEWTON, 1687)$$

siendo $\vec{R}^*$ la suma de las fuerzas que responden a la definición correspondiente (BEER y JOHNSTON, p. 11), junto con las dos fuerzas de inercia y $\vec{a}_{relativa}$, la aceleración que calcula el observador ligado a la Tierra (No inercial).

No obstante, en las aplicaciones convencionales de la 2ª Ley de Newton, no se considerarán las fuerzas de inercia y en cuanto a la aceleración que se escribe en el segundo miembro, siendo en realidad $\vec{a}_{relativa}$, se considerará como absoluta. Resulta con ello que dado que son pequeños los errores que se cometen en dichas aplicaciones al hacerlo así, la formulación que se utilizará será la conocida:

$$\vec{R} = m \bullet \vec{a}$$

que no siendo realmente la 2ª Ley de Newton, como se ha explicado, la identificaremos así.

Por último, la forma convencional de la 2ª Ley de Newton sólo es válida para velocidades mucho menores que la de la luz. Tal restricción se da, como se ha dicho, en las aplicaciones propias de la ingeniería civil terrestre, no así, p.e., en las aeroespaciales en las que será obligado aplicar (CELEMÍN MATACHANA, pp.141-142):

$$\vec{R}^* = m \bullet \vec{a}_{relativa} \ (NEWTON, 1687)$$

7. En realidad, La 2ª Ley fue formulada por Newton en la forma: $\vec{R} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$ en la que el concepto clave es el *momentum*, es decir, el momento, que es la cantidad de movimiento, el producto de la masa de la partícula por su vector velocidad.

En esta formulación, la 2ª ley no sólo es aplicable para velocidades próximas a la de la luz, también lo es para sistemas de masa variable, tales como el movimiento de un cohete (SWARTZ, C.E. and MINER, T., p. 159).

PRIMERA LEY DE NEWTON

"Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser en tanto que sea obligado por fuerzas impresas a cambiar su estado" Ley Primera, Principia, p. 135 Alianza Universidad.

Esta es la denominada Ley de la inercia, que Beer y Johnston (p.30), definen como: "Si la fuerza resultante que actúa sobre una partícula es nula, la partícula permanecerá en reposo (si estaba inicialmente en reposo) o en movimiento rectilíneo uniforme si estaba en movimiento ". Ejemplo: experimento de Millikan.

Demostrar.

MOVIMIENTO PARABÓLICO: ESTUDIO GENERAL

1° Estudio de un movimiento⇒ 2ª Ley de Newton⇒ D. de FF.(En el vacío, la única fuerza actuante en una posición cualquiera es la acción a distancia de la Tierra, o sea, el peso) y D. de AA (Cartesianas).

2° Integración de las ecuaciones escalares asociadas.

3° Representación de las gráficas x=x(t) e y=y(t).

4° Obtención de las leyes del movimiento curvilíneo.

$$\vec{r}(t) = x(t) \bullet \vec{i} + y(t) \bullet \vec{j} = (v_0 t \cos\alpha)\vec{i} + (v_0 t \sin\alpha - \frac{1}{2} g t^2)\vec{j}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{d}{dt}\vec{r}(t) = \dot{x}(t) \bullet \vec{i} + \dot{y}(t) \bullet \vec{j} = v_0 \cos\alpha \bullet \vec{i} + (v_0 \sin\alpha - gt) \bullet \vec{j}$$

5° Ecuación de la trayectoria

$$y = x tg\alpha - \frac{1}{2} g \frac{x^2}{v_0^2 \cos^2\alpha}$$

Parábola, representación (Johnson, TPI).

6° Altura máxima

6.1. Cálculo del extremo de la trayectoria parábola y´(x)=0, se deduciría así la abscisa.

6.2. Cálculo del extremo de y=y(t), con lo que se obtiene directamente el instante en el que se alcanza el máximo.

6.3. Imponiendo $v_y = 0$, es decir $\dot{y}(t) = 0$

$$x_{máx} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g} \quad ; \quad y_{máx} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} \quad ; \quad t_{máx} = \frac{v_0 \sin\alpha}{g}$$

7° Alcance máximo

7.1. Calculando la intersección de la trayectoria con la ecuación que representa el perfil del terreno (se obtendrá así la abscisa x_{max}).

7.2. Resolviendo el sistema de ecs. formado por y=y(t) y la ecuación del terreno (Se deduciría el instante temporal en el que se alcanza x_{max}).

7.3. Análisis de la variación del ángulo de lanzamiento (Este análisis suele hacerse suponiendo que el terreno es horizontal y pasa por el punto de lanzamiento, es decir, se hace y=0, obteniéndose:

$$x_{max}= (V_0)^2 \text{ sen}(2\alpha)/ g$$

7.4. Mediante $x_{max}=V_0^2\text{sen}2\alpha/(g)$ y ya que $\text{sen}(2\alpha)=\text{sen}2(90-\alpha)$ probar que

$$x_{max}(\alpha)= x_{max}(90- \alpha)\text{, GALILEO.}$$

7.5. Influencia de la "h".

"h" sería la eventual cota del punto de lanzamiento sobre el terreno.

8. Revisión de máximos: α=45°, maximiza el alcance; α=56.46°, la trayectoria *(On Projectile Motion, TPT, Vol. 37, Feb. 1999, p. 86)*,**Curso de Cinemática y dinámica newtoniana, CPR 2001** y α=60°, el área encerrada por ésta. (*Another look at projectile motion,* TPT, Oct. 2000, p.423.) **Curso de Mecánica, CPR 2000.**

MOVIMIENTO DE UN VEHICULO EN UNA CURVA CIRCULAR

Caso I: alineación recta-curva circular plana y lisa.

Diagramas en punto de tangencia (Plano normal a la carretera)

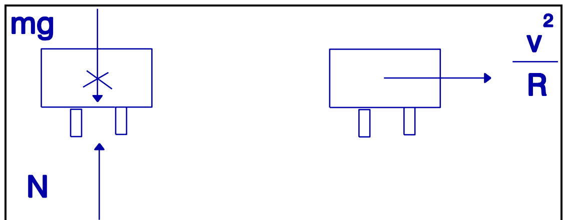


Ilustración 1: Caso I, D. de FF. (Izqda), D. de AA.

Caso I: $\mu=0$, $\alpha=0$

Caso II: Alineación recta-curva circular plana rugosa

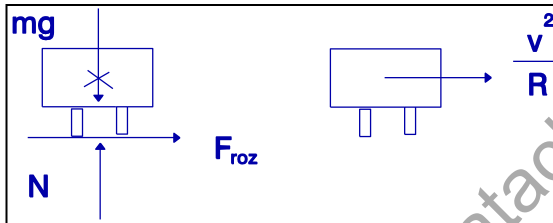


Ilustración 2: Caso II, D. de FF. (Izqda.) y D. de AA.

Caso II: $\mu \neq 0$, $\alpha = 0$

$$v = \sqrt{\mu_T \bullet R \bullet g}\,;\ \mu_T = 0.2, R = 60m, v = 39.03$$

Caso III: Carretera con compensación total del peralte.

$$V = \sqrt{(R \bullet g \bullet \tan(\alpha)}$$

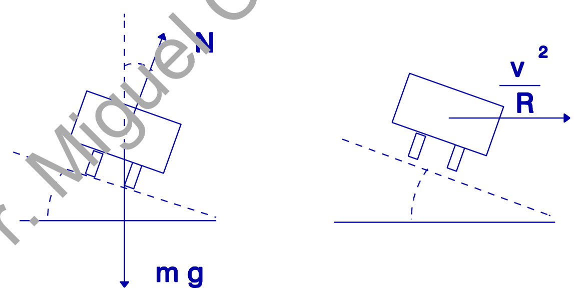


Ilustración 3: Caso III, D. de AA. (Dcha.). OBSERVE LA DIRECCIÓN DEL VECTOR ACELERACIÓN.

$$V = \sqrt{(R \bullet g \bullet \tan(\alpha)}\ R = 60m\ p = 10\%\ \alpha = 5.7^{\circ}\ V = 27.6\ km/h$$

Caso IV: Carretera rugosa peraltada. Velocidad mínima.

$$V_{mínima} = \sqrt{R \bullet g \bullet \tan(\alpha - \varphi)}$$

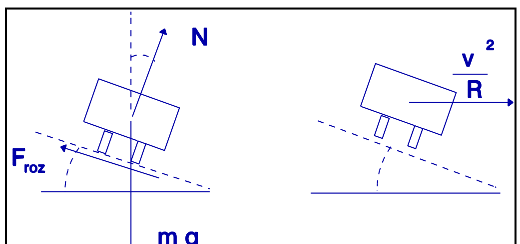


Ilustración 4: Caso IV, D. de AA. (Dcha.). OBSERVE LA DIRECCIÓN DEL VECTOR ACELERACIÓN.

Caso IV: $\alpha \neq 0$, $\mu \neq 0$, v_{min}

Caso V: Carretera rugosa peraltada. Velocidad máxima.

¡Error! Marcador no definido. Ilustración 5: Caso V, D. de AA. OBSERVE LA DIRECCIÓN DEL VECTOR ACELERACIÓN.

$$V_{máxima} = \sqrt{R \bullet g \bullet \tan(\alpha + \varphi)}$$

Caso V: $\alpha \neq 0$, $\mu \neq 0$, v_{max}

$$v = \sqrt{R \bullet g \bullet \tan(\alpha + \phi)},\ \mu_T = 0.2,\ \phi = 11.3'',\ p = 10\%,\ \alpha = 5.7^{\circ},\ R = 60m$$

$$v = 48.3\ km/h,\ incremento\ del\ \ 24\%$$

Incremento de velocidad implica el incremento de radio de curvatura, ya que el incremento de peralte está limitado por el deslizamiento hacia el interior de la curva.

$$\mu_T = \tan\phi = 0.15\ a\ 0.20,\ \ p = \tan\alpha = 0.08\ a\ 0.10,$$

$$\tan(\alpha + \varphi) \approx \tan\alpha + \tan\varphi = \mu_T + p = f + p$$

$$\frac{v^2}{R} = g \bullet \tan(\alpha + \varphi), aproximadamente, \tan(\alpha + \varphi) = \frac{\tan\alpha + \tan\varphi}{1 - \tan\alpha \bullet \tan\varphi}$$

$$\frac{v^2}{R} = g \bullet f + g \bullet p$$

Si se denomina f a $\tan\varphi$ y p a $\tan\alpha$, se obtiene:
gf: aceleración centrípeta aportada por el rozamiento,
gp: aceleración centrípeta aportada por el peralte.

gp está limitado por razones técnicas, gp_{max}= 0.1 g
gf está limitado por razones de seguridad y comodidad del usuario.

f<<μ (neumáticos gastados, calzada húmeda, velocidad específica).

$gf_{max,\ seguridad}$= 0.4 g

Sin embargo, gf es precisamente la aceleración que soporta el usuario. Desde este punto de vista el umbral de aceleraciones admisibles se sitúa en 0.1-0.2g, ocasionalmente en 0.3g, rara vez superiores a 0.4g y claramente molesta cuando es próxima a 0.5g.

$gf_{max,\ comodidad}$= 0.2g.

En consecuencia, la máxima aceleración centrípeta no debe superar el valor 0.1g+0.2g= 0.3g, por lo que si se desean altas velocidades tiene que recurrirse al radio.

FUERZAS DE INERCIA

Sistema de referencia inercial; 2ª ley de Newton

$$\vec{R} = m \bullet \vec{a}_{abs.} = m(\vec{a}_{rel} + \vec{a}_{arr} + \vec{a}_{Cor})$$

Explicar aceleración de arrastre, aceleración de Coriolis, aceleración relativa.

Formulación de la 2ª ley de Newton para un observador que se mueve con el movimiento de un sistema de referencia no inercial:

$$\vec{R} - m \bullet \vec{a}_{arr} - m \bullet \vec{a}_{Cor} = m \bullet \vec{a}_{rel}$$

Fuerzas de inercia o fuerzas ficticias:

$$\vec{\phi}_{i,arr} = -m \bullet \vec{a}_{arr} \; ; \; \vec{\phi}_{i,Cor} = -m \bullet \vec{a}_{Cor}$$

Ninguna de las fuerzas de inercia es la acción de un cuerpo sobre otro, es decir, no existe ningún cuerpo que las cause. El producto de una masa por una aceleración sólo es fuerza desde el punto de vista dimensional, pero no lo es formalmente, es decir, en el sentido de la definición de fuerza como acción de un cuerpo sobre otro (BEER y JOHNSTON, p.11).

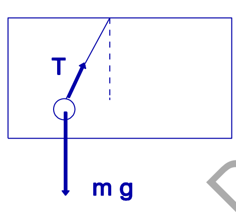
A continuación se expondrán varios ejemplos en los que el análisis se realizará desde un sistema inercial (necesariamente aproximado) y desde un sistema no inercial, igualmente, por necesidad forzosa, simplificado.

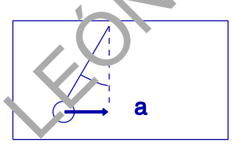
En cada uno de ellos se hará el primero de los análisis a la izquierda de la hoja y el no inercial, a la derecha.

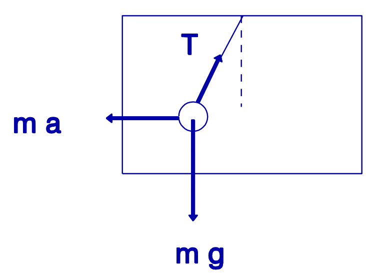
Péndulo en coche de tren con aceleración constante

Sist. inerc. | Sist. no inerc.

D. de FF. | D. de AA.







$$\vec{R} = m\,\vec{a}_{abs}$$

$$\vec{R}^{*} = m\,\vec{a}_{rel}$$

En el caso del coche de tren, el sistema de referencia no inercial queda definido por un observador que está dentro de él. Tanto el estudio inercial como el no inercial se hace cuando se ha alcanzado la aceleración "a" y después, ésta se mantiene constante, es decir, la locomotora no sigue acelerando.

Los DD. de FF. y de AA. del sistema inercial son los que vería un observador que presenciara el paso del convoy desde, p.e., el andén de una estación.

Por el contrario, para el observador que está dentro del coche acelerado (sistema no inercial), el péndulo está fijo en la posición representada en la figura de la derecha, es decir que el péndulo está en equilibrio, por ello, tanto la velocidad relativa como la aceleración relativa son cero. Por ello, la 2ª Ley de Newton quedará en la forma:

$$\vec{R} - m \bullet \vec{a}_{arr} - m \bullet \vec{a}_{Cor} = vector\ nulo$$

La única fuerza de inercia no nula será la de arrastre y a ella habrá que añadir las fuerzas que son acción de un cuerpo sobre otro, en este caso la tensión del hilo (contacto directo), y el peso (acción a distancia). La fuerza de Coriolis es nula, al ser cero tanto la velocidad relativa (El péndulo está en equilibrio), como la velocidad angular del coche, pues éste sólo se traslada.

La fuerza de inercia de arrastre se obtiene multiplicando la masa de la lenteja del péndulo por la aceleración de arrastre. Esta última se obtiene <u>suponiendo</u> que la lenteja se mueve con el observador no inercial (el situado en el coche), adquiriendo, por consiguiente su misma aceleración. Es decir que la fuerza de inercia de arrastre será:

$$\vec{\varphi}_{i,arr} = -m \bullet \vec{a}_{arr} = -m \bullet \vec{a}$$

La ecuación anterior ha sido proyectada horizontalmente, suponiendo como sentido positivo el dirigido hacia la derecha, por ello, habiendo resultado una expresión negativa, la fuerza de inercia de arrastre va dirigida hacia la izquierda, tal y como ha sido representada en el diagrama de fuerzas $\vec{R}^*$ (Figura de la derecha).

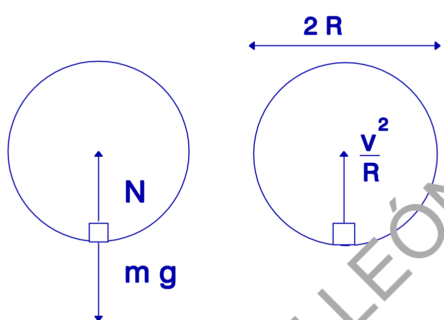
Debe observar que en la definición de la fuerza de inercia de inercia de arrastre se evidencia la imposibilidad de que haya un cuerpo que la pueda generar, dada que la masa de la lenteja multiplicada por la aceleración del coche nada tienen que ver entre sí.

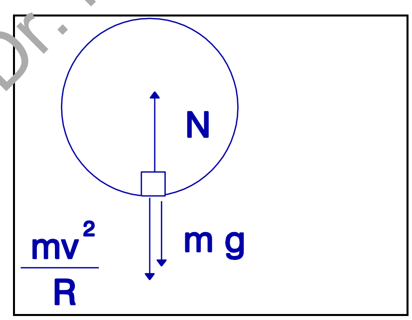
Por último, si se midiera el ángulo que el hilo forma con la vertical en la posición de equilibrio relativo (Diagrama de la derecha) se obtendría la aceleración del coche, de ahí que el dispositivo pueda ser utilizado como acelerómetro.

Lazo de las montañas rusas.

Sist. inerc. — Sist. no inerc.

D. de F. — D. de a.





$\vec{R} = m\,\vec{a}_{abs}$

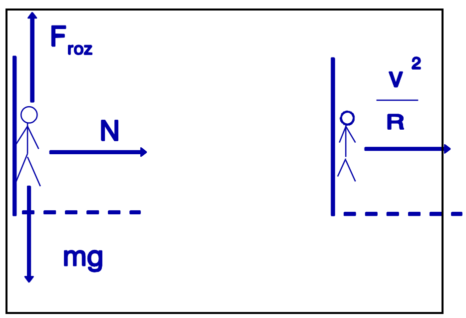
$\vec{R}^* = m\,\vec{a}_{rel}$

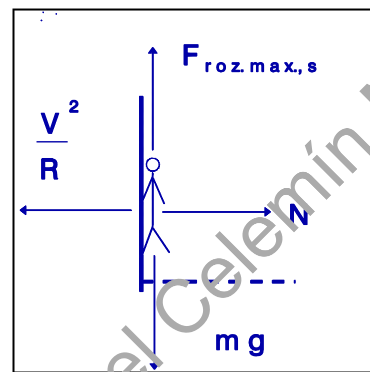
Tipo de fuerza de inercia: Fuerza centrífuga

Rotor: Cilindro vertical, Diámetro= 3.5 m

Sist. inerc. Sist. no inerc.

D. de F. D.de a. Fuerza centrífuga + $F_{roz,ind}$





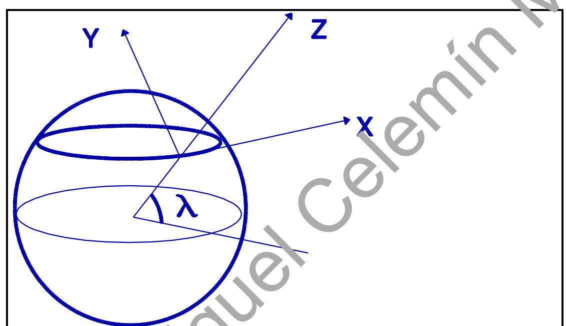
La N es la que hace posible el movimiento circular.

Sabiendo que la velocidad angular de un rotor es de unas 30 rpm, ¿Cuál debe ser el coeficiente de rozamiento movilizado? 0.32

Equilibrio relativo sobre la superficie terrestre: plomada

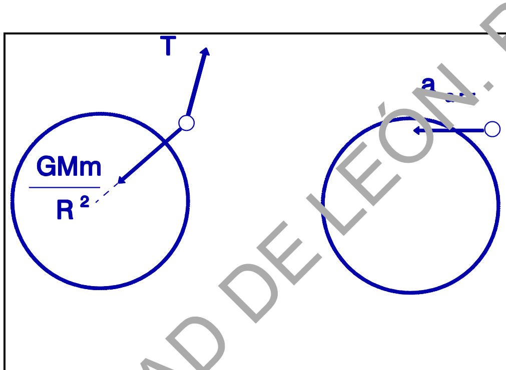
Coordenadas esféricas: r, latitud (λ) y longitud (α)

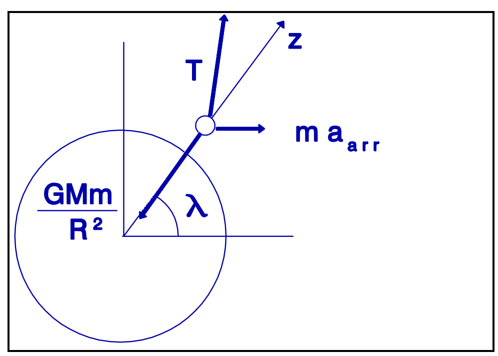
Sistema cartesiano asociado: OZ según "r", OX tangente al paralelo hacia el Este y OY tangente al meridiano, hacia el Norte.



Sist. inerc. Sist. no inerc.

D. de FF. D. de AA. Fuerza inercia de arrastre





Lo que se llama peso es, en realidad, la resultante de dos fuerzas: la de la atracción terrestre y la de inercia correspondiente al movimiento de rotación propio de la Tierra.

La dirección de la plomada es la de la gravedad local.-

$$g^{*\,2} = g^2 + (\Omega^2 \bullet R \bullet \cos\lambda)^2 - 2 \bullet g \bullet \Omega^2 \bullet R \bullet \cos^2\lambda = g^2 + (\Omega^4 \bullet R^2 - 2 \bullet g \bullet \Omega^2 \bullet R) \bullet \cos^2\lambda$$

Fórmulas de este tipo aparecen:

en el BEER Y JOHNSTON, 3ª ed., p.506; 5ª ed. p.538 (uds técnicas británicas:

$$g^* = 9.7807(1 + 0.0053\, sen^2\phi)$$

en THE PHYSICS TEACHER, January, 1994, p.53:

$$g^* = 9.80616 - 0.025928 \cos 2\phi + 0.000069 \cos^2\phi - 0.3086h$$

con h expresada en km.

En el laboratorio se utilizará una fórmula de este tipo, que es la propuesta por la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.):

$$g = 980.616 \bullet (1 - 2.6373 \bullet 10^{-3} \bullet \cos 2\phi + 5.9 \bullet 10^{-6} \bullet \cos^2 2\phi - -$$

$$- - - 3.086 \bullet 10^{-4} \bullet H + 1.118 \bullet 10^{-4} (H - H')$$

en la que ϕ representa la latitud geográfica, "H" la altitud sobre el nivel del mar y "H'" la altitud media en metros de la superficie de terreno comprendida en el interior de un círculo de 150 km de radio con centro en la estación meteorológica.

$$g = 9{,}780556\,(1 + 0.0052885\,\mathrm{sen}^2\phi - 0.0000059\,\mathrm{sen}^2 2\phi) - 0.0000020H$$

Donde Φ representa la latitud y H la altitud sobre el nivel del mar en metros (TPT, sept.2000, p. 369).

Movimiento relativo sobre la superficie terrestre
Sist. no inerc.

D. de FF. D. de AA.

R, Φ_{arr}, Φ_{Cor} a_{rel}

Expresión del vector rotación terrestre Ω en cartesianas:

$$\vec{\Omega} = \Omega \cos\lambda \bullet \vec{i} + \Omega \sin\lambda \bullet \vec{j}$$

Expresión general de la fuerza de inercia de Coriolis:

$$\vec{\phi}_{i,Cor} = -2 \bullet m \bullet \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{rel} = 2 \bullet m \bullet \vec{v}_{rel} \wedge \vec{\Omega}$$

Expresión particular de la fuerza de inercia de Coriolis:

$$\vec{\phi}_{i,Car} = 2 \bullet m \bullet \vec{v}_{rel} \wedge \Omega \sin\lambda \, \vec{k}$$

Módulo: $2mv_{rel}\Omega\sin\lambda$, dirección: $\perp$ a la v_{rel}, sentido: derecha de v_{rel} (Hemisferio Norte).

Valor máximo (Polos geográficos) y mínimo (Ecuador) de la fuerza. Experiencia transmitida por los exploradores de los polos, pingüinos del Antártico se mueven en arcos hacia la izqda.

Importancia: La fuerza de Coriolis tiene un papel muy relevante en la meteorología y climatología. La superficie terrestre tiene zonas cálidas y zonas frías, el aire en contacto con ellas adquiere esas mismas características, consecuentemente, el aire caliente, ligero, tiene tendencia a ascender, mientras que el frío, más denso, la tiene a descender. Si la Tierra no girara, el frío aire de los Polos se movería hacia el Ecuador y el tiempo y el clima no tendría la variabilidad que tiene realmente. Esta variabilidad se debe a que en el momento en que el aire frío se mueve, se ve sometido a la fuerza de Coriolis y se desvía a la derecha, acumulándose en forma de borrascas a unos 60° de latitud; el aire caliente del Ecuador en su movimiento hacia los Polos también sufre estancamientos, dando lugar a una serie de anticiclones situados a unos 30° de latitud.

En las capas altas de la troposfera el movimiento del aire es la consecuencia de la acción de dos fuerzas: la de Coriolis y la de la presión dando lugar al viento geostrófico.

En resumen, las fuerzas de inercia:

No son fuerzas reales, ya que no son el resultado de la acción de un cuerpo sobre otro. Además estas fuerzas no verifican el principio de acción y reacción (3ª ley de Newton)(Revista española de Física, Francisco Herrero, curso del CPR, Nov. 2001)
También se las denomina fuerzas ficticias.
El error que, a veces, se comete con estas fuerzas puede expresarse en la siguiente fórmula:

$$\vec{R}+\Phi_i = m \bullet \vec{a}_{abs} \quad \vec{R}^* = m\vec{a}_{abs}$$

es decir, se considera a las fuerzas ficticias -entre las que se encuentra la centrífuga- como fuerzas reales, y por ello un observador inercial cree que debe incluirlas en la 2ª Ley de Newton.

Las fuerzas ficticias deben ser consideradas cuando el estudio de un fenómeno físico se realiza desde un sistema de referencia no inercial.

BIBLIOGRAFÍA

Newton, Isaac, “Principios Matemáticos de la Filosofía Natural”, Tomos 1 y 2, Alianza Editorial, Madrid, 1987.

Beer, Ferdinand P. y Johnston, E. Russell, “Mecánica Vectorial para Ingenieros, Estática y Dinámica, McGraw-Hill, 6ª ed., Madrid, 1998.

Celemín Matachana, M., "Lecciones de Mecánica de Fluidos", Servicio de Publicaciones de la Universidad de León, 1996.

Swartz, Clifford E., Miner, Thomas, "Teaching Introductory Physics", American Institute of Physics, Woodbury, New York, 1997.

Serway, Raymond A., "Física", Nueva Editorial Interamericana, México, D.F.,1985.

Freedman, Daniel Z., y van Nieuwenhuizen, Peter, "Supergravedad y la unificación de las leyes de la física", *Investigación y Ciencia*, abril, 1978.

Fernández Rúa, José Mª, "Newton y la manzana. Ahora se cuestiona la ley de la gravedad", ABC, Ciencia, domingo, 7 de agosto de 1988.

Elizalde, E. (Dpto. de Física Teórica, Universidad de Barcelona), "Polémica sobre la quinta fuerza", EL DIARIO DE LEÓN, viernes, 25 de septiembre de 1987.

Ortolí, S., "La misteriosa quinta fuerza del Universo", *Conocer*.

Noble, John, "Físicos norteamericanos encuentran indicios de una quinta fuerza fundamental del universo", EL PAÍS, jueves, 9 de enero de 1986.

Johnson, Larry D., *"The path of a projectile", The Physics Teacher*, Vol. 30, Feb. 1992.

Safarian, H., *"On projectile motion", The Physics Teacher*, 1999.

"Another look at projectile motion", The Physics Teacher, Oct. 2000.