

## Evaluación de los conceptos básicos necesarios para diseño de máquinas. ¿Qué estamos haciendo mal?

Oscar Martel\*<sup>a</sup>, Alejandro Yáñez<sup>a</sup>, José M. Quintana<sup>a</sup>, Alejandro Ruiz-García<sup>a</sup>, Alberto Cuadrado<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Edificio de Ingenierías, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas, España

### RESUMEN

El conocimiento de los conceptos básicos es fundamental para poder desarrollar una carrera, tanto académica como profesional, en Ingeniería Mecánica. En este estudio se ha evaluado el grado de conocimiento de los conceptos básicos de los estudiantes en mecánica y resistencia de materiales al llegar a tercer curso del Grado en Ingeniería Mecánica. Se ha efectuado mediante un cuestionario de 7 preguntas (12 cuestiones) de respuesta libre, realizado por 64 estudiantes. Se agruparon los resultados de los alumnos para poder analizarlos. Los porcentajes de cuestiones correctas, aproximadamente correctas, incorrectas y no contestadas frente a las totales son los siguientes respectivamente: 25%, 5%, 34% y 36%. También se obtuvo una nota media global de 2,7 sobre 10. Se concluye que el grado de conocimiento de los conceptos básicos es bajo y se apuntan varias soluciones como: 1) penalizar errores de concepto graves en los exámenes; 2) huir de los problemas tipo y hacer preguntas que hagan pensar y remover los conceptos a los estudiantes; 3) incluir los conceptos básicos imprescindibles (equilibrio, rendimiento, esfuerzos básicos, etc.) propios de cada asignatura en los exámenes; 4) enfatizar sobre los conceptos que luego van a ser ampliamente usados a lo largo de la carrera.

**Palabras Clave:** Educación, Mecánica, Resistencia de Materiales, FCI, Enseñanza-aprendizaje

### 1. INTRODUCCIÓN

Los conceptos básicos en mecánica y en resistencia de materiales son fundamentales para el desarrollo profesional de un/a Ingeniero/a Mecánico/a. Esta capacidad para comprender los fundamentos es más importante si cabe en la actualidad, ya que, debido a la gran cantidad de software avanzado, la potencia de cálculo es muy alta, y el ingeniero se encuentra a “un par de clicks” de obtener resultados. Por ello, el conocimiento de los principios básicos para saber si estos resultados pueden ser correctos o no, es crucial. Sin embargo, a los estudiantes tradicionalmente les ha resultado difícil asimilar los conceptos de la mecánica clásica [1,2]. Esto puede ser debido a la percepción de los alumnos de los conceptos físicos, así por ejemplo, un estudiante que cree que el conocimiento de la física consiste principalmente en hechos y fórmulas desconectados estudiará de manera diferente a un estudiante que ve a la física como una red interconectada de conceptos [3].

Existen varios modelos para evaluar la comprensión de conceptos básicos de la mecánica clásica por parte de estudiantes universitarios. El Force Concept Inventory (FCI) es el de mayor implantación [4], pero existen otros como el Force and Motion Conceptual Evaluation (FMCE) [5] o el Mechanics Baseline Test (MTB) [6]. La relación entre estos tests ha sido estudiada [7] y se presenta una adecuada correlación entre ellos, lo que supone que cualquiera de ellos es válido para evaluar los conceptos físicos fundamentales.

\* oscar.martel@ulpgc.es; tel: +34 928451899; fax +34 92845148

Estos tests son de física general, así que para evaluar asignaturas más específicas es necesario adaptarlo a los contenidos de esas asignaturas. En concreto se ha diseñado un examen para investigar el nivel de conocimientos básicos de mecánica y resistencia de materiales que tienen los alumnos al comenzar su tercer curso del Grado de Ingeniería Mecánica, específicamente en la asignatura fundamentos de diseño de máquinas. La materia diseño de máquinas contiene dos partes, una de fundamentos y otra de elementos de máquina y proyectos. Muchas veces se divide en dos asignaturas cuatrimestrales, como en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). Estas dos partes son las más comunes en los textos más reputados para impartir esta materia [8,9] La parte de fundamentos es un repaso de los conceptos que ya se incluyen en otras asignaturas previas, añadiendo la parte de fatiga, por lo que los conceptos explicados deberían ser simplemente “refrescados”.

En esta ponencia se ha investigado el grado de conocimiento de los conceptos básicos de los/as alumnos/as, se apuntan sus posibles causas y se proponen soluciones. En concreto, en la discusión se ha tratado de responder a las siguientes preguntas: ¿por qué los estudiantes fallan en los conceptos básicos?, ¿qué les lleva incluso a dar respuestas ilógicas?, y finalmente ¿qué estamos haciendo mal? Finalmente, se propone una serie de soluciones.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha realizado un examen corto, el día 18-09-2017, la segunda semana del curso, de 15 semanas de duración total, a los alumnos de la asignatura fundamentos de diseño de máquinas de primer cuatrimestre del tercer curso del Grado de Ingeniería Mecánica de la ULPGC. El examen lo realizaron 64 estudiantes. Se ha elegido la segunda semana para que la cantidad de alumnos fuera superior. Se ha diseñado el examen con 7 preguntas que evalúan los conceptos básicos necesarios para la asignatura. No se usa el tipo test porque, aunque es más fácil de implementar y de analizar estadísticamente, se pierde información, ya que no se pueden leer respuestas o razonamientos de los alumnos. Los alumnos dispusieron de un tiempo de 30 minutos para su realización. El cuestionario se presenta en la figura 1.

Cada pregunta trata de evaluar un concepto distinto y se entremezclan estática, resistencia de materiales y dinámica. Aunque no había una respuesta cerrada (opción múltiple), si se agruparon los resultados de los alumnos, para poder analizarlos. Algunas preguntas (3, 5, 6 y 7), en realidad planteaban dos o tres cuestiones dentro de la misma, por ello se han subdividido en las respuestas. Para todas las respuestas se consideró evidentemente una correcta y una incorrecta, pero para algunas determinadas se consideraron además otros tipos de respuestas erróneas, debido a sus implicaciones. Además, también se leyeron completamente los comentarios de los alumnos en busca de razones de sus respuestas. Aunque estos comentarios no son objeto de análisis matemático, sí que proporcionaron pistas muy importantes sobre las respuestas.

**CUESTIONARIO BÁSICO DE MECÁNICA Y RESISTENCIA. 18-09-2017**

1) ¿Qué fuerza existe en la cuerda si se ejercen 100 N de fuerza por cada extremo?

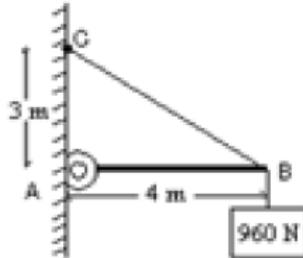


2) ¿Cuál es, aproximadamente, la resistencia a fluencia de un acero de construcción?

3) ¿Qué es el módulo de elasticidad? ¿Qué material tiene mayor módulo, el acero o el neopreno?

4) ¿Qué potencia necesita un coche para moverse a 96km/h si la resistencia global que tiene que vencer es de 225 kgf y su eficiencia mecánica es del 70%?

5) ¿A qué tipo de esfuerzo (tracción, compresión, flexión, torsión o combinación de ellos) está sometida la barra horizontal AB en la siguiente figura? ¿Qué valor tiene? ¿Cuál es la tensión en el cable CB en la siguiente figura?



6) Dibuja las fuerzas a las que está sometido un avión en vuelo estacionario. Indica la relación entre ellas (cuales son iguales y cuales distintas entre ellas)

7) Suponiendo que las áreas de las secciones de los perfiles son los mismos, ordenar las siguientes figuras en cuanto a resistencia a pandeo y a flexión

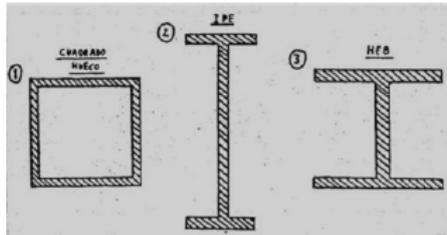


Figura 1. Cuestionario realizado a los alumnos.

### 3. RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en los cuestionarios. La pregunta 1 se subdividió en dos respuestas incorrectas ya que fueron solo estos dos tipos los que se obtuvieron, y además tienen distintas implicaciones. La respuesta 0 N, es claramente absurda, ya que implicaría que una cuerda nunca puede romperse. Para la respuesta 3A se consideró una respuesta aproximada, pues como es una definición es complicado darla completamente correcta en un

cuestionario de este estilo. Para la pregunta 4 se consideró como un fallo menor (aprox. correcta) el debido a no cambiar bien las unidades. Para la respuesta 6A se consideró también como un fallo menor no identificar las fuerzas, pero al menos mantener el equilibrio.

Tabla 1. Resultados en valor absoluto y porcentajes de los 64 cuestionarios realizados.

PREGUNTAS	RESPUESTAS AGRUPADAS			
	Correcto	Mal (0N)	Mal (200N)	NC
1	22 34%	20 31%	19 30%	3 5%
2	Correcto 3 5%		Mal 15 23%	NC 46 72%
3A	Correcto 12 19%	Aprox. 19 30%	Mal 24 38%	NC 9 14%
3B	Correcto 22 34%		Mal 36 56%	NC 6 9%
4	Correcto 3 5%	Fallo Unid. 4 6%	Mal 7 11%	NC 50 78%
5A	Correcto 14 22%		Mal 37 58%	NC 13 20%
5B	Correcto 14 22%		Mal 11 17%	NC 39 61%
5C	Correcto 20 31%		Mal 14 22%	NC 30 47%
6A	Correcto 16 25%	Equilibrio 15 23%	No equilib. 28 44%	NC 5 8%
6B	Correcto 5 8%		Mal 11 17%	NC 48 75%
7A	Correcto 44 69%		Mal 19 30%	NC 1 2%
7B	Correcto 15 23%		Mal 24 38%	NC 25 39%

Los porcentajes de preguntas correctas, aproximadamente correctas, incorrectas y no contestadas frente a totales son los siguientes respectivamente: 25%, 5%, 34% y 36%. También se obtuvo una nota media global de los alumnos, asignando la misma puntuación a las 12 cuestiones. Para ello se consideró un punto si la respuesta era correcta, medio punto si era aproximada y 0 puntos en el caso de que estuviera mal o no contestada. Se obtuvo una nota media global (normalizada en escala 10) de 2,7 puntos.

#### 4. DISCUSIÓN

Las preguntas son de diversa índole, y a nuestro juicio tienen distinta importancia, por lo que creemos que es mejor hacer una discusión primero de cada pregunta para luego obtener conclusiones generales. La primera pregunta es muy simple y alude directamente a los conceptos de equilibrio (estática) y tracción (resistencia de materiales). Su solución es 100 N,

algo que, paradójicamente solo responde el 34% de los encuestados. Lo más destacable de esta cuestión es cómo, algo aprendido en los cursos de física, es capaz de “eliminar” todo tipo de lógica de la respuesta. Así, el 31% (20 alumnos), debido a que la cuerda tiene una fuerza hacia un lado y otra de igual magnitud hacia el otro, las suman vectorialmente y obtiene cero. Si esto fuera así, nunca nada estaría sometido a tracción, es decir, las cuerdas nunca se romperían. Es interesante destacar la respuesta de un estudiante: “La lógica me dice 100N, pero la sumatoria otra, me fío de los números”. Creemos que, lamentablemente, algunos/as alumnos/as no analizan con espíritu crítico los resultados. Por otro lado, la respuesta errónea de 200 N, aun siendo incorrecta, no la consideramos tan grave como la de 0 N.

Las cuestiones 2, 3A y 3B son de conocer propiedades de los materiales. Vemos como sólo 3 personas (5%) conocen el valor numérico aproximado de la resistencia a fluencia del acero de construcción (250 MPa). Sin embargo, un 49% tiene una idea correcta o aproximada de lo que es módulo de elasticidad, aunque luego confunden su sentido, ya que cuanto más elástico es un material, menor es su módulo de elasticidad.

La cuarta pregunta es relativa a los conceptos de potencia y rendimiento, y su solución requiere algún cálculo simple. La respuesta correcta (84kW) sólo la tuvieron 3 personas (5%), con un 78% que no la contestó, indicando, creemos, que en las asignaturas previas de física y mecánica, a estos temas no se les presta demasiada atención.

La quinta pregunta tiene que ver con el concepto de equilibrio y estructuras articuladas simples. Es, junto con la anterior, la única que requiere un cálculo, aunque sólo una suma de tres vectores en un punto. En realidad, son la 5B y la 5C las que necesitan el cálculo, ya que para la 5A, basta conocer los conceptos básicos de estructuras articuladas. El porcentaje de acierto para las tres es similar (22%, 22% y 31%, para la 5A, 5B y 5C respectivamente), sin embargo, la 5A presenta un mayor nivel de fallo (58%) que las otras dos, que quedan más sin contestar (61% y 47%). Esta diferencia entre las no contestadas entre 5B y 5C nos lleva a pensar que hay un pequeño porcentaje de alumnos que no leen bien los enunciados, ya que ambas cuestiones se resuelven prácticamente a la vez.

La sexta pregunta tiene que ver directamente con el concepto de equilibrio. Solo el 25% de los estudiantes fue capaz de saber que fuerzas principales se ejercen sobre un avión, aunque un 23%, aun no sabiendo cuales eran, por lo menos sabían que si existía una fuerza, debía haber otra para contrarrestarla. Lamentablemente, hay un 44% de estudiantes que, en tercer curso, no han entendido la noción de equilibrio mecánico. Además, hay un 75% que no contestó a la cuestión 6B, indicando en algunos casos que, aunque se pusieran fuerzas contrapuestas, no se consideraron estas del mismo valor, violando también así el principio de equilibrio. Adicionalmente, el alto porcentaje de no contestadas de la 6C se pudo deber a que no leyeron completa y correctamente el enunciado.

La última pregunta tiene que ver con la forma resistente de la sección de los perfiles (resistencia de materiales). Esta cuestión 7A ha sido una sorpresa para los autores de este estudio, ya que no esperábamos que fuera, con diferencia, la más acertada (69%). Y también nos sorprendió que se acertará tres veces más la 7A, relativa al pandeo, que la 7B (23% acierto), relativa a la flexión, cuando el curso básico de resistencia, en principio, presta mucha más atención a la flexión que al pandeo.

Aunque no hemos podido encontrar información sistematizada sobre los resultados de otros alumnos en otros centros, creemos que la situación es similar en muchas otras universidades. La razón para esta suposición es que, cómo ya se ha comentado, los propios manuales de diseño de máquinas [8, 9] incluyen una parte de fundamentos, que, “en teoría” ya se ha visto en los cursos introductorios.

Entonces, ¿en qué nos estamos equivocando? Desde nuestro punto de vista creemos que, en general, hay una falta de interiorización de los conceptos básicos y que se debe, en parte, a que las asignaturas básicas no están centrando su evaluación correctamente. Es decir, se plantean la resolución de problemas clásicos solamente, que no fuerzan al alumno a pensar sobre los problemas, no se fomenta el espíritu crítico. Además, en los cursos básicos no se insiste en las limitaciones de los modelos físicos. Por ejemplo, los alumnos creen que las fuerzas se pueden considerar vectores deslizantes, y esto es así sólo para determinados casos. Si no, se puede dar el caso de convertir una barra a tracción en una barra a compresión, “solo” deslizando los vectores. Tras dos cursos de física en bachillerato y otros dos en la universidad, se da la paradoja de que hay un número importante de estudiantes que no tiene claro un concepto tan básico como el equilibrio (sumatoria de fuerzas igual a cero). Creemos que, básicamente nos estamos equivocando en el enfoque de las asignaturas básicas de mecánica y resistencia de materiales.

Como soluciones a esta problemática nos permitimos apuntar las siguientes:

- 1) Considerar errores de concepto como graves en los exámenes, incluso invalidando la puntuación global si son muy graves. De este modo los estudiantes se acostumbrarán a analizar críticamente sus resultados y no podrán dejar resultados que son obviamente erróneos (para cualquier persona incluso no familiarizada con la física).
- 2) Mayor insistencia en los conceptos en los exámenes de física y mecánica. Huir de los problemas tipo y hacer preguntas que hagan pensar y remover los conceptos a los alumnos. Insistir en los conceptos muy básicos (equilibrio, rendimiento, esfuerzos básicos, etc).
- 3) Hacer una pequeña lista por asignatura de conceptos ineludibles que hay que saber antes de superarla e incluirlos en todos los exámenes, pero evidentemente, no con las mismas preguntas.
- 4) Para las asignaturas más descriptivas, como conocimiento de materiales, enfatizar sobre los conceptos que luego van a ser ampliamente usados a lo largo de la carrera.

Este estudio tiene varias limitaciones, pero quiere ser una reflexión (con datos) sobre el tipo de enseñanza que estamos ofreciendo a los alumnos. Una limitación es que no se evalúan exhaustivamente las competencias, es decir, no hay una pregunta específica y única para cada concepto básico, sino que se evalúan de manera conjunta. Sería por tanto conveniente, revisar el test para incluir todos los conceptos. Otra limitación es que no evalúa las soluciones propuestas. Por tanto, sería necesario implementar las soluciones apuntadas y cuantificar su efectividad.

## REFERENCIAS

- [1] J.L. Roeder, Physics appreciation versus Physics knowledge, *The Physics Teacher* 36, 379-379 (1998).
- [2] G.E. Hart, P.D. Cottle, Academic backgrounds and achievement in college physics, *The Physics Teacher* 31, 470-475 (1993).
- [3] A. Elby. Helping physics students learn how to learn. *American Journal of Physics* 69, (2001)
- [4] D. Hestenes, M. Wells, G. Swackhamer, Force concept inventory, *The physics teacher* 30 141-158, (1992)
- [5] R.K. Thornton, D.R. Sokoloff, Assessing student learning of Newton's laws: The force and motion conceptual evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula, *American Journal of Physics* 66, 338-352 (1998).
- [6] D. Hestenes, M. Wells, A mechanics baseline test, *The physics teacher* 30, 159-166 (1992).
- [7] R.K. Thornton, D. Kuhl, K. Cummings, J. Marx, Comparing the force and motion conceptual evaluation and the force concept inventory, *Physical review special topics-Physics education research* 5 (2009).
- [8] R.G. Budynas, J.K. Nisbett, J.E. Shigley. *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10<sup>th</sup> Ed. New York: McGraw-Hill (2011)
- [9] R.L. Norton. *Machine Design: An Integrated Approach*, 5<sup>th</sup> Ed. Boston, Pearson Prentice-Hall (2014)