

DIEZ AÑOS DE EVALUACIÓN DE LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA MECÁNICA DE NEWTON EN ESCUELAS DE INGENIERÍA ESPAÑOLAS. RENDIMIENTO ACADÉMICO Y PRESENCIA DE PRECONCEPTOS

COVIÁN REGALES, ENRIQUE¹ y CELEMÍN MATACHANA, MIGUEL²

¹ Universidad de Oviedo (España)

² Universidad de León (España)

covianenrique@uniovi.es

miguel-celemin@unileon.es

Resumen. El Force Concept Inventory (FCI) ha estado siendo utilizado para evaluar a alumnos de primer curso de escuelas de ingeniería de distintas universidades españolas desde su publicación en 1992. Sus resultados se han comparado con los procedentes de algunas universidades estadounidenses donde el FCI también había sido aplicado.

A partir de estos resultados –expuestos en el artículo– se ha podido detectar un escaso nivel de conocimiento del concepto de *fuerza*, un bajo rendimiento académico y la persistencia de preconceptos en este campo. Los problemas detectados se consideran incompatibles con una adecuada comprensión de la Mecánica de Newton.

Palabras clave. Concepto de fuerza, preconceptos, Mecánica, simulación informática y test.

Ten years of evaluation of the teaching-learning of Newtonian Mechanics at Spanish engineering schools: influence on the level of knowledge and the persistence of misconceptions.

Summary. The Force Concept Inventory (FCI) has been given to first year engineering students at many Spanish Universities since its publication in 1992. Its result has been compared with those corresponding to the American Universities where FCI was also given.

As a consequence of the FCI results, shown in the paper, a low level of understanding of the force concept, low academic yield and the persistence of misconceptions in this field were noted. The problems noted were considered incompatible with an adequate understanding of Newtonian mechanics.

Keywords. Force concept, misconceptions, mechanics, and test.

1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica newtoniana es una de las bases –si no la base– de la ingeniería actual y el concepto de *fuerza* es fundamental en su estudio. Dicha magnitud figura en la primera, segunda y tercera ley de Newton, lo que hace necesario tener en cuenta su carácter vectorial. Diversos estudios (Bracikowski et al., 1998; Celemín et al., 1999; Hewson, 1995; Kondratyev et al., 1994; Newburgh, 1994; y Van den Berg et al., 1998) revelan la existencia

de dificultades en la aplicación de las citadas leyes fundamentales. Entre ellos, cabe destacar los relativos a la elaboración del diagrama de sólido libre (Court, 1999a y 1999b y Mathot, 1993) utilizado en la resolución de los problemas de Mecánica y los correspondientes a la existencia de preconceptos (Celemín et al., 1999; Erlichson, 1991, 1995, 2000; Hamer, 1996; Hierrezuelo et al., 1988; Peduzzi et al., 1997; y Smith, 1992).

En relación con el término *preconcepto*, elegido éste entre las distintas expresiones utilizadas para referirse a «lo que sabe el alumno sobre fuerza» (Solano et al., 2000), se hizo para resaltar el carácter «previo» de este tipo de concepciones y por su concisión, sin que ello suponga menoscabo de otros términos equivalentes (concepciones previas, concepciones alternativas, etc.).

No obstante, entre los muchos estudios sobre estas concepciones son prácticamente inexistentes los dedicados a la cuantificación de su presencia y persistencia «existiendo cierto consenso en admitir la necesidad de abandonar los estudios descriptivos sobre concepciones y en dirigir los esfuerzos hacia estudios de carácter evolutivo» (Solano et al., 2000).

El *Force Concept Inventory* (en adelante FCI; Hestenes et al., 1992) es un test compuesto por una serie de cuestiones de opción múltiple diseñado para determinar la comprensión de los conceptos básicos de la Mecánica de Newton. Puede ser utilizado con distintos propósitos, siendo los más importantes como herramienta de evaluación de los conocimientos de Mecánica y de la eficiencia didáctica, y de detección de preconceptos en Mecánica. El término *rendimiento académico* integra la eficiencia didáctica con el estado de conocimientos de Mecánica, una vez finalizado el proceso enseñanza-aprendizaje de la Mecánica.

El FCI fue elegido como la principal herramienta de evaluación de la presente investigación, al haber sido observadas en él unas capacidades de evaluación que se ajustaban a los objetivos de la misma, y por tratarse de un test que goza de gran reconocimiento en el ámbito de la investigación educativa relacionada con la enseñanza de la Física y, en particular, de la Mecánica.

Los propios autores del FCI destacan el concepto de *fuerza* como fundamental en la Mecánica de Newton y atribuyen al test la utilidad para conocer la percepción que tienen los alumnos de dicho concepto, en comparación con la concepción newtoniana.

El test consta de veintinueve preguntas en las que debe elegirse una de entre cinco opciones posibles, a excepción de la pregunta dieciséis que tiene sólo cuatro. Sólo una de ellas de cada pregunta se considera correcta y es aquella que coincide con la concepción newtoniana del concepto cuestionado. Su resolución requiere, por tanto, la elección entre unas alternativas basadas en concepciones erróneas y aquellas acordes a la percepción newtoniana de la Mecánica (Hestenes et al., 1992; Huffman y Heller, 1995).

El FCI en su versión original en inglés surgió como una revisión y mejora de otro test similar, el *Mechanics Diagnosis Test* (en adelante MDT) que había sido ya utilizado en muchas ocasiones como herramienta para determinar el grado de comprensión de la Mecánica de Newton. La ventaja del FCI respecto del MDT radica en que aquél no sólo sirve para determinar el grado de comprensión, sino que además permite detectar y clasificar los errores

conceptuales en que incurren los alumnos (Hestenes et al., 1992; Hestenes y Halloun, 1995; Savinainen y Scott, 2002a y 2002b). El MDT y el FCI tienen en común en torno a un 60% de sus cuestiones y los resultados de ambos presentan buena correlación (Hestenes y Halloun, 1995). La versión definitiva del MDT fue aplicada a unos 1.500 alumnos de la Arizona State University y de algunas *highschools* (Halloun y Hestenes, 1995, Savinainen y Scott, 2002a y 2002b).

Posteriormente apareció una versión revisada del FCI (Halloun et al., 1995) –primeramente publicada a través de internet <<http://modeling.asu.edu/R&E/Research.html>> y, después, también en el *Peer Instruction: A User's Manual* (Mazur, 1997). Ambas versiones son muy similares, aunque esta segunda tiene una cuestión más, treinta por tanto, con cinco opciones cada una de ellas, sin excepción (Savinainen y Scott, 2002a). No obstante, pese a la disponibilidad de una versión revisada y, supuestamente, mejorada, en la presente investigación se decidió seguir utilizando la versión original con la intención de mantener la uniformidad de los resultados obtenidos hasta el momento de publicación de esa nueva versión.

El mismo año en que se publicó la versión original del FCI (1992), en el contexto de la investigación educativa desarrollada por el responsable de la asignatura de Física de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad de León y coautor del presente artículo, se realizó la primera traducción al español –de la que se tiene noticia– del FCI, resultando el «Cuestionario sobre el Concepto de Fuerza» (Celemín, 1992) –que fue el que, en definitiva, se utilizó en esta investigación.

La versión revisada del FCI se publicó a través de internet (Halloun et al., 1995) y, de forma conjunta, se pusieron a disposición de todos aquellos profesores de Física, que así lo desearan, versiones del FCI (1995) traducidas a diversas lenguas con la intención de facilitar su difusión en otras culturas y países. Éstas pueden ser consultadas en la página web ya indicada, en inglés, español (Maciá-Barber, Hernández y Menéndez, 1995), alemán, malayo, chino, finés, francés, turco y sueco. (Jackson, 2003).

En la tabla 1 se presenta la traducción al español de la relación de conceptos de la Mecánica encuestados en el FCI (Hestenes et al., 1992) y las opciones correctas que reflejan cada uno de ellos. Las opciones presentadas como correctas son, para cada pregunta, aquellas que corresponden con la concepción newtoniana. El resto de las opciones del FCI –las que no se encuentran incluidas en la tabla anterior– son incorrectas y, en muchos casos, sirven para detectar preconceptos, como se deduce de la tabla 2, en la que se identifican los preconceptos analizados y las opciones del test que los reflejan. Las traducciones al español de los contenidos de estas dos tablas (relación de conceptos de Mecánica y taxonomía de preconceptos tratados en el FCI) fueron llevadas a cabo por los autores que suscriben este artículo.

Tabla 1
Relación de conceptos de Mecánica tratados en el FCI y opciones de éste que los reflejan.

CONCEPTO	OPCIÓN(ES) DEL TEST QUE LO REFLEJA(N)
I. CINEMÁTICA	
Diferenciación entre posición y velocidad	20e
Distinción entre velocidad y aceleración	21d
Movimiento parabólico supone aceleración constante	23d, 24e
Aceleración constante implica cambio de velocidad	25b
Suma vectorial de velocidades	7e
II. PRIMERA LEY DE NEWTON	
Fuerza resultante nula implica dirección de la velocidad constante	4b, 6b, 10b, 26b
Fuerza resultante nula implica módulo de la velocidad constante	8a, 27a
Sistemas de fuerzas de resultante nula	18b, 28c
III. SEGUNDA LEY DE NEWTON	
Fuerzas impulsivas	6b, 7e
Fuerzas constantes implican aceleraciones constantes	24e, 25b
IV. TERCERA LEY DE NEWTON	
Tercera Ley de Newton para fuerzas impulsivas	2e, 11e
Tercera Ley de Newton para fuerzas continuas	13a, 14a
V. PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN	
Suma vectorial	19b
Resultante de fuerzas nula	9d, 18b, 28c
VI.I. FUERZAS ENTRE SÓLIDOS EN CONTACTO	
Fuerzas entre sólidos en contacto en reposo	9d, 12d
Fuerzas entre sólidos en contacto impulsivas	15c
Resistencia como oposición al movimiento	29c
VI.II. FUERZAS PRODUCIDAS POR FLUIDOS EN CONTACTO CON SÓLIDOS	
Resistencia del aire	22d
Principio de Arquímedes (empuje)	12d
VI.III. FUERZAS GRAVITATORIAS	
Fuerza de la gravedad	5d, 9d, 12d, 17c, 18b, 22d
Aceleración independiente del peso	1c, 3a
Trayectoria parabólica	16b, 23d
Obsérvese que la opción 12d es la única contemplada como válida como ya ha sido comentado.	

Tabla 2

Relación de preconceptos de la taxonomía de Hestenes: códigos identificativos, descripción y opciones del test que los reflejan.

PRECONCEPTO		DESCRIPCIÓN	OPCIONES DEL FCI QUE LO REFLEJAN
I. CINEMÁTICA			
PC01	(K.1)	No diferenciación entre posición y velocidad	20b, 20c, 20d
PC02	(K.2)	Confusión entre el concepto de <i>velocidad</i> y el de <i>aceleración</i>	20a, 21b, 21c
PC03	(K.3)	Desconocimiento de la naturaleza vectorial de la velocidad	7c
II. INERCIA			
PC04	(I.1)	Inercia por efecto de un golpe	9b, 9c, 22b, 22c, 22e, 29d
PC05	(I.2)	Pérdida o recuperación de la inercia inicial	4d, 6c, 6e, 24a, 26a, 26d, 26e
PC06	(I.3)	Disipación de la inercia	5a, 5b, 5c, 8c, 16c, 16d, 23e, 27c, 27e, 29b
PC07	(I.4)	Incremento gradual o diferido de la inercia	6d, 8b, 8d, 24d, 29e
PC08	(I.5)	Inercia circular	4a, 4d, 10a
III. FUERZAS ACTIVAS			
PC09	(AF.1)	Sólo los cuerpos activos ejercen fuerzas	11b, 12b, 13d, 14d, 15a, 15b, 18d, 22a
PC10	(AF.2)	Para que haya movimiento tiene que haber fuerzas actuando	29a
PC11	(AF.3)	La ausencia de movimiento implica ausencia de fuerzas	12e
PC12	(AF.4)	La velocidad es proporcional a la fuerza aplicada	25a, 28a
PC13	(AF.5)	La aceleración implica la existencia de una fuerza de magnitud variable	17b
PC14	(AF.6)	Una fuerza provoca aceleración hasta una velocidad máxima	17a, 25d
PC15	(AF.7)	Una fuerza actuando llega a consumirse	25c, 25e
IV. ACCIÓN Y REACCIÓN			
PC16	(AR.1)	A mayor masa mayor fuerza ejercida	2a, 2d, 11d, 13b, 14b
PC17	(AR.2)	Los cuerpos más activos ejercen mayores fuerzas	11d, 13c, 14c
V. SUPERPOSICIÓN DE ACCIONES			
PC18	(CI.1)	La mayor fuerza es la que determina el movimiento	18a, 18e, 19a
PC19	(CI.2)	El movimiento viene determinado por una combinación de las fuerzas que actúan	4c, 10d, 16a, 19c, 19d, 23c, 24c
PC20	(CI.3)	La última fuerza en actuar es la que determina el movimiento	6a, 7b, 24b, 26c
VI. FUERZAS DE INERCIA			
PC21	(CF)	Fuerza centrífuga	4c, 4d, 4e, 10c, 10d, 10e
VI.II. FUERZAS REACTIVAS			
PC22	(Ob)	Los obstáculos no ejercen fuerzas	2c, 9a, 9b, 12a, 13e, 14e
VI.III. FUERZAS RESISTIVAS			
PC23	(R.1)	La propia masa de los cuerpos hace que éstos se paren	23a, 23b, 29a, 29b
PC24	(R.2)	El movimiento se produce cuando la fuerza que actúa es mayor que la resistencia	28b, 28d
PC25	(R.3)	La resistencia se opone a la fuerza y a la inercia	28e
VI.IV. FUERZAS GRAVITATORIAS			
PC26	(G.1)	La presión del aire contribuye a la acción de la gravedad	9a, 12c, 17e, 18e
PC27	(G.2)	La gravedad es una característica intrínseca de los cuerpos	5e, 9e, 17d
PC28	(G.3)	Los objetos más pesados caen más rápido	1a, 3b, 3d
PC29	(G.4)	La gravedad se incrementa a medida que los cuerpos caen	5b, 17b
PC30	(G.5)	La gravedad comienza a actuar cuando la inercia se agota	5b, 16d, 23e

La segunda columna, entre paréntesis, contiene los códigos asignados por el autor de la taxonomía a los distintos preconceptos, que responden a la terminología en inglés: K-Kinematics; I-Impetus; AF-Active force; AR-Action/Reaction pairs; CI-Concatenation of influences; CF-Centrifugal force; Ob-Obstacles; R-Resistance y G-Gravity

Los grupos en que Hestenes et al. (1992) clasifican los preconceptos han sido ligeramente modificados en un intento de mejorar su presentación

Todos los conceptos contenidos en la tabla 1 se consideran de igual importancia para una adecuada comprensión del concepto de *fuera*, y es su consideración global lo que sirve para evaluar la posesión de una adecuada y correcta percepción del concepto de *fuera* (Hestenes et al., 1992; Celemín et al., 1998a y 1998b y Celemín y Covián, 2001). La forma en la que el FCI descompone el concepto de *fuera* es mediante la identificación en él de las seis facetas siguientes (Hestenes et al., 1992):

- 1^a) Cinemática.
- 2^a) Primera Ley de Newton.
- 3^a) Segunda Ley de Newton.
- 4^a) Tercera Ley de Newton.
- 5^a) Principio de superposición.
- 6^a) Tipos de fueras.

Resulta conveniente señalar el paralelismo existente entre estas seis dimensiones del concepto de *fuera* y los principios fundamentales de la Mecánica (Beer y Johnston, 1983). Cuatro de las dimensiones del concepto de *fuera* contempladas por Hestenes et al. (1992) tienen su correspondencia con alguno de los principios fundamentales de la Mecánica mencionados anteriormente. Las otras dos hacen referencia a los tipos de fueras —«fueras de inercia», reactivas, resistivas, gravitatorias— y a los conceptos básicos de la cinemática como parte de la Mecánica que estudia la geometría del movimiento sin atender a sus causas. Estas seis dimensiones del concepto de *fuera*, originalmente propuestas por los autores del test, resultan bastante lógicas para la mayoría de los profesores de Física, sin embargo, no son tan obvias para los alumnos (Huffman y Heller, 1995).

En el mismo artículo en el que se publicó la versión original del FCI, sus autores informaban de su aplicación a más de 1.500 alumnos de *highschool* y a más de 500 universitarios, habiendo sido utilizado por dieciocho profesores. Desde entonces el test ha tenido una gran aceptación que le ha llevado a ser, probablemente, el test más utilizado en el ámbito de la enseñanza de la Mecánica (Hestenes y Halloun, 1995; Huffman y Heller, 1995 y Steinberg y Donnelly, 2002). Entre las referencias encontradas, sobre la aplicación del FCI, cabe destacar la estimación de Hestenes y Halloun (1995) —a partir de la información recogida en la conferencia bianual de la *American Association of Physics Teachers*— que sitúa en torno a los diez mil alumnos y más de cien profesores los que han realizado y aplicado, respectivamente, dicho test. Estas estimaciones fueron hechas en el año 1995, pero con posterioridad las experiencias de Hake (1998) —en su artículo habla de la aplicación del test a 6.542 alumnos—; la aplicación de los métodos propuestos por Crouch y Mazur (2001) —bajo la denominación de *Peer Instruction* sobre una población de 1.624 alumnos—; y los trabajos de Henderson (2002) —sobre una población de 2.178 alumnos—; entre otros, confirman la generalización del uso del FCI no sólo ya en el ámbito estadounidense sino en otros países —el método conocido como *Peer Instruction* ha sido aplicado profusamente en los Estados Unidos de América y también en otros países (Fagen, Crouch y Mazur, 2002). Por todo ello resulta difícil evaluar la cantidad de aplicaciones del FCI en todo el mundo, pero, sin duda, se puede señalar que esta herramienta es la más extendida entre todas las existentes.

Para evaluar la validez del FCI, no debe olvidarse tampoco que la figura del profesor David Hestenes en el ámbito de la investigación educativa en el campo de la Física está reconocida tanto nacional como internacionalmente. Este reconocimiento le llevó a obtener la *Oersted Medal* otorgada por la *American Association of Physics Teachers*, en reconocimiento a su labor científica. (Arizona State University, 2002).

El FCI es, en definitiva, una herramienta que permite determinar la comprensión del concepto de *fuera* en comparación con la concepción newtoniana de la Mecánica (Hestenes et al., 1992; Huffman y Heller, 1995; Hestenes y Halloun, 1995; Mazur, 1997; Hake, 1998; Henderson, 2002). A partir de esta capacidad, el FCI puede ser utilizado, entre otros, con los siguientes fines:

- 1^o) Determinar el nivel de conocimientos de Mecánica en un momento concreto (*placement exam*), entendiéndose que el porcentaje de respuestas correctas del mismo constituye una medida válida de ese nivel de conocimientos de Mecánica (Hestenes et al., 1992; Hake, 1998; Celemín et al., 1998a y 1998b; Henderson, 2002).
- 2) Evaluar la eficiencia didáctica del proceso enseñanza-aprendizaje de la Mecánica entendiéndose que relaciones entre el porcentaje de respuestas correctas antes y después del proceso formativo y, sobre todo, el índice de respuestas correctas después de aquél, representan medidas de su eficiencia (Hestenes et al., 1992; Huffman y Heller, 1995; Hestenes y Halloun, 1995; Mazur, 1997; Hake, 1998; Celemín et al., 1999; Crouch y Mazur, 2001; Steinberg y Donnelly, 2002; Henderson, 2002; Covián y Celemín, 2002).
- 3) Determinar y clasificar preconceptos —concepciones alternativas— analizando las respuestas a determinadas preguntas en comparación con la taxonomía de preconceptos ya expuesta (Hestenes et al., 1992; Huffman y Heller, 1995; Hestenes y Halloun, 1995; Celemín y Covián, 1999).

De todos estos usos del FCI, el de la evaluación de la eficiencia didáctica parece haber sido el más extendido, quizás por ser este problema uno de los que más interés despierta entre los docentes y por la facilidad de aplicarlo para tal fin. Sin embargo, aunque existen referencias al uso del FCI para determinar y clasificar preconceptos, no se han encontrado recuentos objetivos de éstos a partir de resultados del test.

En el ámbito de esta investigación, y en coincidencia con las indicaciones de los autores del FCI, se aplicó en dos ocasiones a cada población: la primera antes de iniciarse el curso y la segunda una vez finalizada la enseñanza de la Mecánica. De esta forma no sólo es posible evaluar el nivel de conocimientos de Mecánica y detectar la existencia de preconceptos en el inicio de los estudios universitarios, sino también medir la eficiencia didáctica alcanzada en el proceso enseñanza-aprendizaje desarrollado en el primer curso de universidad y estudiar la persistencia de los preconceptos. Además se introdujeron dos innovaciones en relación con el uso convencional del

citado test, respecto a lo contemplado por sus autores. Por un lado, se pidió a los alumnos que justificaran brevemente cada una de las opciones elegidas durante la resolución del FCI, para comprobar si la elección de cada opción estaba acompañada de un argumento de carácter científico y garantizar que al contestar se llevaba a cabo un ejercicio de análisis de la situación planteada. Se pretendía así mejorar la fiabilidad del FCI de forma alternativa a como proponían Hestenes y otros (1992) en la presentación del test. Por otro lado, se realizó un recuento de algunos de los preconceptos incluidos en la taxonomía de Hestenes.

En cualquier caso, el uso que se hace de los resultados del FCI es, frecuentemente, para una población en su conjunto, aunque el test puede ser utilizado para conocer la evolución de cada alumno de forma particular en el contexto de la población a que pertenece (Hestenes y Halloun, 1995), en cuyo caso cabría hablar de «eficiencia del alumno».

Se han recogido resultados del FCI procedentes de aplicaciones del test ajenas al ámbito de la investigación (Hestenes et al., 1992; Hestenes y Halloun, 1995; Hake, 1998; Crouch y Mazur, 2001; Savinainen y Scott, 2002b; Steinberg y Donnelly, 2002; Domelen y Van Heuvelen, 2002), que servirán para conocer los órdenes de valor de cada uno de los parámetros de evaluación y como contraste para los valores obtenidos en esta investigación. Los principales parámetros de evaluación utilizados –en el epígrafe de metodología serán definidos éstos con más detalle– son:

1) *la media del porcentaje de respuestas correctas del FCI* (\bar{B}) que representa el nivel de conocimiento de las dimensiones newtonianas del concepto de *fuerza* en el momento de la realización del test, y

2) *el incremento relativo de respuestas correctas entre la primera y la segunda aplicaciones del FCI, respecto de la mayor mejora posible, o eficiencia didáctica* ($\Delta_{rel}\bar{B}$), que representa la influencia del proceso enseñanza-aprendizaje en el nivel de conocimiento de la percepción newtoniana.

Atendiendo a los valores de estos parámetros de evaluación para poblaciones ajenas a esta investigación (Tabla 3), se puede señalar:

1) Que el valor de la media del porcentaje de respuestas correctas para la primera aplicación del FCI para el conjunto de las poblaciones recogidas en esa tabla ($\bar{B}_{1^a\text{ aplic. del FCI}}$) se sitúa en el intervalo [$27\% \leq \bar{B}_{1^a\text{ aplic. del FCI}} \leq 73\%$] con la media aritmética en el 48%.

2) Ese mismo parámetro para la segunda aplicación del FCI ($\bar{B}_{2^a\text{ aplic. del FCI}}$) presenta el intervalo: [$42\% \leq \bar{B}_{2^a\text{ aplic. del FCI}} \leq 92\%$] siendo la media aritmética del 72%.

3) La eficiencia didáctica ($\Delta_{rel}\bar{B}$) se localiza en el intervalo [$19\% \leq \Delta_{rel}\bar{B} \leq 74\%$] con una media aritmética del 43%.

En esa misma tabla se recogen –destacados en negrita– los valores fijados por algunos autores (Hestenes y Halloun, 1995 y Hake, 1998) como referencias.

No obstante, los valores de los parámetros de evaluación recogidos en la tabla 3 proceden de centros educativos extranjeros de muy reconocido prestigio y muchos de ellos tienen implantados métodos educativos innovadores con los que han sido obtenidas eficiencias didácticas muy positivas. Por eso los resultados de las poblaciones españolas en el ámbito de la investigación deben ser comparados con los de las poblaciones extranjeras con ciertas reservas y siempre dentro del contexto en el que se ubican. Por esta misma razón, los valores de referencia que figuran en la tabla 3 pueden ser válidos para el contexto de estas poblaciones extranjeras pero no son contemplados como referentes indiscutibles en el contexto educativo español. Así, mientras el nivel mínimo a partir del cual Hestenes y Halloun (1995) consideran que se da un nivel de conocimientos y de comprensión de la Mecánica válido –*Entry threshold*– se sitúa en el 60% de respuestas correctas del FCI; el nivel exigido en el contexto español se considera situado en el 50%. Hestenes y Halloun (1995) proponen que el límite a partir del cual se da un nivel de conocimientos y de comprensión de la Mecánica comparable a la concepción newtoniana –*Mastery threshold*– se sitúa en el 85% de respuestas correctas del FCI. Tampoco se consideran referentes ajustados al contexto español los valores sugeridos por Hake (1998) para clasificar los cursos según su eficiencia didáctica –*high-g courses, medium-g courses y low-g courses*–, por lo que en el ámbito de la presente investigación la eficiencia didáctica obtenida para las distintas poblaciones se hará por comparación entre ellas.

Durante la primera fase de esta investigación –la que es objeto principal de este artículo– se analizó el estado general de conocimientos, atendiendo para ello al nivel de comprensión de la Mecánica y a la mejora de ésta durante el curso, y, además, la presencia y persistencia de preconceptos en Mecánica. Una vez detectados los problemas existentes mediante la aplicación del FCI en distintas escuelas de ingeniería a lo largo de nueve cursos académicos, y teniendo en cuenta también otros trabajos de investigación educativa encontrados durante la revisión de las fuentes bibliográficas, se inició una segunda fase. En ella se propuso y evaluó un nuevo método didáctico encaminado a mejorar el nivel de comprensión del concepto de *fuerza* y a corregir la presencia de preconceptos, aunque los resultados obtenidos hasta el momento no permiten sacar unas conclusiones definitivas sobre su utilidad.

La aplicación de este nuevo método didáctico pretende reforzar la parte práctica de la enseñanza de la Mecánica mediante la incorporación de tecnologías informáticas al proceso enseñanza-aprendizaje. Hasta el momento actual esta experiencia didáctica, que se denominó «Simulación informática de fenómenos mecánicos» (en adelante SIFFMM), se ha puesto en práctica en un único curso académico, en tres poblaciones distintas, analizando su influencia en el estado general de conocimientos de Mecánica y en la presencia y persistencia de preconceptos. Finalmente, los alumnos participantes en la experiencia SIFFMM son encuestados sobre ella para conocer su grado de aceptación. No obstante, el análisis de los resultados obtenidos con este complemento didáctico no será evaluado en este artículo, en previsión de que vuelva a ser aplicado para disponer de un mayor número de resultados.

Tabla 3
Valores de los parámetros de evaluación del FCI de distintas poblaciones e índices de referencia.

Fuente	Población		Media del porcentaje de respuestas correctas		Eficiencia didáctica	
			pre-test	post-test		
Hestenes, Wells y Swackhamer, 1992	Arizona Reg.		27	48	29	
	Wells Reg.		28	64	50	
	Chicago Reg.		27	42	21	
	Arizona Hon.		33	56	34	
	Wells Hon.		42	78	62	
	Sawckhamer, Hon.		28	66	53	
	Arizona AP		41	57	27	
	Swackhamer AP		73	85	44	
	Van Heuvelen 105		34	63	44	
	Wells 105		36	68	50	
	Arizona State Reg.		52	63	23	
	Harvard Reg.		-	77	-	
Hestenes y Halloun, 1995	Mastery threshold		85		-	
	Entry threshold		60		-	
	sin especificar		-	-	25	
Hake, 1998	<i>traditional instruction</i>		-	-	23	
	<i>interactive-engagement instruction</i>		-	-	48	
	high-g courses		-	-	g > 70	
	medium-g courses		-	-	70 < g < 30	
	low-g courses		-	-	g < 30	
Crouch y Mazur, 2001	Harvard University	Calculus based	<i>Trad. I., 1990</i>	70	78	25
			<i>Peer I., 1991</i>	71	85	49
			<i>Peer I., 1993</i>	70	86	55
			<i>Peer I., 1994</i>	70	88	59
			<i>Peer I., 1995</i>	67	88	64
			<i>Peer I., 1996</i>	67	89	68
			<i>Peer I., 1997</i>	67	92	74
		Algebra based	<i>Peer I., 1998</i>	50	83	65
			<i>Trad. I., 1999</i>	48	69	40
			<i>Peer I., 2000</i>	47	80	63
Savinainen y Scott, 2002b (Viiri, 1996)	<i>Finish population</i>		28	69	57	
Steinberg y Donnelly, 2002	<i>City College of NY, traditional instruction</i>		40	53	22	
	<i>City College of NY, reform instruction</i>		39	65	43	
Domelen y Van Heuvelen, 2002	Winter	<i>"TIM" lab. course Ohio State University</i>		-	-	19
		<i>"CACP" lab. course Ohio State University</i>		-	-	31
	Spring	<i>"TIM" lab. course Ohio State University</i>		-	-	22
		<i>"CACP" lab. course Ohio State University</i>		-	-	33
Poblaciones ajenas a la investigación	Intervalo	máx.	73	92	74	
		mín.	27	42	19	
	Media aritmética		48	72	43	
Poblaciones españolas	Intervalo	máx.	59	69	25	
		mín.	28	33	-3	
	Media aritmética		41	48	12	

Los resultados publicados por Hestenes y otros (1992) fueron contrastados con los obtenidos en España durante los nueve años de aplicación del FCI en el ámbito de esta investigación.

2. METODOLOGÍA

El FCI –en versión traducida al español por Celemín (1992)– fue propuesto, al inicio del curso 1992-1993, a los alumnos de primer curso de la Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria de la Universidad de León (en adelante ESyTIA.ULE) en lo que supuso la primera aplicación del citado test en España de la que se tiene constancia. Desde entonces, el FCI se ha venido aplicando no sólo en el citado centro, sino también en otros situados en el norte de la Península Ibérica, con la intención de diversificar los resultados. En la tabla 4 se recogen todas las poblaciones participantes en la investigación y los acrónimos que les fueron asignados para su identificación. Los datos obtenidos se refieren a diez poblaciones de escuelas de ingeniería formadas por alumnos de primer curso que estaban cursando la asignatura en la que se impartían los conocimientos de Mecánica clásica. Todas las poblaciones fueron encuestadas en el periodo comprendido entre los cursos 1992-1993 y 2000-2001, lo cual supuso la realización del test por más de 1.300 alumnos.

La aplicación del FCI se llevó a cabo en cada población encuestada en el ámbito de esta investigación en dos ocasiones: la primera, antes de iniciarse el proceso de

enseñanza de la Mecánica y la segunda, una vez finalizado éste, de forma que se pudiera comparar la situación existente antes y después del proceso formativo. Antes de cada aplicación, mediante alocución llevada a cabo por el responsable de la aplicación del test, de acuerdo con las pautas establecidas, se dieron instrucciones sobre la forma de resolverlo y se intentó despertar la motivación del alumnado en su participación.

La forma de resolver el test consistía en contestar cada una de las 29 preguntas del mismo determinando la opción considerada como válida, teniendo en cuenta que sólo una de ellas era la correcta. La respuesta se debía indicar resaltando con un círculo la letra correspondiente a la opción elegida en el formulario de respuestas. Se solicitó a los alumnos que, además de seleccionar la opción considerada correcta, escribieron la justificación correspondiente, anotándola en el espacio que había sido previsto debajo de cada pregunta. La justificación de la opción elegida constituyó una novedad en la resolución del test no contemplada por los autores del FCI. Con ella se pretendía comprobar si la elección de cada opción estaba acompañada de un argumento sólido y garantizar que al contestar se llevaba a cabo un ejercicio de análisis de la situación planteada. Además se pidió a los alumnos que leyeran con detenimiento y atención cada pregunta y se les dijo que toda la información necesaria para la resolución estaba implícita en el propio test, por lo que no les sería facilitada información adicional alguna. Al mismo tiempo se solicitó al profesorado responsable de los grupos de alumnos participantes que en su docencia se evitara toda explicación orientada a la resolución de las cuestiones planteadas en el test.

Tabla 4
Relación de poblaciones participantes en la investigación y de sus correspondientes acrónimos identificativos.

CENTRO ACADÉMICO	CURSO	TITULACIÓN	NIVEL UNIVERSITARIO	ACRÓNIMO
<i>Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria de la Universidad de León</i>	1992-1993	Ingeniero Técnico Agrícola	medio	ESyTIA.ULE.9293
	1993-1994			ESyTIA.ULE.9394
	1994-1995			ESyTIA.ULE.9495
	1996-1997			ESyTIA.ULE.9697
<i>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid</i>	1997-1998	Ingeniero Agrónomo	superior	ETSIA.UPM.9798
<i>Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria</i>	1997-1998	Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos	superior	ETSICCP.UC.9798
<i>Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de la Universidad de Valladolid</i>	1999-2000	Ingeniero Técnico Agrícola	medio	ETSIA.UVA.9900
<i>Escuela Politécnica Superior de Zamora de la Universidad de Salamanca</i>	1999-2000	Ingeniero Técnico de Obras Públicas	medio	EPSZOP.USAL.9900
<i>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid</i>	2000-2001	Ingeniero Industrial	superior	ETSII.UVA.0001
<i>Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria de la Universidad de León</i>	2000-2001	Ingeniero Técnico Agrícola	medio	ESyTIA.ULE.0001

Se dispuso de un tiempo aproximado de dos horas: unos veinte minutos para la alocución previa a la resolución del test y una hora y cuarenta minutos (1 h y 40 min), aproximadamente, para su realización y, salvo casos excepcionales, resultó ser tiempo suficiente.

En relación con la motivación del alumnado se explicaron los objetivos buscados con la realización del test y se justificó la necesidad de evitar cualquier valoración del esfuerzo.

Cuando se dispuso de resultados del FCI de diez poblaciones distintas a lo largo de nueve cursos consecutivos, se dio por terminado el proceso de muestreo. La corrección consistió en comprobar si la opción elegida en cada pregunta coincidía con la opción correcta. Para dos de las poblaciones de la ESyTIA.ULE –las de los cursos 1992-1993 y 1996-1997– se corrigieron también las justificaciones de la opción elegida, ya que existía interés en conocer su influencia, en los resultados del FCI. No obstante, ante la carga adicional de trabajo que supondría, se decidió aplazar la corrección sistemática de las justificaciones y el análisis de sus resultados, advirtiéndose en estas posibilidades una línea para futuras investigaciones.

En relación con la pregunta 12 del FCI (Hestenes et al., 1992), que cuestiona, entre otras cosas, la creencia habitual de que la presión atmosférica contribuye, junto con la gravedad, a una fuerza neta en sentido descendente, los autores del test admiten como respuestas correctas tanto la 12b –en la que no se tiene en cuenta el efecto de la presión atmosférica– como la 12d –en la que sí se considera el empuje que supone la diferencia de presiones a que está sometido el cuerpo por la acción de la atmósfera. Los alumnos suelen conocer el significado del Principio de Arquímedes, pero, frecuentemente, no alcanzan a entender cuál es el origen de la fuerza neta que supone el empuje (Hestenes et al., 1992). Los propios autores del test reconocen en su artículo que algunos profesores pueden pensar que los estudiantes de Física deben conocer el razonamiento científico del empuje, y por eso contemplan la opción 12d como correcta junto con la 12b. En el ámbito de esta investigación sólo la 12d ha sido considerada válida, coincidiendo así con la opinión de Harper (2003), quien también manifiesta que la aplicación del Principio de Arquímedes no debe limitarse a los casos de líquidos, sino a todos los fluidos.

En relación con las concepciones alternativas, se adoptó la taxonomía de preconceptos propuesta por Hestenes (1992) entendiendo que ésta contenía, en mayor o menor medida, los principales preconceptos detectados y caracterizados en el contexto educativo español, y aun a sabiendas de que algunos de los preconceptos incluidos en ella pueden ser más propios del sistema educativo estadounidense.

El análisis de los resultados del FCI en relación con los preconceptos consistió en observar la presencia y persistencia de los mismos en las distintas poblaciones estudiadas. No obstante, se redujo finalmente a aquellos preconceptos que se consideran más importantes, atendiendo para ello:

a) Al estudio de la justificación de las respuestas del FCI llevado a cabo en el contexto de esta investigación,

b) Al valor del *índice de importancia relativa de cada preconcepto (hi)* –cuya significación se aclara más adelante–, y

c) A la percepción que se tiene de la presencia de los distintos preconceptos contemplados entre el profesorado del sistema educativo español. En concreto, se atendió a las opiniones del profesorado participante en la investigación y, en especial, a la práctica docente del director de esta investigación y a las numerosas referencias encontradas sobre preconceptos en Mecánica en las fuentes consultadas. Entre ellas son de destacar (aun pudiendo caer en el olvido de alguna otra importante de las muchas existentes) las siguientes: Viennot (1979), Watts y Zylbersztajn (1981), Watts (1982 y 1983), Hierrezuelo y Montero (1989), Boeha (1990), Erlichson (1991), Calvo et al. (1992), Hestenes et al. (1992 y 1995), Kondratyev y Sperry (1994), Kuiper y Mondlane (1994), Twigger et al. (1994), Beeth (1995), Montanero y Pérez (1995), Hammer (1996), Hernández González (1996), Oliva y Pontes (1996) y Peduzzi y Zylbersztajn (1997).

De acuerdo con lo dicho anteriormente, se analizaron los siguientes diez preconceptos: PC13, PC10, PC03, PC20, PC12, PC16, PC23, PC09, PC01 y PC02. En la tabla 2, a la que ya se ha hecho referencia, se han destacado éstos –mediante sombreado– por considerarse, de acuerdo con los aspectos referidos, los más importantes y significativos en la enseñanza universitaria española.

A modo de ejemplo, se presentan a continuación algunas preguntas del FCI para las que la elección de determinadas opciones refleja la presencia de un preconcepto. Así la elección de la opción «b» de la pregunta 13:

«13. Un camión que se ha averiado en la carretera es empujado por un coche. Mientras el coche, empujando al camión, acelera:

»a) la fuerza que ejerce el coche sobre el camión es igual a la fuerza del camión sobre el coche.

»b) la fuerza que ejerce el camión sobre el coche es menor que la que ejerce el coche sobre el camión.

»c) la fuerza que ejerce el camión sobre el coche es mayor que la que ejerce el coche sobre el camión.

»d) el motor del coche está funcionando, por lo que aplica una fuerza mientras empuja contra el camión. Pero el motor del camión no funciona, así que no puede empujar contra el coche. El camión es empujado hacia adelante simplemente porque está en el camino del coche.

»e) ni el coche ni el camión ejercen fuerza uno sobre el otro. El camión es empujado hacia adelante simplemente porque está en el camino del coche.»

refleja la presencia del preconcepto PC16: «A mayor masa mayor fuerza ejercida», que contraviene la tercera ley de Newton.

De la misma forma, la elección de la opción «a» de la pregunta 29 del FCI

«28. Una gran caja está siendo empujada a la velocidad constante de 4 m/s (...).

29. Si la fuerza aplicada a la caja en la pregunta anterior desaparece repentinamente, la caja:

»a) se detiene inmediatamente.

»b) continúa moviéndose a velocidad constante durante un corto periodo de tiempo para detenerse luego poco a poco.

»c) comienza inmediatamente a detenerse.

»d) se mueve a velocidad constante.

»e) aumenta su velocidad durante un corto periodo de tiempo, luego, comienza a detenerse.»

refleja la presencia del preconcepto PC10: «Para que haya movimiento tiene que haber fuerzas actuando», clasificado entre aquéllos que muestran ignorar el alcance de la segunda ley de Newton.

Los resultados obtenidos fueron tratados mediante dos aplicaciones informáticas –creadas en el ámbito de la investigación bajo los entornos de Ms Excel y Visual Basic– y denominadas *PTERFCI* (Covián, 2000) y *PRP* (Covián y Tarquis, 2002). Estos dos programas permitieron la obtención de los índices de evaluación de todas las poblaciones participantes en la investigación, que son los que se describen a continuación. Para ello se indican el rango de variación absoluto y la significación, que se deduce de la propia definición de cada uno de ellos. En cualquier caso la valoración de estos índices habrá de hacerse en relación con los intervalos de variación propios de la investigación y no sólo en relación con la variación de estos índices fuera de ella o a la variación absoluta. Los índices a que se está haciendo referencia son:

1. En relación con la comprensión de las dimensiones del concepto de *fuerza*:

1.1. *Media del porcentaje de respuestas correctas del FCI (B)*: representa el nivel de conocimiento en el momento de la realización del test; se determina para la primera aplicación –antes de iniciarse la enseñanza de la Mecánica– y para la segunda aplicación del FCI –una vez finalizada la enseñanza de aquélla. Su intervalo de variación absoluto es [0%; 100%].

1.2. *Incremento relativo de respuestas correctas entre la primera y la segunda aplicaciones del FCI, respecto de la mayor mejora posible, o eficiencia didáctica¹ ($\Delta_{rel}\bar{B}$)*: representa la influencia del proceso enseñanza-aprendizaje en el nivel de conocimiento sobre el concepto de *fuerza*. Su expresión matemática para la situación más frecuente – $\bar{B}_{2^{a\ aplic. FCI}} \geq \bar{B}_{1^{a\ aplic. FCI}}$ – es:

$$\Delta_{rel}\bar{B} = \frac{\bar{B}_{2^{a\ aplic. FCI}} - \bar{B}_{1^{a\ aplic. FCI}}}{100 - \bar{B}_{1^{a\ aplic. FCI}}},$$

y su intervalo de variación absoluto es [0; 1].

2. En relación con la presencia y persistencia de preconceptos:

2.1. *Frecuencias relativas de presencia de un preconcepto (f_i)*: es una medida de la presencia del preconcepto en cuestión, ya que representa el porcentaje de veces que se presenta, y se determina en cada población para la primera y para la segunda aplicación del FCI.

2.2. *Índice de evolución de un preconcepto (m)* es una medida de su persistencia y, dependiendo de cada situación particular –según se indica a continuación–, puede representar:

a) una mejora en la presencia del preconcepto, si la frecuencia relativa es mayor en la primera aplicación del test que en la segunda, es decir, que se produce una reducción del porcentaje de presencia del preconcepto; en este caso su valor es positivo y representa la mejora relativa respecto de la mayor mejora posible –la que supondría la erradicación del preconcepto.

b) un estancamiento en la presencia del preconcepto, si la frecuencia relativa es igual en la primera aplicación del test que en la segunda ($m=0$), y

c) un empeoramiento en la presencia del preconcepto, en aquellas situaciones en las que la frecuencia relativa es menor en la primera aplicación del test que en la segunda, es decir, que se produce un aumento del porcentaje de presencia del preconcepto; en este caso, su valor es negativo y representa el empeoramiento relativo respecto del mayor empeoramiento posible –el que supondría que todos los alumnos terminaran teniendo el preconcepto.

El valor de este parámetro viene expresado matemáticamente por:

$$f_{i, 1^{a\ aplic. FCI}} > f_{i, 2^{a\ aplic. FCI}} : m = \frac{(f_{i, 1^{a\ aplic. FCI}} - f_{i, 2^{a\ aplic. FCI}})}{f_{i, 1^{a\ aplic. FCI}}} \cdot 100$$

$$f_{i, 1^{a\ aplic. FCI}} = f_{i, 2^{a\ aplic. FCI}} : m = 0$$

$$f_{i, 1^{a\ aplic. FCI}} < f_{i, 2^{a\ aplic. FCI}} : m = \frac{(f_{i, 1^{a\ aplic. FCI}} - f_{i, 2^{a\ aplic. FCI}})}{100 - f_{i, 1^{a\ aplic. FCI}}} \cdot 100$$

Su intervalo de variación será, por tanto, [-100; 100], si bien sus valores lógicos responderán, en mayor medida, a los centrales del intervalo por esperables –los preconceptos se caracterizan por su alta persistencia.

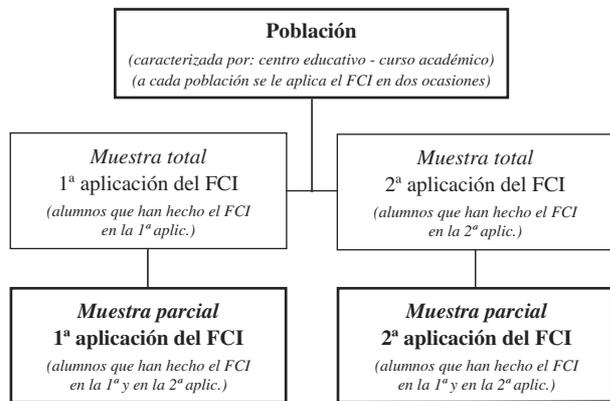
2.3. *Índice de importancia relativa de un preconcepto (h_i)*: es una medida de la importancia de cada preconcepto en relación con la del resto de los preconceptos y representa la relación entre la frecuencia relativa de presencia de un preconcepto (f_i) y el número de veces que se refleja ese preconcepto en el FCI (n) –número de opciones del test que reflejan su presencia:

$$h_i = \frac{f_i}{n}.$$

Otro de los índices utilizados en la evaluación fue el *índice de abandono* (a) que representa el porcentaje de alumnos que no realizan la segunda aplicación del FCI respecto de los que habían hecho la primera y viene expresado matemáticamente por:

$$a = \left(1 - \frac{[\text{alumnos muestreados en 2ª aplic. FCI}]}{[\text{alumnos muestreados en 1ª aplic. FCI}]} \right) \cdot 100$$

Estos índices de evaluación se determinaron tanto para las *muestras totales* como para las *muestras parciales* de cada población, si bien son los determinados para estas últimas los que tienen verdadera relevancia en la investigación. Las *muestras parciales* (destacadas en negrita en el esquema mostrado a continuación) están compuestas por los alumnos que hicieron el FCI en las dos ocasiones en que éste se propuso. La *muestra total*, para cada aplicación del test, es la compuesta por los alumnos que se presentaron a cada una de las aplicaciones.



La decisión de optar por la evaluación exclusiva de los resultados de la *muestra parcial* viene justificada por la homogeneidad frente a la heterogeneidad de la *muestra total*. Este mismo procedimiento fue puesto en práctica en los estudios de Francis, Adams y Noonan (1998).

Los citados índices de evaluación fueron también determinados para las poblaciones constituidas según el nivel educativo a que pertenecían sus alumnos: escuelas técnicas superiores (en adelante *ee.tt.ss.*) y escuelas técnicas universitarias (*ee.tt.uu.*). Las *ee.tt.ss.* y las *ee.tt.uu.* son centros universitarios que imparten titulaciones de grado superior –cinco o seis cursos académicos– y medio –tres cursos académicos–, respectivamente.

Finalmente, estos índices fueron determinados para la muestra global –constituida por todos los alumnos que participaron en la investigación–, que sirvió de referente, y para los alumnos de las poblaciones estadounidenses de las que se disponía de resultados y, en concreto, de aquellas incluidas en el artículo de presentación del FCI. Previamente se agruparon todas las poblaciones estadounidenses en sólo dos, en función de su nivel educativo –universitario o bachillerato.

El análisis de los índices de evaluación de las distintas poblaciones permitió detectar algunas dificultades en relación con la enseñanza-aprendizaje de la Mecánica: deficiente comprensión de la Mecánica, escasa eficiencia didáctica y elevada presencia y persistencia de preconceptos. Para intentar corregirlas se diseñó una actividad didáctica basada en la utilización de simulaciones informáticas en el contexto de las clases prácticas convencionales, la denominada SIFFMM, que continúa siendo objeto de aplicación y evaluación.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la investigación se presentarán diferenciando, por un lado, los de cada una de las poblaciones que hicieron el FCI con anterioridad a la realización de la experiencia SIFFMM y, por otro, los de las poblaciones *ee.tt.ss.* y *ee.tt.uu.* Los resultados alcanzados en estas dos últimas poblaciones serán comparados con los de poblaciones análogas de los EE.UU. de América.

Para facilitar la presentación de resultados y su posterior interpretación se ha considerado conveniente agruparlos en dos tablas cuyo contenido se detallará a continuación.

En concreto, en la tabla 5 se presentan los resultados relacionados con el estado general de conocimientos de Mecánica, incluyéndose tanto los obtenidos en la propia investigación, como algunos otros procedentes de los EE.UU. de América (Hestenes et al., 1992 y Crouch y Mazur, 2001). En la primera columna, en formato apaisado, se indica cómo han sido agrupados los resultados en función de su origen. En la segunda se identifica cada población mediante un acrónimo o una descripción. En las siguientes columnas se muestran, para cada población, sucesivamente:

- a) la carga lectiva de Mecánica,
- b) el número de alumnos participantes en la primera y en la segunda aplicación del FCI, así como el de los que integran la *muestra parcial*,
- c) el *índice de abandono* [a (%)],
- d) la media aritmética del porcentaje de respuestas correctas de cada aplicación del FCI (\bar{B}) junto con su desviación estándar y su error estándar, y
- e) la eficiencia didáctica ($\Delta_{rel}\bar{B}$).

Adicionalmente, para las dos poblaciones encuestadas en las que se llevó a cabo la corrección de las justificaciones, se incluye –en celdas anexas y sombreadas a las correspondientes a la media aritmética del porcentaje de respuestas correctas de cada aplicación del FCI (\bar{B})–, la media aritmética del porcentaje de respuestas correctas y convenientemente justificadas de cada aplicación del FCI, así como su desviación estándar y su error estándar. También sombreadas se encuentran las celdas cuyos datos eran desconocidos.

Tabla 5

Resultados del FCI, de la investigación y procedentes de los EE.UU. de América, relativos al estado general de conocimientos de Mecánica.

Origen	Población	CL _{Mecánica} (créditos)	FCI - n° de alumnos			a (%)	Parámetros estadísticos (muestra parcial)	%				$\Delta_{rel}B$
			1ª aplic.	2ª aplic.	muestra parcial			1ª aplic. FCI		2ª aplic. FCI		
Poblaciones encuestadas con anterioridad a la experiencia SIFFMM	ESyTIA.ULE.9293	5	248	104	90	58	Media aritmética	31,46	39,81	44,29	49,92	0,17
							Desviación estándar	16,81	16,39	18,48	17,22	
							Error estándar de la media	1,77	1,73	1,95	1,82	
	ESyTIA.ULE.9394	5	168	53	38	69	Media aritmética	43,10		52,36		0,16
							Desviación estándar	15,62		18,83		
							Error estándar de la media	2,53		3,06		
	ESyTIA.ULE.9495	5	140	18	14	87	Media aritmética	50,99		57,88		0,14
							Desviación estándar	21,22		22,39		
							Error estándar de la media	5,67		5,98		
	ESyTIA.ULE.9697	3.9	235	127	84	46	Media aritmética	26,64	36,66	32,80	40,27	0,06
							Desviación estándar	19,52	18,74	19,61	19,40	
							Error estándar de la media	2,13	2,05	2,14	2,12	
	ETSIA.UPM.9798	4.8	86	45	43	48	Media aritmética	51,56		54,45		0,06
							Desviación estándar	16,28		14,24		
							Error estándar de la media	2,48		2,17		
ETSICCP.UC.9798	7.5	132	195	86	-48	Media aritmética	59,14		69,17		0,25	
						Desviación estándar	17,63		14,67			
						Error estándar de la media	1,90		1,58			
ETSIA.UVA.9900	3.8	59	21	17	64	Media aritmética	34,08		32,45		-0,02	
						Desviación estándar	15,37		16,26			
						Error estándar de la media	3,73		3,94			
EPSZOP.USAL.9900	3.6	67	17	15	75	Media aritmética	37,47		42,30		0,08	
						Desviación estándar	13,20		16,63			
						Error estándar de la media	3,41		4,29			
ETSII.UVA.0001	4	125	20	17	84	Media aritmética	50,71		62,47		0,24	
						Desviación estándar	20,55		18,36			
						Error estándar de la media	4,98		4,45			
ESyTIA.ULE.0001	3.9	206	107	96	48	Media aritmética	35,88		40,19		0,07	
						Desviación estándar	18,17		18,55			
						Error estándar de la media	1,85		1,89			
Poblaciones compuestas y muestra global	GLOBAL		1,666	855	617	49	Media aritmética	42,36		49,12		0,12
							Desviación estándar	19,20		20,15		
							Error estándar de la media	0,77		0,81		
	Escuelas técnicas superiores		411	301	185	27	Media aritmética	51,80		60,24		0,18
							Desviación estándar	19,23		17,63		
							Error estándar de la media	1,41		1,30		
	Escuelas técnicas universitarias		1,229	530	410	57	Media aritmética	37,91		43,97		0,01
							Desviación estándar	17,68		19,38		
							Error estándar de la media	0,87		0,96		
	Institutos de enseñanza secundaria		26	24	22	8	Media aritmética	45,92		51,57		0,10
							Desviación estándar	16,39		15,12		
							Error estándar de la media	3,49		3,22		
Hestenes et al. (1992)	Universitarios EE.UU.				302	Media aritmética	32,10		68,17		0,53	
						Desviación estándar						
						Error estándar de la media						
Crouch y Mazur (2001)	Bachilleres EE.UU.				823	Media aritmética	31,82		57,99		0,38	
						Desviación estándar						
						Error estándar de la media						
Harvard University. (Traditional)					250	Media aritmética	59,00		73,50		0,35	
						Desviación estándar						
						Error estándar de la media						
Harvard University. (Peer Instruction)					1,374	Media aritmética	65,57		86,86		0,62	
						Desviación estándar						
						Error estándar de la media						

Los resultados mostrados en celdas sombreadas corresponden a los obtenidos teniendo en cuenta la justificación de la respuesta

En la tabla 6 se presentan unas observaciones cualitativas sobre la presencia y persistencia –de los diez pre-conceptos seleccionados– en las poblaciones encuestadas con anterioridad a la realización de la experiencia SIFFMM.

En la presentación de los resultados se hará referencia tanto al estado general de conocimientos de la Mecánica –reflejado por el nivel de comprensión de las leyes de Newton y a la mejora de ésta durante el curso– como a la presencia y persistencia de preconceptos.

3.1. Comprensión de las leyes de Newton

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 5, y en relación con el estado general de conocimientos de Mecánica de las poblaciones encuestadas con anterioridad a la realización de la experiencia SIFFMM, cabe señalar que:

1. La carga lectiva de la Mecánica entre las distintas poblaciones se sitúa entre 3,6 y 7,5 créditos; en las poblaciones *ESyTIA.ULE* se observa una reducción de 5 a 3,9 créditos –debido a un cambio de planes de estudio–; las poblaciones pertenecientes a *ee.tt.ss.* presentan, en general, cargas lectivas mayores.

2. El índice de abandono se encuentra comprendido entre el 46% y el 87%, a excepción del valor obtenido para la población *ETSICCP.UC.9798* (-48%) que se debe a una circunstancia motivada por la ordenación académica del curso.

3. La media del porcentaje de respuestas correctas (\bar{B}) para la primera aplicación del FCI es inferior al 50% para seis de las diez poblaciones encuestadas. En la segunda aplicación sólo una más de las poblaciones consigue superar ese umbral.

4. La eficiencia didáctica ($\Delta_{rel}\bar{B}$) se sitúa en el intervalo [-0,02; 0,25] y se observa una relación directa entre la eficiencia didáctica y la carga lectiva.

5. Es notable la influencia de la justificación de la respuesta sobre la media del porcentaje de respuestas correctas del FCI –obsérvese el contraste entre las celdas sombreadas y no, en la tabla 5, para las poblaciones *ESyTIA.ULE.9293* y *ESyTIA.ULE.9697*–, que se refleja en reducciones de los porcentajes de respuestas correctas de entre un 10% y un 30%.

La figura 1, obtenida a partir de los resultados de la tabla 5, refleja que:

Figura 1

Medias del porcentaje de respuestas correctas del FCI –representativas del nivel de comprensión de las leyes de Newton por los alumnos– de las poblaciones encuestadas en la investigación.

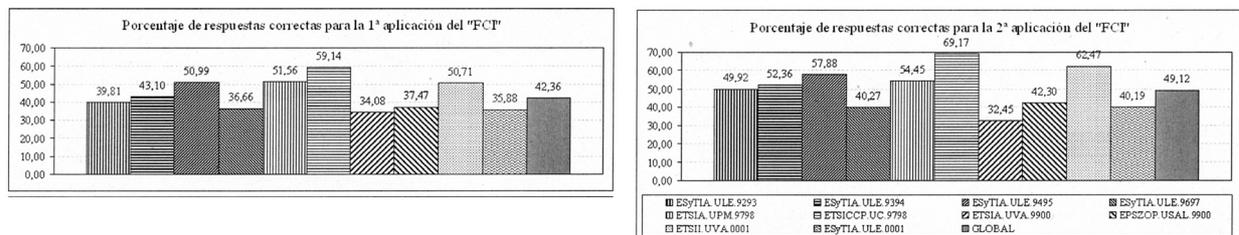


Tabla 6

Observaciones cuantitativas sobre la presencia y persistencia de los preconceptos seleccionados en las poblaciones encuestadas con anterioridad a la realización de la experiencia SIFFMM.

OBSERVACIÓN	POBLACIÓN	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DEL PRECONCEPTO										
		PC13	PC10	PC03	PC20	PC12	PC16	PC23	PC09	PC01	PC02	
Disminución de la frecuencia de presencia	Muestra global	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	no	no	sí
	Muestra representativa de los centros	no	sí	no	no	sí	sí	sí	sí	no	no	sí
Índice de evolución (m) positivo (Valor absoluto de m)	Muestra global	sí (6,9)	sí (2,4)	sí (13,0)	sí (0,6)	sí (12,7)	sí (10,9)	sí (2,9)	sí (14,7)	no (2,3)	no (21,0)	sí
Índ. de evolución positivo en todas las poblaciones (nº poblaciones: m>0)	Muestra representativa de los centros	no (3)	no (5)	no (7)	no (3)	no (7)	no (3)	no (7)	no (4)	no (4)	no (7)	no

6. Mejoran nueve de las poblaciones, mientras que sólo una empeora.

7. Las mejores poblaciones para la primera aplicación del FCI son: *ETSICCP.UC.9798*, *ETSII.UVA.0001* y *ETSIA.UPM.9798* –todas pertenecientes a *ee.tt.ss.*– y próximas a ellas se sitúan las tres poblaciones de la *ESyTIA.ULE* con mayor carga lectiva –las correspondientes al plan de estudios de 1971. El resto de poblaciones se sitúa por debajo de la muestra global. Para la segunda aplicación del FCI el ordenamiento de las poblaciones en función del nivel de comprensión del concepto de *fuerza* es muy similar.

La figura 2, elaborada a partir de resultados de la misma tabla 5, revela que:

8. Las poblaciones *ETSICCP.UC.9798* y *ETSII.UVA.0001* –ambas pertenecientes a *ee.tt.ss.*– presentan una eficiencia didáctica próxima a 0,25. Por debajo de ellas se sitúan de nuevo las poblaciones de la *ESyTIA.ULE* con mayor carga lectiva, con una eficiencia didáctica situada en el intervalo [0,14; 0,17] y todas ellas por encima de la muestra global (0,12). El resto de las poblaciones encuestadas con anterioridad a la realización de la experiencia SIFFMM se encuentran por debajo; incluso una de ellas alcanza valores negativos (*ETSIA.UVA.9900*).

En relación con la comprensión del concepto de *fuerza*, de la muestra global, de las poblaciones diferenciadas en función de su nivel educativo y de las procedentes de los EE.UU. de América, cuyos resultados se encuentran también en la tabla 5, hay que señalar:

9. La gran diferencia entre el *índice de abandono* de las *ee.tt.ss.* (27%) y el de las *ee.tt.uu.* (57%). Esta diferencia se considera congruente con la idea constatada y generalizada entre el profesorado participante en la investiga-

ción sobre el perfil vocacional más definido que suelen presentar los estudiantes de *ee.tt.ss.*

11. La media del porcentaje de respuestas correctas de la muestra global, tanto para la primera como para la segunda aplicación del FCI, no alcanza el umbral adecuado, y su eficiencia didáctica es tan sólo de 0,12.

12. La eficiencia didáctica de la población *ee.tt.ss.* (0,18) casi duplica a la de la *ee.tt.uu.* (0,10).

A la vista de la figura 3, obtenida también a partir de los resultados de la tabla 5, se advierte que:

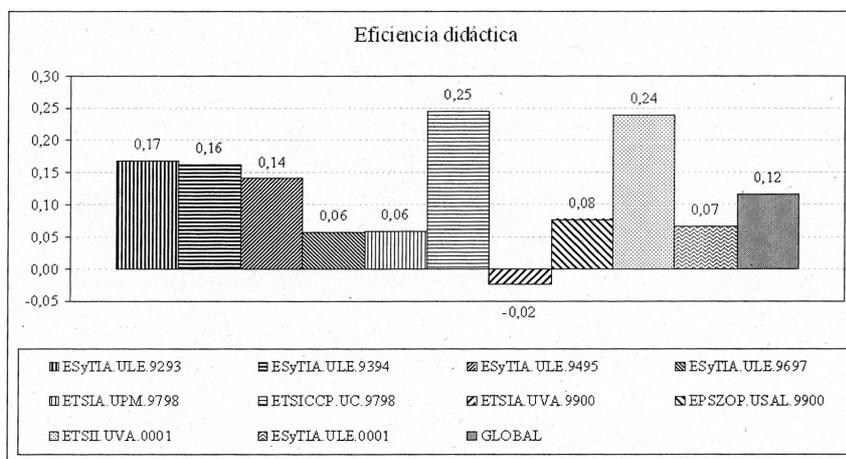
13. Todas estas poblaciones mejoran de la primera a la segunda aplicación del FCI.

14. Se confirma la tendencia que se venía observando en relación con las diferencias existentes entre los alumnos de las *ee.tt.ss.* y los de las *ee.tt.uu.* ya que la media del porcentaje de respuestas correctas, tanto para la primera como para la segunda aplicación del FCI, es bastante mayor en la población de *ee.tt.ss.* que en la de *ee.tt.uu.*

15. Por su parte, de las poblaciones estadounidenses sorprende el hecho de que, para la primera aplicación del FCI, la media del porcentaje de respuestas correctas sea del orden del 32%, resultado inferior al de la peor de las poblaciones españolas, que fue el de la *ETSIA.UVA.9900* (34,08%). Sin embargo, para la segunda aplicación del FCI, los universitarios estadounidenses (68,17%) se sitúan muy próximos a la mejor de las poblaciones españolas –*ETSICCP.UC.9798* (69,17%).

Los resultados de la tabla 5 permiten también representar gráficamente la eficiencia didáctica de las citadas poblaciones (Figura 4), pudiendo advertirse así que:

Figura 2
Eficiencia didáctica de las poblaciones encuestadas en la investigación, medida mediante el FCI.



16. La eficiencia didáctica de los universitarios estadounidenses (0,53) es casi tres veces superior a la de los alumnos de las *ee.tt.ss.* españolas (0,18) y algo más de dos veces superior a la de la mejor de las poblaciones españolas encuestadas –la *ETSICCP.UC.9798* (0,25). Estas diferencias, en lo que a eficiencia didáctica se refiere, no son tan notables en lo relativo a la media del porcentaje de respuestas correctas para la segunda aplicación del FCI –68,17% para los universitarios estadounidenses y 60,24% para los españoles.

3.2. Presencia y persistencia de preconceptos sobre el concepto de fuerza

En relación con la presencia y persistencia de preconceptos en las poblaciones encuestadas con anterioridad a la realización de la experiencia SIFFMM, los resultados de la tabla 6 indican que:

1. En la muestra global se reduce la presencia de ocho de los diez preconceptos analizados; sin embargo, sólo se reduce

Figura 3
Medias del porcentaje de respuestas correctas del FCI de las poblaciones diferenciadas en función de su nivel educativo, de la muestra global y de las poblaciones estadounidenses.

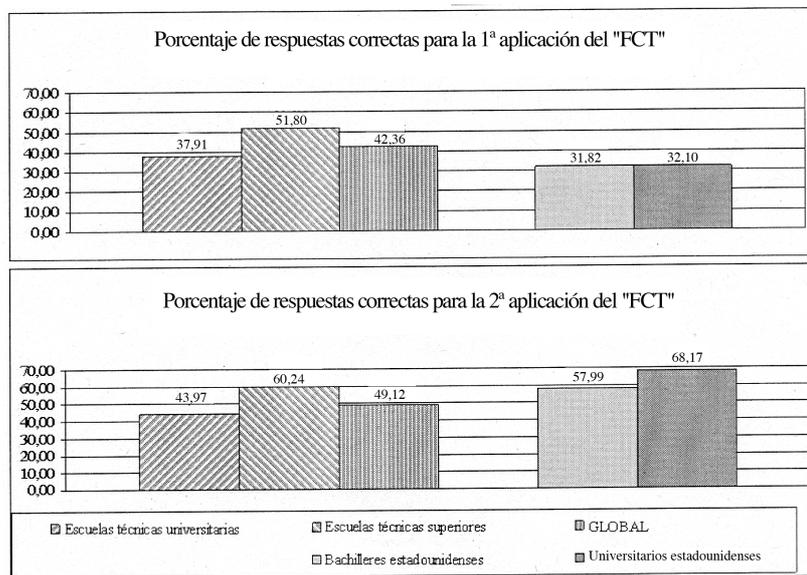
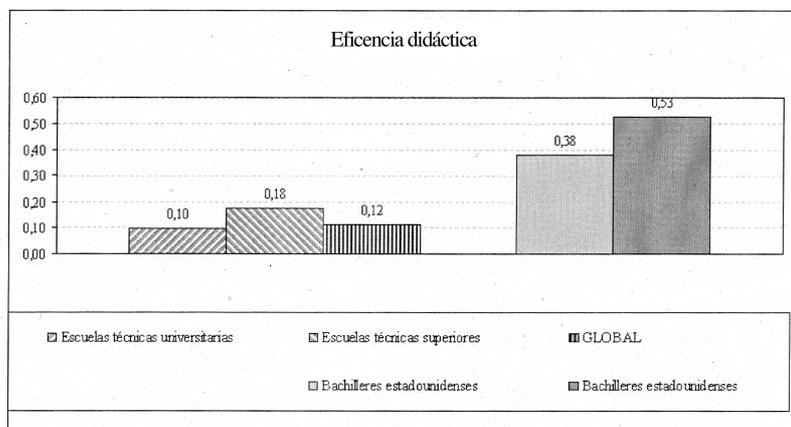


Figura 4
Eficiencia didáctica de las poblaciones diferenciadas en función de su nivel educativo, de la muestra global y de las poblaciones estadounidenses.



en cinco, cuando la disminución de la frecuencia de presencia de cada preconcepto se determina promediando las frecuencias de presencia de cada preconcepto, de cada una de las diez poblaciones encuestadas con anterioridad a la realización de la experiencia SIFFMM –muestra representativa de los centros (Tabla 6).

2. Ninguno de los diez preconceptos presenta índice de evolución positivo en todas las poblaciones. Además, para cinco de los diez preconceptos analizados, la presencia se reduce en cuatro o menos de las diez poblaciones encuestadas.

A la vista de la figura 5, obtenida a partir de los resultados de la tabla 6, se puede advertir además que:

3. Los preconceptos PC09: «Sólo los cuerpos activos ejercen fuerzas» ($m = - 14,7$) y PC01: «No diferenciación entre posición y velocidad» ($m = - 2,3$) empeoran en la muestra global.

4. Los preconceptos PC20: «La última fuerza en actuar es la que determina el movimiento», PC10: «Para que haya movimiento tiene que haber fuerzas actuando» y PC23: «La propia masa de los cuerpos hace que éstos se paren» no mejoran prácticamente nada, presentan índices de evolución muy bajos ($m < 3$).

5. En términos generales, los preconceptos analizados presentan una cierta persistencia que queda reflejada por el valor absoluto de cualquiera de los índices de evolución de preconceptos. Así puede observarse que seis de los preconceptos presentan $m < 7$ y para otros tres $10 < m \leq 13$.

4. CONCLUSIONES

En relación con las poblaciones encuestadas en el ámbito de la investigación puede afirmarse que:

– Los conocimientos de Mecánica de los alumnos que se incorporan a escuelas de ingeniería –medidos mediante el FCI– distan mucho del nivel asociado a la percepción newtoniana del concepto de *fuerza*.

– Los resultados del FCI obtenidos en la *ESyTIA.ULE* para las poblaciones de los cursos 1992-1993 y 1996-1997 muestran que el análisis de la justificación de la opción elegida supone una reducción en la media del porcentaje de respuestas correctas del test (de entre un 20 y un 30% para la primera aplicación y de entre un 10 y un 20% para la segunda aplicación del FCI).

– El rendimiento académico –medido mediante el FCI– que produce la enseñanza convencional no es relevante y no siempre se consigue que los conocimientos de los alumnos sobre el concepto de *fuerza* alcancen el nivel que corresponde a lo que se considera una adecuada comprensión de los distintos aspectos presentes en dicho concepto. En él se observa una clara influencia de la carga lectiva que, aunque no es el único factor determinante, demuestra tener una notable incidencia en el rendimiento obtenido.

En relación con las poblaciones diferenciadas según su nivel educativo y con las poblaciones de los EE.UU. de América puede afirmarse que:

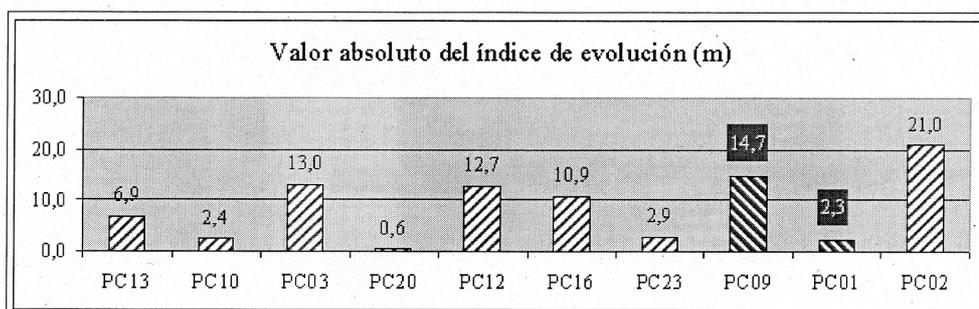
– Tanto el nivel de conocimiento del concepto de *fuerza*, de los alumnos que ingresan en las *ee.tt.ss.*, como su rendimiento académico, es mayor que el de los alumnos que acceden a las *ee.tt.uu.*

– Los estudiantes españoles inician sus estudios con unos conocimientos del concepto de *fuerza* superiores a los de los estadounidenses del correspondiente nivel educativo; sin embargo, el rendimiento académico –medido mediante el FCI– obtenido por los estadounidenses les lleva a situarse por encima una vez finalizado el proceso formativo.

Sobre la presencia y persistencia de preconceptos conviene señalar que:

– El proceso enseñanza-aprendizaje convencional no siempre consigue reducir la presencia de los preconceptos analizados en la investigación, sino que en algunos casos se produce un incremento de aquélla. La influencia es distinta según el preconcepto, pero todos ellos presentan una alta persistencia.

Figura 5
Valor absoluto del índice de evolución de cada preconcepto en la muestra global.



– La presencia de preconceptos, al final del proceso enseñanza-aprendizaje, y su persistencia es menor entre los alumnos de *ee.tt.ss.* que entre los de *ee.tt.uu.*

Una vez terminada la investigación llevada a cabo, es necesario destacar, a modo de resumen, que los resultados de la aplicación del test FCI en diferentes escuelas de ingeniería españolas durante casi una década –1992 a 2001– han permitido estudiar, de forma objetiva, el estado de conocimientos de los alumnos que se incorporan a estas escuelas acerca del concepto de *fuerza*.

Como consecuencia, se ha podido constatar que los alumnos que acceden a las escuelas de ingeniería obtienen bajos resultados en el FCI y que, a pesar de la enseñanza impartida en ellas, éstos no se consiguen mejorar suficientemente. Este problema se manifiesta en mayor medida cuando el análisis se refiere a las *ee.tt.uu.* que cuando lo hace a las *ee.tt.ss.*

A partir de los resultados del FCI, se ha constatado que existe una serie de preconceptos que se presentan en muchos de los alumnos y que muestran gran persistencia –porque apenas se ven corregidos por la enseñanza convencional–, dificultando la comprensión de la Mecánica. Todos los preconceptos analizados en la investigación habían sido detectados y caracterizados con anterioridad, pero no existía constancia de resultados numéricos relativos a su presencia y persistencia. La presencia de

preconceptos afecta en menor medida a los alumnos de *ee.tt.ss.* que a los de *ee.tt.uu.*, pero para todos ellos la persistencia es bastante alta.

AGRADECIMIENTOS

Se quiere dejar constancia, aprovechando la oportunidad que ofrece el editor, del agradecimiento que merecen los alumnos, profesores e instituciones educativas que colaboraron, desinteresadamente, en el desarrollo de la investigación. También, de forma especial, a la Dra. Ana M^a Tarquis Alfonso (Universidad Politécnica de Madrid) por su muy apreciable y desinteresada colaboración en el trabajo de tratamiento estadístico de resultados; así como a la Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León, por el reconocimiento a la labor investigadora y por el apoyo económico al equipo de investigación educativa; y, por último, al resto de compañeros del equipo de investigación que participaron en algún momento en ella.

NOTAS

1 Este parámetro fue utilizado por Hake (1998) bajo la denominación de «índice de ganancia» y es equivalente al índice de mejora determinado por el director y el autor de esta investigación (Celemin, Barnechea y Covián, 2001); posteriormente fue utilizado también por Crouch y Mazur (2001) y por Steinberg y Donnelly (2002) y se ha convertido en uno de los parámetros habituales de evaluación de resultados del FCI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arizona State University (2002). ASU education reformers earn national recognition ASUInsight [en línea]. Tempe (Arizona, Estados Unidos de América): Arizona State University. <<http://www.asu.edu/news/printedition/pdfs/041902.pdf>> [Consulta: 6 de febrero de 2007].
- BRACIKOWSKI, C., GARCÍA, P.J. y HARPER, D.J. (1998). Getting the feel for vector addition of forces. *The Physics Teacher*, 36, p. 114.
- CELEMÍN, M. y COVIÁN, E. (1998a). El FCI como instrumento de evaluación del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Mecánica en las enseñanzas técnicas. VI Congreso de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas, Las Palmas de Gran Canaria, 9-11 de septiembre. Reproducido en las *Actas del VI Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas*. Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de publicaciones de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria, tomo 1, pp. 333-351.
- CELEMÍN, M., COVIÁN, E., PALENCIA, C., VICENTE, P., DÍEZ, P. y GARCÍA FERNÁNDEZ, M. (1998b). Evaluación del proceso enseñanza-aprendizaje de la Mecánica de Newton. Proyecto de investigación desarrollado en el marco de la convocatoria del programa de apoyo a proyectos de investigación a realizar en 1997, por medio de la Orden de 26 de marzo de 1996 de la Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León. (2 tomos). León, julio (sin publicar).
- CELEMÍN, M. y COVIÁN, E. (1999). Misconceptions in Mechanics in first year engineering students [en línea]. International Conference of Engineering Education. Ostrava-Praga (Rep. Checa), 10-14 de agosto. Reproducido en las *Actas de la International Conference of Engineering Education 1999*. <<http://www.fs.vsb.cz/akce/1999/icee99/Proceedings/papers/212/212.htm>> [Consulta: 6 de febrero de 2007].
- CELEMÍN, M., BARNECHEA, E. y COVIÁN, E. (2001). Engineering Physics Laboratory Work Assessment [en línea]. International Conference of Engineering Education. Oslo, 6-10 de agosto. Reproducido en las *Actas de la International Conference of Engineering Education 2001*. <<http://www.ineer.org/Events/ICEE2001/Proceedings/papers/301.pdf>> [Consulta: 6 de febrero de 2007].
- CELEMÍN, M., BARRIENTOS, P. y BARNECHEA, E. (2002). Integración del laboratorio en el aula: aplicación a la Mecánica. VIII Congreso de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas, San Sebastián, 4-6 de septiembre. Reproducido en las *Actas del VIII Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas*. San Sebastián: Servicio de publicaciones de la Universidad del País Vasco, pp. 35-48.

- COURT, J.E. (1999a). Free-body diagrams revisited - I. *The Physics Teacher*, 37, pp. 427-433.
- COURT, J.E. (1999b). Free-body diagrams revisited - II. *The Physics Teacher*, 37, pp. 490-495.
- CROUCH, H. y MAZUR, E. (2001). Peer instruction: ten years of experience and results. *American Journal of Physics*, 69(9), pp. 970-977.
- ERLICHSON, H. (1991). Motive force and centripetal force in Newton's mechanics. *American Journal of Physics*, 59(9), pp. 842-849.
- ERLICHSON, H. (1995). Newton's strange collisions. *The Physics Teacher*, 33, pp. 169-171.
- ERLICHSON, H. (2000). Instantaneous Impulses. *The Physics Teacher*, 38, p. 289.
- FAGEN, A.P., CROUCH, C.H. y MAZUR, E. (2002). Peer instruction: results from a range of classrooms. *The Physics Teacher*, 40, pp. 206-209.
- FRANCIS, G.E., ADAMS, J.P. y NOONAN, E.J. (1998). Do they stay fixed? *The Physics Teacher*, 36, pp. 488-490.
- HAKE, R. (1998). Interactive-engagement vs. traditional methods: a six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66, pp. 64-74.
- HAMMER, D. (1996). More than misconceptions: multiple perspectives on student knowledge and reasoning, and appropriate role for education research. *American Journal of Physics*, 64(10), pp. 1.316-1.325.
- HARPER, J. (2003). Archimedes' Principle and the FCI. *The Physics Teacher*, 41, p. 510.
- HENDERSON, C. (2002). Common concerns about the Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 40, pp. 542-547.
- Hestenes, D. y Halloun, I. (1995). Interpreting the Force Concept Inventory. A response to Huffman and Heller. *The Physics Teacher*, 33, pp. 502-506.
- HESTENES, D., WELLS, M. y SWACKHAMER, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30, pp. 141-158.
- HEWSON, P.W. y BEETH, M.E. (1995). Enseñanza para un cambio conceptual: ejemplos de fuerza y movimiento. *Enseñanza de las Ciencias*, 13(1), pp. 25-35.
- HIERREZUELO, J. y MONTERO, A. (1988). *La Ciencia de los Alumnos. Su utilización en la didáctica de la Física y Química*. Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia y Ed. Laia, S.A.
- HUFFMAN, D. y HELLER, P. (1995). What does the Force Concept Inventory actually measure? *The Physics Teacher*, 33, pp. 138-143.
- KONDRATYEV, A.S. y SPERRY, W. (1994). Direct use of vectors in Mechanics problems. *The Physics Teacher*, 32, pp. 416-418.
- MATHOT, L.G. (1993). Free-body diagrams. *The Physics Teacher*, 31, p. 390.
- Newburgh, R. (1994). Force diagrams: How? and why? *The Physics Teacher*, 32, p. 352.
- PEDUZZI, L.O.Q. y ZYLBERSZTAJN, A. (1997). La Física de la fuerza impresa y sus implicaciones para la enseñanza de la Mecánica. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(3), pp. 351-359.
- SAVINAINEN, A. y SCOTT, P. (2002a). The Force Concept Inventory: a tool for monitoring student learning. *Physics Education*, 37, pp. 45-52.
- SAVINAINEN, A. y SCOTT, P. (2002b). Using the Force Concept Inventory to monitor student learning and to plan teaching. *Physics Education*, 37, pp. 53-58.
- SMITH, P.A. (1992). Let's Get Rid of Centripetal Force. *The Physics Teacher*, 30, pp. 316-317.
- SOLANO, I., JIMÉNEZ-GÓMEZ, E. y MARÍN, N. (2000). Análisis de la metodología utilizada en la búsqueda de lo que el alumno sabe» sobre fuerza. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(2), pp. 171-188.
- STEINBERG, R.N. y DONELLY, K. (2002). PER-based reform at a multicultural institution. *The Physics Teacher*, 40, pp. 108-114.
- VAN DEN BERG, E. y VAN HUIS, C. (1998). Drawing Forces, *The Physics Teacher*, 36, pp. 222-223.
- VAN DOMELLEN, D.J. y VAN HEUVELEN, A. (2002). The effects of a concept-construction lab course on FCI performance. *American Journal of Physics*, 70(7), pp. 779-780.

[Artículo recibido en febrero de 2005 y aceptado en febrero de 2007]

Ten years of evaluation of the teaching-learning of Newtonian Mechanics at Spanish engineering schools: influence on the level of knowledge and in the persistence of misconceptions.

COVIÁN REGALES, ENRIQUE¹ y CELEMÍN MATACHANA, MIGUEL²

¹ Universidad de Oviedo (España)

² Universidad de León (España)

covianenrique@uniovi.es

miguel-celemin@unileon.es

Abstract

Newtonian Mechanics is one of the bases of modern engineering and the concept of force is essential in its study. Such a magnitude appears in the first, second, and the third Newtonian Laws, which makes it necessary to take into account its vectorial character. A number of studies show the existence of difficulties in the application of the aforementioned fundamental laws. Amongst them, those related to the elaboration of the free-body diagram and those related to the existence of misconceptions should be pointed out. However, the studies devoted to the quantification of its presence and persistence are practically non-existent, so it is also necessary to conduct research into the evolution of alternative conceptions.

The Force Concept Inventory (FCI according to Hestenes et al., 1992) is a multiple choice test designed to check the understanding of the basic concepts of Newtonian Mechanics. It can be used as a tool of evaluation of the knowledge about mechanics and educational efficiency and for the detection of misconceptions in mechanics. In the research field, it was chosen as the main tool of evaluation, showing a great number of possibilities that matched the objectives of the study. This is a test which is well recognized in the field of educational research in relation to the teaching of mechanics.

The FCI, in a Spanish translation, has been applied since 1992, and this paper shows the data obtained in the ten populations of engineering schools surveyed until the 2000-2001 academic year. This refers to 1,300 first-year students who were studying the subject, in which they were taught knowledge about classical Mechanics. In addition, we have at our disposal results from a number of U.S. universities, which will be used as a reference for comparison.

The FCI was applied twice to each population: the first one was before the beginning of the academic year and the second one once the teaching of Mechanics was over. This way we can not only test the level of knowledge of Mechanics and detect the existence of misconceptions at the beginning of the university course, but we can also measure the educational efficiency achieved during the teaching-learning process completed during the first year of university. We can also study the persistence of misconceptions. Furthermore, two innovations were introduced related to the conventional use of the aforementioned test:

a) The students were asked to justify briefly each of the chosen options to check if the choice of each option was accompanied by a scientific argument and to improve the reliability of the FCI as an alternative way to the one proposed by Hestenes et al.

b) Some of the misconceptions included in the Hestenes taxonomy were accounted for.

The results of the research are presented differentiating, on the one hand, those of each of the populations which took part in the FCI, and on the other hand, those of the populations constructed, taking into account the educational level to which their students belonged: ee.tt.ss. and ee.tt.uu., which are university establishments which run 5 or 6 year degrees and 3 year degrees respectively. The results reached in these two last populations are compared with those of the similar populations in the U.S.A.

In terms of the populations surveyed, it can be pointed out that:

- The knowledge of mechanics of the students who enter engineering schools is far different from the level associated to the Newtonian perception of the concept of force.

- When the justification of the chosen option is analysed, a significant decrease in the percentage average of the right answers to the test can be observed.

- The academic output resulting from the conventional teaching system is not satisfactory and the teaching hours show an outstanding insistence on it.

In relation to the populations established according to their educational level and the American populations it can be said that:

- Both the level of knowledge of the concept of force of the students who enter ee.tt.ss., as well as their academic output is higher than those of the students who enter the ee.tt.uu.

- Spanish students begin their studies with a higher knowledge of the force concept than the U.S. students at the corresponding educational level. However, the academic output obtained by the U.S. students makes them higher achievers once the teaching-learning process has finished.

With regard to the presence and persistence of misconceptions, it should be highlighted that:

– The conventional teaching-learning process does not always decrease the presence of the misconceptions analysed in the investigation. The influence is different depending on the misconception, but all of them show high persistence.

– The presence of misconceptions at the end of the

teaching-learning process, and their persistence is lower amongst the students from ee.tt.ss. than those from ee.tt.uu.

Taking into account the results shown in this article, we detected a very low level of knowledge of the concept of force, a low academic output and the presence of misconceptions in this field. The problems detected are considered not to be compatible with a proper understanding of Newtonian Mechanics.

Keywords

Force concept, misconceptions, rigid body mechanics, engineering education.