



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

TESIS DOCTORAL POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES

*Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como
apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de
Materiales de titulaciones técnicas*

Departamento de Informática y Automática

AUTOR

D. Manuel Pablo Rubio Cavero

DIRECTORES

Dra. D^a. Sara Rodríguez González

Dr. D. Diego Vergara Rodríguez

Agradecimientos

En el largo camino del desarrollo de esta Tesis he recibido la ayuda y el apoyo de personas a las que quisiera expresar mi más sincero agradecimiento.

A mi Director de Tesis, profesor, amigo y compañero de profesión, Dr. D. Diego Vergara Rodríguez. Gracias por tus ánimos, por tu trabajo incansable en la investigación y publicación de los resultados en todos estos años y por la continua e inestimable guía que me has brindado. “Sin ti, no hubiera podido llegar hasta aquí”.

A mi Directora de Tesis, amiga, compañera de estudios y de profesión, Dra. D^a. Sara Rodríguez González. Gracias por tus consejos y ayuda constante a pesar de tu limitado tiempo por la cantidad de tareas que llevas a cabo.

A mis compañeros del Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería de la Escuela Politécnica Superior de Zamora, Juan Ortiz, Pedro Hernández, Manuel López, Rubén Rodríguez y Roberto Rodríguez. Vuestro apoyo y ayuda en la docencia me ha permitido poder dedicar más tiempo a la investigación, a las publicaciones y al desarrollo de esta Tesis.

A mi familia, mi madre Emiliana, mi hermana María Rosa y mi hermano Juan Antonio. Vuestro aliento en los momentos difíciles ha sido el que me ha empujado a culminar este trabajo.

Índice

1.	Solicitud de presentación de Tesis Doctoral.....	5
1.1.	Compendio de trabajos publicados	6
1.2.	Autorización de los directores.....	8
1.3.	Aceptación de los coautores	9
1.4.	Descripción de la aportación científica a las publicaciones	15
2.	Memoria descriptiva de las publicaciones presentadas	20
2.1.	Introducción	20
	• Tipos y comparativa de los Sistemas de Realidad Virtual	23
	• Diseño y creación de las aplicaciones de RVNI	25
	• Motivación de la investigación de las aplicaciones de RVNI de esta Tesis.....	27
2.2.	Objetivos e hipótesis de trabajo	29
2.3.	Coherencia y relación directa entre los artículos.....	31
2.4.	Conclusiones	34
2.5.	Referencias	36
3.	Publicaciones originales presentadas.....	40
3.1.	New approach for the teaching of concrete compression tests in large groups of engineering students	41
3.2.	Enhancing the teaching/learning of materials mechanical characterization by using virtual reality	42
3.3.	A virtual environment for enhancing the understanding of ternary phase diagrams.....	43
3.4.	The application of didactic virtual tools in the instruction of industrial radiography	44
3.5.	Active methodologies through interdisciplinary teaching links: industrial radiography and technical drawing.....	45
4.	Resúmenes de las publicaciones	46
4.1.	New approach for the teaching of concrete compression tests in large groups of engineering students	47

4.2. Enhancing the teaching/learning of materials mechanical characterization by using virtual reality.....	53
4.3. A virtual environment for enhancing the understanding of ternary phase diagrams.....	59
4.4. The application of didactic virtual tools in the instruction of industrial radiography	65
4.5. Active methodologies through interdisciplinary teaching links: industrial radiography and technical drawing.....	71

1. Solicitud de presentación de Tesis Doctoral

Manuel Pablo Rubio Cavero con DNI 11737968X, matriculado en el Programa de Doctorado en Ingeniería Informática con número de expediente 53,

Solicita:

que se tenga en consideración la información aportada en este documento con el objetivo de poder presentar la tesis con título *“Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de Materiales de titulaciones técnicas”* mediante el formato de compendio de artículos/publicaciones.

La información aportada se corresponde con lo establecido en el Procedimiento para la presentación de la tesis doctoral en la Universidad de Salamanca en el Formato de Compendio de Artículos/Publicaciones.

A continuación, se detallan los documentos adjuntos en esta solicitud:

- Página Inicial especificando que la tesis corresponde a un compendio de trabajos previamente publicados detallando para cada uno de ellos: referencia de la revista, DOI y afiliaciones de cada uno de los autores.
- Autorización del director o codirector para la presentación de la tesis mediante el formato de compendio de artículos/publicaciones.
- Aceptación de los coautores.
- Como es el caso de que el doctorando no es el primer autor de las publicaciones, se incluye una memoria en la que se describe cuál ha sido su aportación científica a las publicaciones, debidamente certificada por los directores de la tesis doctoral.
- Apartado en castellano que refleja la coherencia y relación directa entre los artículos/publicaciones presentados. Dicho apartado incluirá al menos una introducción con los antecedentes del tema objeto de estudio, la hipótesis de trabajo y los objetivos, así como las principales conclusiones.
- Copia completa de las publicaciones originales que conformarán la Tesis Doctoral (artículos, capítulos de libro, libro o libros aceptados o publicados).
- Para cada uno de los artículos presentados, un resumen en castellano en el cual se especifican: los objetivos de la investigación, la metodología utilizada, los resultados alcanzados, y las conclusiones finales.

1.1. Compendio de trabajos publicados

Esta tesis doctoral consiste en un compendio de cinco documentos científicos publicados previamente en revistas internacionales de impacto y que se especifican a continuación.

1. "NEW APPROACH FOR THE TEACHING OF CONCRETE COMPRESSION TESTS IN LARGE GROUPS OF ENGINEERING STUDENTS"

Vergara, D.¹, Rubio, M. P.², & Lorenzo, M.³

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

³ Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, 143(2), 05016009. ISSN: 1052-3928

DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000311](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000311)

Editorial: ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS.

Lugar de publicación: RESTON, VA (USA)

Fecha de publicación: 2017.

Factor de impacto: publicado (jcr-2017) 1.313.

Posición: 42/86 (jcr-2017), Q2 (Engineering, multidisciplinary). 30 citas (julio 2021)

2. "ENHANCING THE TEACHING/LEARNING OF MATERIALS MECHANICAL CHARACTERIZATION BY USING VIRTUAL REALITY"

Vergara, D.¹, Rubio, M. P.², Prieto, F.² & Lorenzo, M.³

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

³ Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 38 (3-4): 63-74. (2016)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2016.

Factor de impacto: publicado (jcr-2016) 0.452.

Posición: 36/41 (jcr-2016), Q4 (Education, Scientific disciplines). 25 citas (julio 2021)

3. "A VIRTUAL ENVIRONMENT FOR ENHANCING THE UNDERSTANDING OF TERNARY PHASE DIAGRAMS"

Vergara, D.¹, Rubio, M. P.², & Lorenzo, M.³

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

³ Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 37 (3-4): 93-102 (2015)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2015.

Factor de impacto: publicado (jcr-2015) 0.875.

Posición: 28/40 (jcr-2015), Q3 (Education, Scientific disciplines). 14 citas (julio 2021)

4. **"THE APPLICATION OF DIDACTIC VIRTUAL TOOLS IN THE INSTRUCTION OF INDUSTRIAL RADIOGRAPHY"**

Vergara, D.¹ & Rubio, M. P.²

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 37 (1-2): 17 - 26 (2015)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2015.

Factor de impacto: publicado (jcr-2015) 0.875.

Posición: 28/40 (jcr-2015), Q3 (Education, Scientific disciplines). 22 citas (julio 2021).

5. **"ACTIVE METHODOLOGIES THROUGH INTERDISCIPLINARY TEACHING LINKS: INDUSTRIAL RADIOGRAPHY AND TECHNICAL DRAWING"**

Vergara, D.¹ & Rubio, M. P.²

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 34 (5-6): 175 - 186 (2012)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2012.

Factor de impacto: publicado (jcr-2012) 0.714.

Posición: 23/34 (jcr-2012), Q3 (Education, Scientific disciplines). 18 citas (julio 2021).

1.2. Autorización de los directores

La Dra. D^a. Sara Rodríguez González, DNI 70864126E, Profesora Titular de Universidad del Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca y el Dr. D. Diego Vergara Rodríguez, DNI 45682855W, Profesor y Vicedecano de la Facultad de CC. SS. y JJ. (Área de Humanidades, Idiomas y Educación) de la Universidad Católica de Ávila.

Hacen constar:

Que como directores de la tesis doctoral de Manuel Pablo Rubio Cavero con DNI 11737968X, le autorizan a presentar la tesis doctoral “*Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de Materiales de titulaciones técnicas*”, mediante la modalidad de compendio de artículos al disponer de los siguientes artículos publicados:

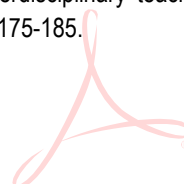
1. Vergara, D., Rubio, M. P., & Lorenzo, M. (2017). New approach for the teaching of concrete compression tests in large groups of engineering students. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 143(2), 05016009. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000311](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000311)
2. Vergara, D., Rubio, M. P., Prieto, F., & Lorenzo, M. (2016). Enhancing the teaching/learning of materials mechanical characterization by using virtual reality. *Journal of Materials Education*, 38(3-4), 63-74.
3. Vergara, D., Rubio, M. P., & Lorenzo, M. (2015). A virtual environment for enhancing the understanding of ternary phase diagrams. *Journal of Materials Education*, 37(3-4), 93-101.
4. Vergara, D., & Rubio, M. P. (2015). The application of didactic virtual tools in the instruction of industrial radiography. *Journal of Materials Education*, 37(1-2), 17-26.
5. Vergara, D., & Rubio, M. P. (2012). Active methodologies through interdisciplinary teaching links: industrial radiography and technical drawing. *Journal of Materials Education*, 34(5-6), 175-185.

Y firman esta carta de autorización.

Fdo.: Sara Rodríguez González



Fdo.: Diego Vergara Rodríguez



1.3. *Aceptación de los coautores*

“NEW APPROACH FOR THE TEACHING OF CONCRETE COMPRESSION TESTS IN LARGE GROUPS OF ENGINEERING STUDENTS”

Vergara, D.¹, Rubio, M. P.², & Lorenzo, M.³

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

³ Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, 143(2), 05016009. ISSN: 1052-3928

DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000311](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000311)

Editorial: ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS.

Lugar de publicación: RESTON, VA (USA)

Fecha de publicación: 2017.

Factor de impacto: publicado (jcr-2017) 1.313.

Posición: 42/86 (jcr-2017), Q2 (Engineering, Multidisciplinary)

Los coautores del trabajo titulado “NEW APPROACH FOR THE TEACHING OF CONCRETE COMPRESSION TESTS IN LARGE GROUPS OF ENGINEERING STUDENTS” con D.O.I: 10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000311, hacen constar que Manuel Pablo Rubio Cavero con DNI: 11737968X es el autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conocen y dan su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que D. Manuel Pablo Rubio Cavero presente su tesis doctoral denominada “*Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de Materiales de titulaciones técnicas*” en el formato de compendio de artículos:


D. Diego Vergara Rodríguez

D. Miguel Ángel Lorenzo Fernández

"ENHANCING THE TEACHING/LEARNING OF MATERIALS MECHANICAL CHARACTERIZATION BY USING VIRTUAL REALITY"

Vergara, D.¹, Rubio, M. P.², Prieto, F.² & Lorenzo, M.³

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

³ Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 38 (3-4): 63-74. (2016)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2016.

Factor de impacto: publicado (jcr-2016) 0.452.

Posición: 36/41 (jcr-2016), Q4 (Education, Scientific disciplines)

Los coautores del trabajo titulado "ENHANCING THE TEACHING/LEARNING OF MATERIALS MECHANICAL CHARACTERIZATION BY USING VIRTUAL REALITY", hacen constar que Manuel Pablo Rubio Cavero con DNI: 11737968X es autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conocen y dan su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que D. Manuel Pablo Rubio Cavero presente su tesis doctoral denominada "*Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de Materiales de titulaciones técnicas*" en el formato de compendio de artículos:

)

D. Diego Vergara Rodríguez

D. Fernando Prieto Acera

D. Miguel Ángel Lorenzo Fernández

"A VIRTUAL ENVIRONMENT FOR ENHANCING THE UNDERSTANDING OF TERNARY PHASE DIAGRAMS"

Vergara, D.¹, Rubio, M. P.², & Lorenzo, M.³

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

³ Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 37 (3-4): 93-102 (2015)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2015.

Factor de impacto: publicado (jcr-2015) 0.875.

Posición: 28/40 (jcr-2015), Q3 (Education, Scientific disciplines)

Los coautores del trabajo titulado "A VIRTUAL ENVIRONMENT FOR ENHANCING THE UNDERSTANDING OF TERNARY PHASE DIAGRAMS", hacen constar que Manuel Pablo Rubio Cavero con DNI: 11737968X es el autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conocen y dan su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que D. Manuel Pablo Rubio Cavero presente su tesis doctoral denominada "*Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de Materiales de titulaciones técnicas*" en el formato de compendio de artículos:

D. Diego Vergara Rodríguez

D. Miguel Ángel Lorenzo Fernández

"THE APPLICATION OF DIDACTIC VIRTUAL TOOLS IN THE INSTRUCTION OF INDUSTRIAL RADIOGRAPHY"

Vergara, D.¹ & Rubio, M. P.²

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 37 (1-2): 17 - 26 (2015)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2015.

Factor de impacto: publicado (jcr-2015) 0.875.

Posición: 28/40 (jcr-2015), Q3 (Education, Scientific disciplines)

El coautor del trabajo titulado "THE APPLICATION OF DIDACTIC VIRTUAL TOOLS IN THE INSTRUCTION OF INDUSTRIAL RADIOGRAPHY", hace constar que Manuel Pablo Rubio Cavero con DNI: 11737968X es autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conoce y da su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que D. Manuel Pablo Rubio Cavero presente su tesis doctoral denominada "*Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de Materiales de titulaciones técnicas*" en el formato de compendio de artículos:

D. Diego Vergara Rodríguez



**"ACTIVE METHODOLOGIES THROUGH INTERDISCIPLINARY TEACHING LINKS:
INDUSTRIAL RADIOGRAPHY AND TECHNICAL DRAWING"**

Vergara, D.¹ & Rubio, M. P.²

¹ Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila.

² Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca

Journal of Materials Education Vol. 34 (5-6): 175 - 186 (2012)

Editorial: Int council materials education Univ n Texas, 1155 union circle #30510.

Lugar de publicación: Denton, TX (USA)

Fecha de publicación: 2012.

Factor de impacto: publicado (jcr-2012) 0.714.

Posición: 23/34 (jcr-2012), Q3 (Education, Scientific disciplines)

El coautor del trabajo titulado "ACTIVE METHODOLOGIES THROUGH INTERDISCIPLINARY TEACHING LINKS: INDUSTRIAL RADIOGRAPHY AND TECHNICAL DRAWING, hace constar que Manuel Pablo Rubio Cavero con DNI: 11737968X es autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conoce y da su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que D. Manuel Pablo Rubio Cavero presente su tesis doctoral denominada "Uso de aplicaciones de Realidad Virtual como apoyo a la docencia en asignaturas de Ciencia de Materiales de titulaciones técnicas" en el formato de compendio de artículos:

D. Diego Vergara Rodríguez

1.4. Descripción de la aportación científica a las publicaciones

El Procedimiento para la presentación de la tesis doctoral de la Universidad de Salamanca en el Formato de Compendio de Artículos/Publicaciones establece en su apartado 2.2.b:

“El doctorando deberá ser primer autor de al menos dos de las aportaciones presentadas. En el caso de que no sea primer autor, el doctorando especificará cuál ha sido su aportación científica a la publicación lo que deberá estar certificado por el director de la tesis doctoral”.

En la presente tesis doctoral, el doctorando aparece como segundo autor en todas las publicaciones y por lo tanto a continuación se detalla su aportación científica a las mismas.

El doctorando ha estado trabajando en el campo del modelado y la animación 3D desde sus orígenes en los años 90. Después de terminar los estudios de Ingeniería Técnica Industrial comenzó a trabajar en empresas del sector creando películas y aplicaciones interactivas de diversa temática. Más tarde, se incorporó como Profesor Asociado y Profesor Colaborador en la Escuela Politécnica Superior de Zamora de la Universidad de Salamanca en el Área de Expresión Gráfica. Allí continuó impartiendo docencia y dirigiendo trabajos fin de carrera y grado con las mismas técnicas aplicadas a los campos de las Ingenierías Mecánica y Civil. Simultáneamente, siguió realizando estudios y obtuvo el título de Ingeniero de Materiales y el Máster Universitario en Sistemas Inteligentes. Además de sus actividades docentes y formativas, se interesó en la investigación del uso de estas técnicas en la mejora del aprendizaje de conceptos técnicos.

Trabajando conjuntamente con el Profesor Diego Vergara Rodríguez, comenzó a estudiar el uso de las aplicaciones interactivas en la docencia práctica de asignaturas técnicas en ciencia de materiales (por ser un tema común a ambos). Se consideraban todas las fases del proceso: elección de los conceptos a desarrollar y objetivos, diseño de la aplicación en todos sus niveles: aspecto visual, sistemas de control, hardware y software necesarios,

creación de la aplicación y pruebas de uso, etc.; así como la metodología de uso en las clases y los métodos de evaluación de su posible utilidad en la mejora de los resultados del aprendizaje de los estudiantes. Simultáneamente, se comenzaron a elaborar artículos y a presentar ponencias en congresos de temática relacionada con enseñanza superior en titulaciones técnicas. Entre otras muchas publicaciones, se muestran como ejemplo:

Comunicaciones en congresos:

- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
Aplicación de las nuevas tecnologías para facilitar la visualización de los diagramas de equilibrio ternarios.
2^{as} Jornadas de innovación educativa – Escuela Politécnica Superior de Zamora (2007), 768-775.
- D. VERGARA y M.P. RUBIO
Nuevas herramientas docentes para favorecer la comprensión de las radiografías de piezas industriales con defectos de fabricación.
XVI CUIEET, Cádiz (2008).
- M.P. RUBIO y D. VERGARA
Herramientas didácticas interdisciplinares en ingeniería: dibujo técnico y materiales.
INGEGRAF 21, Lugo (2009).
- D. VERGARA, M.P. RUBIO, M. LORENZO y A. RAMOS
Nuevas herramientas docentes interdisciplinares: mecánica de medios continuos y expresión gráfica.
Third International Symposium on Project Approaches in Engineering Education, Lisboa (2011), 143-150.
- M.P. RUBIO, D. VERGARA, M. LORENZO y A. RAMOS
Aplicación de plataformas virtuales interactivas en la docencia universitaria: Mecánica Técnica.
1^{as} Jornadas de Innovación Docente, Salamanca (2011), 281-286.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO, M. ZURRO y F. ESPEJO
Aplicación de plataformas virtuales interactivas en la docencia universitaria: Radiología Industrial.
Jornadas de Innovación y TIC Educativas - JITICE'12, Madrid (2012), 69-72.
- M.P. RUBIO y D. VERGARA
Nuevas metodologías para mejorar la visión espacial del alumnado: la radiología industrial.
Xornadas de Innovación Educativa, Vigo (2012), 357-364.
- D. VERGARA, J.M. MEZQUITA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
Gamificación educativa: una forma de evaluar el proceso de enseñanza/aprendizaje.
VII Congreso Mundial de Estilos de Aprendizaje, CMEA 2016, Bragança, Portugal (2016), 1819-1826.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y P. FERNÁNDEZ
Recursos virtuales para resolver problemas de visualización espacial: aplicación a las redes cristalográficas.
V Jornadas de Innovación Docente, Universidad San Jorge, Zaragoza (2016), 299-308.
- D. VERGARA y M.P. RUBIO
Utilidad del PDF 3D para ejercitar la capacidad de visión espacial.
Jornadas de Innovación y TIC Educativas - JITICE'16, Madrid (2016).
- D. VERGARA, M.P. RUBIO, M. LORENZO, R. RODRÍGUEZ y P. FERNÁNDEZ.
Refuerzo de habilidades espaciales mediante plataformas virtuales interactivas
VI Jornadas de Innovación Docente, Universidad San Jorge, Zaragoza (2017).
- D. VERGARA, M.P. RUBIO, M. LORENZO y R. RODRÍGUEZ.
Recursos digitales para reforzar la visión espacial
II Congreso de Innovación Docente Universitaria Telein2 (2017).

- M.P. RUBIO, D. VERGARA, S. RODRÍGUEZ y J. EXTREMERA.
Virtual reality learning environments in materials engineering: Rockwell hardness test
8th International Conference in Methodologies and Intelligent Systems for Technology Enhanced Learning (Mis4TEL-18). Toledo (2018).
- M.P. RUBIO y D. VERGARA.
Uso del PDF 3D como refuerzo a los problemas de visión espacial
I Congreso iberoamericano de docentes, Algeciras (Cádiz) (2018).
- M.P. RUBIO, D. VERGARA y S. RODRÍGUEZ.
Immersive virtual reality in technical drawing of engineering degrees
9th International Conference in Methodologies and Intelligent Systems for Technology Enhanced Learning (Mis4TEL-19). Ávila (2019).
- D. VERGARA, M.P. RUBIO, M. LORENZO y S. RODRÍGUEZ.
On the importance of the design of virtual reality learning environments
9th International Conference in Methodologies and Intelligent Systems for Technology Enhanced Learning (Mis4TEL-19). Ávila (2019).
- D. VERGARA, P. FERNÁNDEZ-ARIAS, M. SÁNCHEZ, A. GÓMEZ, J. EXTREMERA y M.P. RUBIO.
Virtual Reality to Solve Spatial Vision Problems: An Experience in High School
10th International Conference of The Future of Education. (2020).

- Artículos publicados (aparte de los presentados en esta Tesis):

- D. VERGARA y M.P. RUBIO
Aplicaciones del diseño gráfico en ingeniería: diagramas de equilibrio ternarios.
Educação Gráfica 16(1), **2012**, 44-58.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
New computer teaching tool for improving students' spatial abilities in continuum mechanics.
IEEE Technology and Engineering Education (ITEE), 7(4), **2012**, 44-48.
- D. VERGARA y M.P. RUBIO
Una innovadora metodología para ejercitar la capacidad de visión espacial de los estudiantes de ingeniería.
Revista de Docencia Universitaria, 11, **2013**, 329-347.
- D. VERGARA y M.P. RUBIO
Implicación de la educación gráfica en la enseñanza de los ensayos no destructivos.
Educação Gráfica, 17(2), **2013**, 146-157.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y F. PRIETO.
Diseño de nuevas herramientas virtuales para la enseñanza de la radiología industrial. Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, 11, **2013**, 76-82.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
Interactive virtual platform for simulating a concrete compression test.
Key Engineering Materials, 572, **2014**, 582-585.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
New virtual application for improving the students' understanding of ternary phase diagrams.
Key Engineering Materials, 572, **2014**, 578-581.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y F. PRIETO.
Nueva herramienta virtual para la enseñanza de la caracterización mecánica de materiales.
Revista Educación en Ingeniería, 9, **2014**, 98-107.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
Multidisciplinary methodology for improving students' spatial abilities in technical drawing.
Scientific Journal of Education Technology (SJET), 5(1), **2015**, 1-8.

- D. VERGARA, M. LORENZO y M.P. RUBIO
Virtual environments in materials science and engineering: the students' opinion. In Handbook of research on recent developments in materials science and corrosion engineering education. **2015**, pp. 148-165. Ed. H.L. Lim. IGI Global.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y G. MEZQUITA
Importancia del diseño de los recursos virtuales educativos: plataforma virtual interactiva de sistemas cristalinos.
Educação Gráfica, 19(3), **2015**, 166-178.
- D. VERGARA, M. LORENZO y M.P. RUBIO
On the use of virtual environments in engineering education.
International Journal of Quality Assurance in Engineering and Technology Education, 5(2), **2016**, 30-41.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
On the design of virtual reality learning environments in engineering.
Multimodal Technologies and Interaction, **2017**, 1(2), 11.
- D. VERGARA, M. LORENZO y M.P. RUBIO
Virtual environments in materials science and engineering: the students' opinion. In Materials Science and Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications, 3-3, **2017**, pp. 1465-1483.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
A virtual resource for enhancing the spatial comprehension of crystal lattices.
Education Sciences, **2018**, 8(4), 153.
- M.P. RUBIO y D. VERGARA
El PDF-3D como tecnología educativa.
Eduweb, **2018**, 12(2), 205-213.
- D. VERGARA, M. RODRÍGUEZ-MARTÍN, M.P. RUBIO, J. FERRER, F.J. NÚÑEZ, L. MORALEJO
Instrucción de personal técnico en ensayos no destructivos de ultrasonidos mediante realidad virtual
Dyna, **2018**, 94(2), 150-154.
- D. VERGARA, J. EXTREMERA, M.P. RUBIO y L.P. DÁVILA
Meaningful learning through virtual reality learning environments: A case study in materials engineering.
Applied Sciences, **2019**, 9(21), 4625.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y M. LORENZO
On the use of PDF-3D to overcome spatial visualization difficulties linked with ternary phase diagrams.
Education Sciences, **2019**, 9, 67.
- M.P. RUBIO, D. VERGARA, S. RODRÍGUEZ y J. EXTREMERA
Virtual reality learning environments in Materials Engineering: Rockwell hardness test. In book: Methodologies and Intelligent System for Technology Enhanced Learning, 8th International Conference, **2019**, 106-113.
- D. VERGARA, J. EXTREMERA, M.P. RUBIO y L.P. DÁVILA
The technological obsolescence of virtual reality learning environments.
Applied Sciences, **2020**, 10(3), 915.
- D. VERGARA, J. EXTREMERA, M.P. RUBIO y L.P. DÁVILA
The proliferation of virtual laboratories in educational fields.
ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal, **2020**, 9(1), 85-97.
- M.P. RUBIO, D. VERGARA y S. RODRÍGUEZ
Immersive virtual reality in technical drawing of engineering degrees. In book: Methodologies and Intelligent System for Technology Enhanced Learning, 9th International Conference, **2020**, 71-79.
- D. VERGARA, M.P. RUBIO y S. RODRÍGUEZ
On the importance of the design of virtual reality learning environments. In book: Methodologies and Intelligent System for Technology Enhanced Learning, 9th International Conference, **2020**, 146-152.

- D. VERGARA, M.P. RUBIO, J. EXTREMERA, Y M. LORENZO
Interdisciplinary learning methodology for supporting the teaching of industrial radiology through technical drawing
Applied Sciences, **2021**, 11(12), 4634.
- D. VERGARA, P. FERNÁNDEZ-ARIAS, J. EXTREMERA, L.P. DÁVILA Y M.P. RUBIO
Educational trends post COVID-19 in engineering: Virtual laboratories
Materials Today: Proceedings, **2021**, *in press*.

Por lo tanto, en los artículos presentados en este documento de tesis por compendio, el doctorando ha cubierto los aspectos necesarios para su publicación: la elección del tema, diseño, creación, desarrollo y programación de las aplicaciones de Realidad Virtual No Inmersiva (RVNI), implementación en las clases prácticas de las asignaturas objetivo, evaluación de los resultados de su uso y desarrollo de las conclusiones. Así como la elaboración material para su divulgación: textos, figuras, referencias, elección de revistas donde publicarlos, etc.

Lo cual queda certificado por los directores de esta Tesis:

RODRIGUEZ
GONZALEZ SARA
- 70864126E

Firmado digitalmente por
RODRIGUEZ GONZALEZ
SARA - 70864126E
Fecha: 2021.09.09
16:41:29 +02'00'

Dra. D^a. Sara Rodríguez González

45682855W
DIEGO
VERGARA
(C:R0500336C)

Firmado digitalmente
por 45682855W DIEGO
VERGARA
(C:R0500336C)
Fecha: 2021.09.09
22:23:27 +02'00'

Dr. D. Diego Vergara Rodríguez

2. Memoria descriptiva de las publicaciones presentadas

Este apartado muestra la coherencia y relación directa entre los artículos presentados. Se compone de una introducción con los antecedentes del tema objeto de estudio (mostrando tanto una comparativa de los Sistemas de Realidad Virtual como el proceso de diseño y creación de las aplicaciones de RVNI), la hipótesis de trabajo y los objetivos, así como las principales conclusiones.

2.1. Introducción

En la actualidad, la gran expansión de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en la mayoría de las actividades humanas es un hecho evidente. Entre las TIC destaca el crecimiento, en sus diversas variantes, de la Realidad Virtual (RV), el cual se ha producido con el aumento de la potencia de los equipos informáticos, el desarrollo de nuevos sistemas y el abaratamiento del hardware. Por tanto, la RV es una tecnología consolidada que está alcanzado unos beneficios ya demostrados y aceptados, según los informes de Gartner's Hype Cycle [1], con cifras que superan los 16 mil millones de dólares para 2022 [2].

Como resumen histórico de su desarrollo, se puede decir que la Realidad Virtual apareció con los gráficos por ordenador (Computer graphics) y la primera idea conceptual fue presentada por Ivan Sutherland en 1965: "hacer que el mundo (virtual) en la pantalla se vea real, suene real, se sienta real y responda de manera realista a las acciones del espectador" [3]. El mismo Sutherland construyó en 1968 un dispositivo considerado como el primer Head Mounted Display (HMD), ya con visión estéreo y detección precisa de la cabeza. La RV se mantuvo en los laboratorios por su alto coste y bajas prestaciones, aunque mejorando constantemente con el desarrollo de la informática. En la década de los 90 [4] del siglo XX ya se puede hablar de verdadera Realidad Virtual, pero a coste prohibitivo hasta la década del 2010 cuando la RV se ha impuesto como una tecnología asequible y con aplicación en gran número de campos.

Este rápido incremento se ha producido, sobre todo, por el desarrollo de sistemas de **Realidad Virtual Inmersiva (RVI)** funcionales y a costes asequibles [5]. En 2012 comenzaron las pruebas, bajo licencia de investigación, en centros de desarrollo y universidades del sistema Oculus Rift de la empresa Oculus VR. En 2014 fue adquirida por el gigante Facebook y se comercializaron en marzo de 2016. Desde entonces, han aparecido otros sistemas, que mejoran las prestaciones y que se aplican en múltiples campos diferentes del entretenimiento, campo para el que fueron desarrollados inicialmente. Antes de este gran avance tecnológico, los sistemas de RVI solo existían en centros de investigación, eran complejos y de coste prohibitivo. Sin embargo, fuera de los laboratorios de investigación ya existían sistemas de **Realidad Virtual No Inmersiva (RVNI)** de gran aplicación en campos no científicos como en el de los videojuegos, mucho más asequibles en hardware y software, y que compartían parte de las características de los RVI [6].

Poco después del desarrollo de la RV viable, surgen en psicología los enfoques cognitivos del aprendizaje y los primeros intentos de desarrollar modelos de memoria humana con un enfoque basado en la informática [7]. Las teorías cognitivas se fundamentan en los métodos que emplean los ordenadores para almacenar y recuperar la información, estudiando la naturaleza compleja de los procesos mentales del aprendizaje. La teoría cognitiva acentúa además que el aprendizaje es un proceso activo, constructivo, acumulativo y autodirigido [8]. En avances posteriores, el enfoque constructivista ha respaldado las bases de su teoría sobre la naturaleza cognitiva del aprendizaje a través de los estudios de Ausubel, Piaget [9] y Vygotsky [10]. De acuerdo con este modelo, la adquisición del conocimiento en el aprendizaje es el resultado de una construcción cuyos fundamentos se basan en los conocimientos previos, lo que se denomina un “aprendizaje significativo” (AS).

La importancia del AS en el proceso formativo fue destacada por Ausubel [11] como medio de aprendizaje eficaz frente a la repetición y memorización mecánica de conceptos arbitrariamente relacionados. Este aprendizaje meramente repetitivo presenta muchas carencias, que se deben, tanto a la limitada capacidad de almacenamiento de información de la memoria, como a la necesidad de repetir frecuentemente lo aprendido para que no se olvide y permanezca en la memoria a largo plazo.

Los procesos de aprendizaje significativo, por el contrario, requieren que los nuevos conocimientos de una materia de estudio se correspondan intencionadamente con los conocimientos previos del individuo. Así, al relacionar los nuevos conceptos con los ya existentes en la estructura cognitiva, el individuo puede procesar mejor la información y almacenarla (memorizarla) con menos esfuerzo y con más éxito a la hora de reutilizarla en otras circunstancias. Según el mismo Ausubel [12] la adquisición y retención del aprendizaje a través de la relación entre las nuevas ideas y las ideas que ya posee el alumno no es un proceso pasivo o aislado, sino que es el producto de un proceso activo, integrador e interactivo. Características propias de la Realidad Virtual.

Son numerosos los estudios que han identificado los beneficios cognitivos y resultados de aprendizaje asociados al uso de la RV en el aprendizaje. Especialmente, el uso de simulaciones de RV y laboratorios virtuales tridimensionales en el campo de las ingenierías son objeto de especial atención en los análisis que comparan la efectividad de estos recursos con las metodologías tradicionales [13]. También se asegura [14] que la RV es una herramienta imprescindible en el desarrollo de competencias básicas para los alumnos de ingenierías. Asimismo, [15] se registran beneficios cognitivos en las áreas de comprensión, memorización, aplicación y visión de conjunto de la materia aprendida.

Por tanto, cada vez se utilizan más las nuevas metodologías educativas basadas en la Realidad Virtual, para captar la atención de los alumnos, motivarlos en el estudio de diferentes materias y que les permita comprender conceptos complejos o visuales empleando el aprendizaje significativo. Las publicaciones que se presentan en este documento de tesis por compendio, se basan en esta tecnología para estudiar la mejora en el aprendizaje en asignaturas de ciencia de materiales en titulaciones técnicas.

La Realidad Virtual se suele definir de modos diferentes, lo que provoca confusión incluso en la literatura técnica. El público no especializado suele asociar esta tecnología de simulación digital con sus aspectos más espectaculares, especialmente con los cascos de visualización estereoscópica y los controladores manuales, pudiendo ser en cambio, aplicaciones más sencillas, tipo videojuego, de fácil uso y muy útiles en la comprensión de operaciones y procesos técnicos complejos.

Una definición sencilla es que la Realidad Virtual (RV) [16] es la simulación por ordenador interactiva de escenas tridimensionales en tiempo real, en la que el usuario

tiene la sensación de adentrarse en un mundo diferente al suyo con la ayuda de dispositivos de interacción con la máquina. Se caracteriza principalmente por su uso en tiempo real. Además, es capaz de reaccionar ante la respuesta del usuario, llegando a dar experiencias inmersivas y multisensoriales.

Un sistema para poder ser considerado de Realidad Virtual debe ser capaz de generar digitalmente un entorno tridimensional en que el usuario se sienta presente y en el cual pueda interactuar intuitivamente y en “tiempo real” con los objetos que encuentre dentro de él. Los objetos virtuales deben ser tridimensionales, poseer propiedades propias y mantener una posición y orientación en el ambiente virtual independiente del punto de vista del usuario. El usuario debe tener libertad para moverse y actuar dentro del entorno de un modo natural y de forma que la sensación de presencia será mayor cuanto mayor sea el número de sentidos estimulados.

- *Tipos y comparativa de los Sistemas de Realidad Virtual*

Los sistemas de RV se pueden clasificar, según los dispositivos de visualización e interacción del usuario con el entorno virtual, en dos amplias categorías [17]: (i) **Realidad Virtual No Inmersiva (RVNI)** o “ventana al mundo”, donde el usuario ve el mundo por medio de la pantalla plana de un ordenador o dispositivo portátil que actúa como una “ventana” y usa los medios de control más sencillos, habituales en un sistema informático estándar (teclado y ratón) [3]; y (ii) **Realidad Virtual Inmersiva (RVI)**, que introduce completamente al usuario en el mundo virtual mediante el uso de gafas o cascos compuestos con dos pequeñas pantallas colocadas frente a los ojos del usuario y manipuladores de los elementos virtuales a través de dispositivos (mandos, guantes, etc.) que capturan la posición y la rotación de las partes del cuerpo del usuario. Son bastante costosos y es necesario un equipo por cada usuario [18-20]. Lógicamente, varían mucho los costes de uso de cada tipo, inmersiva y no inmersiva, siendo mucho más asequible la no inmersiva.

Los programas de RV cubren una amplia variedad de aplicaciones, desde aquellas relativamente simples (como los laboratorios virtuales didácticos [17,21] hasta aplicaciones de alta complejidad (por ejemplo, entrenamiento de Realidad Virtual Inmersiva para militares (Motion Reality) [22]).

Como se dijo antes, el enfoque del conjunto de publicaciones aportado en este documento es el uso de las aplicaciones de RV en la docencia universitaria, como ayuda en los procesos de enseñanza–aprendizaje en conceptos y capacidades de aplicación práctica en las titulaciones técnicas. Concretamente, en las asignaturas de ciencia de materiales, es interesante su uso para la simulación de prácticas de laboratorio de ensayo de materiales y la comprensión de conceptos complejos de base tridimensional.

Las publicaciones aportadas en este compendio utilizan todas ellas la **Realidad Virtual No Inmersiva**. Esto puede resultar paradójico ya que, de las dos categorías de RV indicadas, la que más se está desarrollando y consigue mejores experiencias de aprendizaje es la Realidad Virtual Inmersiva (RVI). Sin embargo, su uso no se ha generalizado todavía en el campo educativo. Ello es debido a los elevados costes necesarios para su diseño, puesta en servicio y uso en las clases. Estos costes son:

- *Costes de implantación*: En este apartado hay que tener en cuenta el número y prestaciones de los sistemas de RVI, así como el espacio físico donde se va a impartir la docencia. El número de equipos necesario depende del número de alumnos del grupo de prácticas. Para que las clases sean semejantes para cada alumno, se debería contar con un dispositivo de visualización y control para cada uno de ellos. Este coste también incluye el precio del sistema y los sistemas de alta gama, que producen experiencias más realistas, son caros. De esta forma, es habitual que sólo se disponga de uno o dos para todo el grupo.
- *Costes de tiempo*: La práctica requiere de un tiempo determinado de realización por alumno, así que el tiempo total de la práctica será muy elevado para el grupo completo con un único sistema de RVI. Además, cuando un alumno está con él, los otros deberían ver en una pantalla lo que hace para compartir sus experiencias y no perder el interés o bien, desarrollar otras actividades paralelas relacionadas con la práctica.
- *Costes de espacio*: El espacio necesario depende del sistema de RVI elegido, que puede permitir la realización de actividades sentado (o de pie sin desplazamientos) o la realización de actividades con desplazamiento en una zona más o menos amplia. Si se disponen varios sistemas de este segundo tipo será necesario contar con un gran espacio para poder usarlos simultáneamente con el grupo de alumnos.

- *Costes de desarrollo*: El diseño, modelado y programación de una aplicación de RVI es una tarea que requiere de conocimientos multidisciplinares altamente especializados. Además, el desarrollo implica gran coste en tiempo de trabajo, similar al necesario para crear un videojuego. En general las aplicaciones que se utilizan en la actualidad son fruto del esfuerzo de grupos de docentes e investigadores que las desarrollan para las necesidades específicas de sus clases y no se comparten con otros grupos.
- *Costes de mantenimiento*: Los sistemas de RVI están en constante desarrollo y requieren actualizaciones periódicas de software, firmware y drivers. Además, las aplicaciones creadas con estas tecnologías envejecen rápidamente (obsolescencia tecnológica) y es necesario readaptarlas constantemente.
- *Costes de personal docente*. Es preciso que el profesorado que imparte las prácticas esté especializado en el uso de la tecnología RVI y en los conceptos propios de la práctica. Si se cuenta con un solo sistema serán necesarios dos docentes, uno con el alumno que lo utiliza y el otro con los demás alumnos del grupo.

Estos costes dificultan su uso en el mundo educativo actual, pero por su gran potencial en la formación técnica de personal cualificado, la evolución acelerada del software y la mejora de los entornos de diseño de este tipo de aplicaciones, se usarán en prácticamente en todos los ámbitos de la formación o educación.

En consecuencia, los sistemas de RVNI tienen la ventaja de requerir costes mucho menores, siendo los de desarrollo y mantenimiento los que más se asemejan a los de los sistemas de RVI. Se pueden usar en equipos informáticos bastante similares a los convencionales de sobremesa de aulas estándar, en las clases habituales de prácticas o en el equipo personal del estudiante, con todos los alumnos simultáneamente o cada uno individualmente y controlados únicamente por el profesor de la asignatura.

- *Diseño y creación de las aplicaciones de RVNI*

La creación de una aplicación de RVNI es un proceso complejo tanto por las diferentes tecnologías que abarca como por la necesidad de conocer el tema que se va a tratar y la mejor forma de presentarlo. Es equivalente a la creación de un videojuego y este normalmente lo crea un equipo numeroso de profesionales de múltiples disciplinas.

Un resumen genérico de los pasos para crear la aplicación es el propuesto por [23]: una vez planteados los objetivos específicos de la aplicación, se decide el nivel de realismo desde lo muy esquemático a lo muy realista. Después se elige el nivel de interacción del usuario con el entorno. La interacción elegida determinará los sentidos que empleará y el grado de control que tendrá el usuario. También permitirá elegir el hardware y el software de programación que mejor se adapten para cumplir los objetivos propuestos. Se modela el mundo virtual, se programa la interactividad y se genera la aplicación. Por último, se evalúa con un grupo de usuarios de prueba para comprobar los objetivos conseguidos y hacer las modificaciones necesarias si estos no se han alcanzado.

Una fase importante en la creación de la aplicación es la elección de las herramientas de *hardware* y *software* necesarias. La elección del *hardware* depende principalmente del nivel de las características que tendrá la aplicación de Realidad Virtual, como el realismo, la inmersión y la interacción. A mayor número de sentidos del usuario implicados, mayor complejidad de los dispositivos y su correspondiente programación. Los sentidos más comunes involucrados en una aplicación de Realidad Virtual actual son la vista y el oído.

En este caso, el equipamiento de hardware necesario para el uso de las aplicaciones de RVNI es únicamente un ordenador en el que el dispositivo de visión es el monitor y con sus controles habituales, teclado y ratón. El único componente especial que mejora el uso es la incorporación de una tarjeta gráfica de buenas prestaciones que proporciona una experiencia fluida y mejora la interacción con el entorno virtual. Para las aplicaciones de esta Tesis se optó por ordenadores personales (portátiles o de sobremesa) con el sistema operativo “Windows” por ser los más utilizados en los centros educativos universitarios.

Con respecto al *software* empleado en la programación de las aplicaciones de RV, se requieren varias tareas distintas dependiendo del nivel deseado de realismo e interactividad, pero que básicamente se pueden resumir en dos tipos: (i) para la creación de entornos y objetos 3D y (ii) para la programación de la interacción del usuario con la aplicación.

En los inicios, este tipo de aplicaciones se programaban directamente en lenguajes de alto nivel simultáneamente, pero en la actualidad, las tareas de modelado 3D se han separado de la programación interactiva. Dentro del primer tipo (software de modelado y animación 3D), los objetos tridimensionales se generan utilizando las técnicas del software CAD (Computer Aided Design), así como el aspecto visual de las superficies,

la iluminación del entorno, etc. El más empleado es el “Autodesk 3DStudio Max” [24], utilizado en aplicaciones técnicas de ingeniería y arquitectura y en la creación de videojuegos.

En cuanto a la segunda categoría, los denominados motores de desarrollo, ofrecen al programador un conjunto de funciones programadas básicas que son comunes en todas las aplicaciones de RV: (i) un motor de renderizado para generar gráficos 2D y 3D, (ii) un motor de detección de colisiones, (iii) las interacciones con el entorno, (iv) sonidos y música, (v) animación, (vi) inteligencia artificial, (vii) comunicación con la red, (viii) manejo de memoria, etc. El más empleado actualmente es el “Unreal Engine” [25] de la empresa Epic Games, pero para las aplicaciones creadas en esta Tesis se eligió otro motor más sencillo porque se quería crear aplicaciones sencillas: el “Quest3D” [26] de la empresa Act-3D.

- *Motivación de la investigación de las aplicaciones de RVNI de esta Tesis*

Como se ha indicado anteriormente, el uso de la RVNI en la docencia práctica parece que tiene ventajas sobre las de RVI. Son más sencillas de desarrollar, no requieren de equipamientos informáticos complejos y pueden llegar a todos los estudiantes de la asignatura. Además, conservan las características de interactividad, aspecto realista y jugabilidad que atraen al estudiante a un aprendizaje significativo. Aunque el doctorando también trabaja en el desarrollo de sistemas RVI, en esta tesis se ha intentado probar si su uso en determinadas clases prácticas mejora los resultados del aprendizaje basándose en desarrollo e implementación de aplicaciones de RVNI en la docencia práctica universitaria.

Dentro de las posibles aplicaciones de la RVNI en la educación universitaria (y sobre todo en el campo de las ingenierías), se han elegido dos tipos: Por una parte, (i) las que se pueden emplear en las clases para mejorar la comprensión de conceptos técnicos abstractos o gráficos tridimensionales complejos [27-29]. Y por otra, (ii) los utilizados en la simulación de laboratorios virtuales tridimensionales (LV3D), enfocados a la realización de prácticas emulando equipos y máquinas complejos, voluminosos, costosos o peligrosos, que no puedan usar grupos grandes de estudiantes y que puede que el centro educativo no tenga en sus laboratorios reales. Con ello se pretende conseguir que cada estudiante tenga su práctica y obtenga una experiencia muy cercana a la práctica real.

También se pueden obtener resultados técnicos similares a los de la práctica real o la evaluación del aprendizaje mediante cuestiones o ejercicios incluidos en la misma aplicación [30-32].

La formación del doctorando como ingeniero industrial y de materiales le permitió orientar las publicaciones presentadas al campo de las ramas técnicas de ciencia de materiales. Su experiencia profesional en la empresa privada le ha dado las competencias para diseñar y desarrollar las aplicaciones informáticas de RVNI y su experiencia docente como profesor de la Universidad de Salamanca, le ha permitido elegir las asignaturas y contenidos que mejor se adaptaban, creando las metodologías de implementación en las clases y diseñando los métodos para medir los resultados de su uso.

2.2. Objetivos e hipótesis de trabajo

Los objetivos comunes a las publicaciones presentadas son:

- *Desarrollar un conjunto de aplicaciones de Realidad Virtual No Inmersiva (RVNI) para el aprendizaje práctico en ensayos de ciencia de materiales y otros conceptos técnicos complejos, que no sean complicadas en su desarrollo ni requieran equipamiento especializado para su uso.* En el diseño de cada una de las aplicaciones se tendrán en cuenta las características específicas de la práctica a elaborar (tipo de laboratorio, si es un ensayo o la descripción de un concepto, formas de interacción con los componentes, elección de entornos más o menos realistas, etc.). Pero siempre empleando en su desarrollo, técnicas y tecnologías similares en todas ellas.
- *Elaborar metodologías de uso en el aula para aplicar las herramientas informáticas de RVNI desarrolladas.* En el diseño de las metodologías de uso en las clases prácticas se tendrá en cuenta la perspectiva constructivista del aprendizaje significativo, lo que implica basarse en los conocimientos previos de los estudiantes sobre el tema. Dependiendo de la práctica que se trate, se elegirá su duración, si es necesaria una clase magistral previa, si se realiza individualmente o en grupo, etc.
- *Implementar y probar las herramientas desarrolladas en las clases prácticas de las asignaturas de titulaciones técnicas de la educación superior.* Se eligen las asignaturas de ciencia de materiales cuyos contenidos prácticos incluyan los de las aplicaciones de RVNI desarrolladas, consultando con los profesores que las imparten. Se intenta que sean asignaturas de titulaciones técnicas variadas, de distintos centros y universidades para llegar al mayor número posible de estudiantes.
- *Evaluar los resultados de la aplicación de las herramientas y comprobar si su uso mejora las competencias estudiadas.* Los resultados se evalúan mediante encuestas que preguntan la opinión de los estudiantes una vez que han utilizado las aplicaciones de RVNI en las prácticas correspondientes usando las metodologías diseñadas para su aplicación en las clases.

La hipótesis de partida en el desarrollo de esta Tesis es:

"El uso de herramientas informáticas de Realidad Virtual No Inmersiva en titulaciones técnicas mejora el proceso enseñanza-aprendizaje en asignaturas de ciencia de materiales".

Desde que las tecnologías se han desarrollado lo suficiente, múltiples publicaciones han estudiado la utilidad del uso de la Realidad Virtual Inmersiva en el proceso de aprendizaje, sobre todo en las enseñanzas técnicas universitarias [33-39]. En general, los resultados obtenidos indican que se mejora la adquisición de las competencias en la parte práctica de las asignaturas, así como en la comprensión de los conceptos complejos y en el manejo de equipamientos de laboratorio. Si bien, como se ha comentado antes, presenta inconvenientes que no han permitido que se generalice su uso en el campo de la educación. Este problema se podría resolver con el uso de la Realidad Virtual No Inmersiva que es más sencilla de desarrollar, no requiere equipamiento complejo y puede ser utilizada de múltiples formas. Sin embargo, hay un menor número de publicaciones que estudien el uso de la RVNI en la enseñanza y son escasos los ejemplos de aplicación, metodologías de uso y resultados obtenidos.

En esta tesis por compendio de publicaciones se estudia el uso de varias aplicaciones de Realidad Virtual No Inmersiva, desde su diseño y desarrollo hasta la implementación en las clases con su correspondiente metodología y evaluación de los resultados. La idea inicial es que el uso de la RVNI mejora el proceso de enseñanza-aprendizaje, a un menor nivel que la RVI, pero sin los inconvenientes que limitan a ésta.

Dentro de los múltiples campos posibles, las publicaciones presentadas se enfocan en el campo de la ciencia de materiales, presente en las asignaturas de un gran número de titulaciones técnicas y con contenidos que se adaptan fácilmente a una aplicación de RVNI.

2.3. *Coherencia y relación directa entre los artículos*

Como ya se ha dicho, los artículos presentados en esta Tesis son trabajos publicados obtenidos de la creación y uso de aplicaciones interactivas de Realidad Virtual No Inmersiva en las clases prácticas de las titulaciones técnicas universitarias. En ellos se consideraron las tipologías existentes, las técnicas de diseño y desarrollo, las metodologías de implementación en las clases y la evaluación de los resultados que se obtienen con su uso.

La temática elegida fue en el campo de la ciencia de materiales y se desarrollaron en dos tipos de aplicaciones principales: (i) las que ayudan en la comprensión de conceptos técnicos complejos por su faceta tridimensional en los que los estudiantes tienen dificultades con sus habilidades espaciales, que son: “*A Virtual Environment for Enhancing the Understanding of Ternary Phase Diagrams*” y “*Active Methodologies Through Interdisciplinary Teaching Links: Industrial Radiography and Technical Drawing*”; y (ii) en las que se simulan distintos laboratorios virtuales donde se utilizan máquinas de ensayo habitualmente usadas en ciencia de materiales, algunas de ellas para cuantificar las diferentes propiedades de los materiales y que son los otros tres artículos: “*New Approach for The Teaching of Concrete Compression Tests in Large Groups of Engineering Students*”, “*Enhancing the Teaching/Learning of Materials Mechanical Characterization by Using Virtual Reality*” y “*The Application of Didactic Virtual Tools in the Instruction of Industrial Radiography*”.

Todos los artículos tienen una estructura similar, aunque con particularidades específicas propias del tema al que se aplican. Constan de las siguientes partes:

- Una introducción donde se presenta el problema que se quiere estudiar con la descripción del ensayo o del concepto técnico a elaborar junto con los objetivos que se esperan obtener.
- La descripción del diseño y desarrollo de la aplicación indicando el software empleado en su programación, así como el funcionamiento práctico de la aplicación obtenida.

- El diseño de la metodología de uso en las clases, con sus diversas fases de implementación junto con las clases magistrales, el procedimiento de uso por los estudiantes y el sistema de evaluación de los resultados de su aplicación.
- La aplicación en las clases prácticas siguiendo la metodología desarrollada pretendiendo que las usen el mayor número posible de estudiantes para así obtener más resultados.
- La recopilación de los resultados de la evaluación que se obtienen de encuestas que realizan los estudiantes después de usarlas de las clases prácticas.
- Las conclusiones obtenidas tanto de la utilidad de uso en las clases como de los procedimientos de desarrollo y programación de la aplicación de RVNI y de la utilidad en la mejora de los resultados en el aprendizaje del tema planteado.

Respecto al software empleado en la programación de las aplicaciones de Realidad Virtual no inmersiva, se optó por el mismo en todas ellas, el Quest 3D, un motor de desarrollo más sencillo que los empleados para crear las aplicaciones más actuales y potentes pero que requiere para su funcionamiento de equipos informáticos con menores prestaciones y genera archivos pequeños, fácilmente utilizables en los ordenadores de las aulas de informática de los centros y distribuibles a través de las plataformas de docencia virtual. El Quest 3D incluye todo lo necesario para generar los entornos, su iluminación, su visualización y la interactividad en tiempo real. Pero no permite modelar los objetos y entidades que forman esos entornos.

Para ello se ha empleado, en todas las aplicaciones, el software 3D Studio MAX de modelado tridimensional y animación de la empresa Autodesk. Usado habitualmente en aplicaciones de ingeniería y arquitectura, así como en la creación de videojuegos, permite generar las formas y volúmenes, el material de las superficies y las animaciones automáticas necesarias. Los modelos se exportan al motor de desarrollo mediante formatos de intercambio de archivos compatibles para ambos, en este caso fue el formato COLLADA (COLLABorative Design Activit) [40], y que incorporan tanto la malla tridimensional de los objetos como sus materiales.

Una vez importados los modelos en el Quest 3D, se programa la aplicación, creando las fuentes de luz para la iluminación, las cámaras para el punto visual del usuario y las interacciones del usuario con el entorno. El tipo de programación es funcional,

interconectando visualmente funciones que se representan en forma de cajas con entradas y salidas, obteniéndose árboles de cajas (las funciones) más o menos complejos. El resultado se compila generándose un solo archivo ejecutable de tamaño manejable y fácilmente distribuible. Este es el principal motivo para elegir este motor de desarrollo.

Los más completos como Unity y Unreal permiten obtener aplicaciones interactivas más potentes y tecnológicamente avanzadas, pero generan conjuntos de ficheros demasiado grandes y pesados para permitir una utilización sencilla en las plataformas de docencia virtual y en los propios ordenadores de los estudiantes.

En el diseño de las aplicaciones de RVNI y de la metodología de su uso en las clases, se ha empleado el enfoque constructivista del “aprendizaje significativo” de manera que los nuevos conocimientos de una materia de estudio se corresponden expresamente con los conocimientos previos del estudiante vistos en cursos anteriores o repasados en una primera clase magistral. Relacionando los nuevos conocimientos y habilidades que aporta la RVNI con los ya conocidos, el estudiante procesa mejor la información, la retiene con menor esfuerzo y tiene más éxito al recuperarla en otras asignaturas o en su vida profesional.

Las aplicaciones desarrolladas y descritas en este compendio de publicaciones, se emplearon en las clases prácticas de las asignaturas de distintos grados de ingeniería: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Geológica, Ingeniería Civil, Arquitectura y Geología, todos ellos con asignaturas de ciencia de materiales. Se consiguió llegar a un número de estudiantes suficientemente alto para sacar conclusiones aptas para comprobar la utilidad de su uso en el aprendizaje de los conceptos y procedimientos estudiados.

En todos los artículos presentados, las evaluaciones de los resultados se obtuvieron aplicando encuestas en las que se pedía la opinión de los estudiantes, respondiendo a diversas cuestiones sobre la aplicación empleada, su metodología de uso en las clases prácticas y sobre la realización de ejercicios de la temática impartida. Según los resultados obtenidos de las encuestas, los estudiantes les otorgan muy buenas valoraciones y demandan el uso combinado de laboratorios reales y virtuales para sus clases experimentales.

2.4. Conclusiones

Las conclusiones principales que se obtienen de este compendio de publicaciones provienen de las fases de diseño, desarrollo, metodología de uso y evaluación de resultados de las aplicaciones de Realidad Virtual No Inmersiva presentadas.

En la fase de **diseño**, las aplicaciones de RVNI utilizadas en el aula deben tener, además de una alta calidad didáctica, una apariencia lo más realista posible para motivar al alumnado a utilizarlas e implicarle en el proceso de enseñanza/aprendizaje, potenciando así el aprendizaje activo. Esto se consigue diseñando estas aplicaciones en forma de entornos tridimensionales. De hecho, de acuerdo con la opinión de los estudiantes reflejada en las encuestas, se infiere que las aplicaciones en dos dimensiones son obsoletas y que para que una herramienta virtual sea realmente eficaz no solo debe ser didáctica, sino que también debe llamar la atención de los estudiantes. Esto implica que se deberán realizar mejoras periódicamente en las aplicaciones con el objetivo de mantenerlas al día y que sigan motivando al alumnado. Por lo tanto, el proceso de diseño de este tipo de tecnología educativa virtual es un proceso evolutivo en el que las debilidades detectadas e identificadas por el alumnado se modifican y actualizan constantemente (proceso colaborativo entre profesores y alumnos).

Las conclusiones obtenidas en el **desarrollo** de las aplicaciones RVNI se refieren a la elección del hardware y el software más convenientes para cumplir con los objetivos seleccionados. En el uso de estas aplicaciones se buscaba que fueran fáciles de manejar, y no requirieran de equipamiento costoso. Después de hacer un estudio de todos los sistemas empleados en su creación se decidió que el hardware más común y asequible era un ordenador personal como herramienta habitual de los estudiantes y en las aulas de informática de los centros universitarios. Si hubieran sido aplicaciones de Realidad Virtual Inmersiva, serían necesarios equipos especiales como gafas, controladores y tarjetas gráficas potentes, mucho más costosos. En cuanto al software, se desestimó el uso de un motor de desarrollo de última generación por la complejidad de su uso y programación y se optó por una herramienta más sencilla de programar pero que aportaba

las características necesarias a las aplicaciones de RVNI como se demuestra en los resultados de las encuestas realizadas a los estudiantes. Todas las aplicaciones presentadas en este compendio de publicaciones fueron empleadas en aulas informáticas estándar y en los ordenadores de los alumnos sin ningún tipo de problema.

En cuanto a la **metodología** de uso en las clases, cada una de las aplicaciones requirió de la suya específica, pero en conjunto se concluye que resuelven problemas comunes que se encuentran en las clases de laboratorio en las que, debido a la falta de espacio en grandes grupos de estudiantes, algunos pierden los detalles de la práctica durante la explicación del profesor. Con estas herramientas se evita esta deficiencia porque los estudiantes la pueden visualizar previamente e individualmente, en detalle en su ordenador. Los enfoques metodológicos empleados son similares y buscan mejorar la comprensión de los estudiantes a través de procesos de autoaprendizaje. De manera que las habilidades y conceptos asimilados durante el mismo son de gran utilidad durante las actividades prácticas docentes reales en las que la práctica real se realiza en un laboratorio real. También, los enfoques metodológicos aportan experiencias cooperativas, para que los estudiantes puedan aprender y comprender mejor los detalles del ensayo a través del aprendizaje cooperativo durante las clases y el proceso de autoaprendizaje en casa.

Por fin, en la evaluación de **resultados** se obtuvo que son realmente útiles en la formación práctica de las asignaturas de materiales y mejoran el rendimiento educativo de los estudiantes, especialmente cuando se enfrentan con la falta de equipamiento en un laboratorio real. Además, los problemas de visualización espacial de los estudiantes, como los que se encuentran en el aprendizaje de muchos de los conceptos técnicos, se pueden resolver de manera eficaz mediante el uso de este tipo de aplicaciones 3D interactivas. Según la opinión de los estudiantes, reflejadas en las encuestas, las aplicaciones de Realidad Virtual No Inmersiva, como las propuestas, permiten superar sus dificultades de visualización espacial. Sin embargo, los estudiantes también opinan que el uso de herramientas virtuales no sustituye a la clase magistral donde se discuten los conceptos teóricos clave en el desarrollo de las prácticas, sino que sirven de complemento para reforzar los conocimientos transmitidos en dicha clase.

2.5. Referencias

- [1]. Gartner Hype Cycles (2017). <https://gtnr.it/2Xq7Gjh> (Último acceso 25/08/21)
- [2]. Statista (2020). Statista dossier about virtual reality (VR). <https://bit.ly/36Q9kQd> (Último acceso 25/08/21)
- [3]. I. Sutherland. (1965). The Ultimate Display. *Proceedings of IFIP Congress*, 2, 506-509.
- [4]. Andersson, R. L. (1993). A real experiment in virtual environments: A virtual batting cage. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 2(1), 16-33. <https://doi.org/10.1162/pres.1993.2.1.16>
- [5]. Vergara, D., Rubio, M. P., & Lorenzo, M. (2017). On the design of virtual reality learning environments in engineering. *Multimodal technologies and interaction*, 1(2), 11. <https://doi.org/10.3390/mti1020011>
- [6]. Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. *Computers & Education*, 70, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>
- [7]. Mandler, G. (2002). Origins of the cognitive (r) evolution. *Journal of the History of the Behavioral Sciences*, 38(4), 339-353. <https://doi.org/10.1002/jhbs.10066>
- [8]. Shuell, T. (1986). Cognitive Conceptions of Learning. *Review of Educational Research*, 56, 411-436. https://doi.org/10.5353/th_b3196193
- [9]. Wadsworth, B. J. (1996). Piaget's theory of cognitive and affective development: Foundations of constructivism. *Longman Publishing*.
- [10]. Kozulin, A. (2004). Vygotsky's theory in the classroom: Introduction. *European Journal of Psychology of Education*, 3-7. <https://doi.org/10.1007/BF03173233>
- [11]. Ausubel, D. P. (1977). The facilitation of meaningful verbal learning in the classroom. *Educational psychologist*, 12(2), 162-178. <http://doi.org/10.1080/00461527709529171>
- [12]. Ausubel, D. P. (2000). The acquisition and retention of knowledge: A cognitive view. *Springer Science & Business Media*. <http://doi.org/10.1007/978-94-015-9454-7>
- [13]. Dobrzański, L. A., & Honysz, R. (2007). Materials science virtual laboratory as an example of the computer aid in materials engineering. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24(2), 219-222.

- [14]. Lee, E. A. L., Wong, K. W., & Fung, C. C. (2010). How does desktop virtual reality enhance learning outcomes? A structural equation modeling approach. *Computers & Education*, 55(4), 1424-1442. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.06.006>
- [15]. Antonietti, A., Rasi, C., Imperio, E., & Sacco, M. (2000). The representation of virtual reality in education. *Education and Information Technologies*, 5(4), 317-327. <https://doi.org/10.1023/A:1012057608694>
- [16]. Mazuryk, T., & Gervautz, M. (1996). Virtual reality-history, applications, technology and future.
- [17]. Vergara, D., Lorenzo, M., Rubio, M.P. (2015). Virtual environments in materials science and engineering: the students' opinion. *Handbook of research on recent developments in materials science and corrosion engineering education*, Chapter 8, pp. 148–165. IGI Global, Hershey, PA. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8183-5.ch008>
- [18]. Hilfert, T., König, M. (2016). Low-cost virtual reality environment for engineering and construction. *Visual. Eng.*, 4, 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0031-5>
- [19]. Crespo, R., García, R., Quiroz, S. (2015). Virtual reality application for simulation and off-line programming of the Mitsubishi move master RV-M1 robot integrated with the oculus rift to improve students training. *Procedia Computer Science*, 75, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.226>
- [20]. Górski, F., Buń, P., Wichniarek, R., Zawadzki, P., Hamrol, A. (2015). Immersive city bus configuration system for marketing and sales education. *Procedia Computer Science*, 75, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.230>
- [21]. Arnay, R., Hernández-Aceituno, J., González, E., Acosta, L. (2017). Teaching kinematics with interactive schematics and 3D models. *Computer Applications in Engineering Education*, 25(3), 420-429. <https://doi.org/10.1002/cae.21809>
- [22]. <https://www.motionreality.com/> (Último acceso 25/08/21)
- [23]. Pantelidis, V.S. (1997). Virtual reality and engineering education. *Computer Applications in Engineering Education*, 5, 3–12. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0542\(1997\)5:1<3::AID-CAE1>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0542(1997)5:1<3::AID-CAE1>3.0.CO;2-H)
- [24]. <https://www.autodesk.es/products/3ds-max/overview> (Último acceso 25/08/21)
- [25]. <https://www.unrealengine.com/en-US/> (Último acceso 25/08/21)
- [26]. <https://web.archive.org/web/20080313120524/http://quest3d.com/> (Último acceso 25/08/21)
- [27]. Chou, Ch.; Hsu, H.-L.; Yao, Y.-S. (1997). Construction of a virtual reality learning environment for teaching structural analysis. *Computer Applications in Engineering Education*, 5, 223–230. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0542\(1997\)5:4<223::AID-CAE1>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0542(1997)5:4<223::AID-CAE1>3.0.CO;2-F)

- [28]. De Sousa, M.P.A.; Filho, M.R.; Nunes, M.V.A.; Lopes, A.d.C. (2012). A 3D learning tool for a hydroelectric unit. *Computer Applications in Engineering Education*, 20, 269–279. <https://doi.org/10.1002/cae.20393>
- [29]. Flanders, M.; Kavanagh, R.C. (2015). Build-a-robot: using virtual reality to visualize the Denavit–Hartenberg parameters. *Computer Applications in Engineering Education*, 23, 846–853. <https://doi.org/10.1002/cae.20393><https://doi.org/10.1002/cae.21656>
- [30]. Dobrzański, L.A.; Jagiełło, A.; Honysz, R. (2008). Virtual tensile test machine as an example of material science virtual laboratory post. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 27(2), 207–210.
- [31]. Dobrzański, L.A.; Honysz, R. (2010). The idea of material science virtual laboratory. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 42(1-2), 196–203.
- [32]. Gao, Z.; Liu, S.; Ji, M.; Liang, L. (2011). Virtual hydraulic experiments in courseware: 2D virtual circuits and 3D virtual equipment's. *Computer Applications in Engineering Education*, 19, 315–326. <https://doi.org/10.1002/cae.20313>
- [33]. Ni, T., Zhang, H., Yu, C., Zhao, D., and Liu, S. (2013). Design of highly realistic virtual environment for excavator simulator. *Computers and Electrical Engineering*, 39(7), 2112–2123. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.06.010>
- [34]. Mirauda, D., Capece, N., and Erra, U. (2019). StreamflowVL: A virtual fieldwork laboratory that supports traditional hydraulics engineering learning. *Applied Sciences*, 9(22), 4972. <https://doi.org/10.3390/app9224972>
- [35]. Miguel, J., Lopez, G., Octavio, R., Betancourt, J., Arredondo, J. M. R., Laureano, E. V., and Haro, F. R. (2019). Incorporating virtual reality into the teaching and training of grid-tie photovoltaic power plants design. *Applied Sciences*, 9(21), 4480. <https://doi.org/10.3390/app9214480>
- [36]. Maghool, S. A. H., Moeini, S. H., and Arefazar, Y. (2018). An educational application based on virtual reality technology for learning architectural details: Challenges and benefits. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*, 12(3), 246–272. <https://doi.org/10.26687/archnet-ijar.v12i3.1719>
- [37]. Legault, J., Zhao, J., Chi, Y.-A., Chen, W., Klippel, A., and Li, P. (2019). Immersive virtual reality as an effective tool for second language vocabulary learning. *Languages*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.3390/languages4010013>
- [38]. Leder, J., Horlitz, T., Puschmann, P., Wittstock, V., and Schuetz, A. (2019). Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making. *Safety Science*, 111, 271–286. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.021>

- [39]. Extremera, J., Vergara, D., Dávila, L. P., and Rubio, M. P. (2020). Virtual and augmented reality environments to learn the fundamentals of crystallography. *Crystals*, 10(6), 456. <https://doi.org/10.3390/cryst10060456>
- [40]. Barnes, M. (2006). Collada. In *ACM SIGGRAPH 2006 Courses* (pp. 8-es). <https://doi.org/10.1145/1185657.1185752>

3. Publicaciones originales presentadas

A continuación, se incluyen las copias completas de las publicaciones originales que conforman la Tesis Doctoral:

3.1. New approach for the teaching of concrete compression tests in large groups of engineering students

New Approach for the Teaching of Concrete Compression Tests in Large Groups of Engineering Students

Diego Vergara¹; Manuel Pablo Rubio²; and Miguel Lorenzo, Ph.D.³

Abstract: This paper presents a teaching approach aiming to give students the chance of applying theoretical concepts in virtual environments, thereby overcoming limitations in overcrowded classes or in large groups of engineering undergraduates using available testing equipment. The proposed approach deals with enhancing self-learning of one of the most common tests used in materials engineering and/or civil engineering, namely, the compression test of concrete samples. To achieve this goal, two didactic-propose computational tools were developed: a virtual laboratory (VL) and video tutorials (VTs). Furthermore, two different teaching/learning experiences are compared in this paper: (1) using actual laboratory after using both virtual environments (VL and VTs); and (2) using only virtual environments. In both cases the use of these virtual tools improves the student learning outcomes, especially when these resources fulfill a lack of real equipment. Besides, the results of survey questions show the high motivation that virtual environments awake, and the assessment results reflect an increase in the students' marks. DOI: [10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000311](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000311). © 2016 American Society of Civil Engineers.

Author keywords: Virtual laboratory; Video tutorials; Concrete compression test; Virtual environments.

Introduction

The impact of applying information and communication technologies (ICT) in the current society is undeniable. Most of the conventional teaching methodologies used by university teachers in day-to-day classes are reconsidered to adequately update teaching by using ICT (Vergara et al. 2015a). Virtual environments are an effective and student-friendly way of introducing these technologies in university teaching, especially in those subjects included in technical degrees, such as engineering or architecture. Student opinion is consistent with this fact, reflecting the necessary and strongly advisable use of virtual resources at the classroom (Foss and Eikaas 2006; Goodhew 2002; Vergara et al. 2012).

Virtual laboratories (VLs) are revealed as very useful didactic tools, even more when expensive laboratory equipment (e.g., in case of civil and mechanical engineering) is not available (Achuthan and Murali 2015; García and Entrialgo 2015; Hilfert and König 2016). Furthermore, VLs can also be used by students as training tools before using real laboratory devices, thereby avoiding machine damage (Chika et al. 2008; Dobrzański et al. 2008). So, despite of the previously said advantages of VLs, from the didactic point of view, live practice is still necessary and advisable in those cases in which a real testing machine is available. Thus, students are able to put directly into practice all the knowledge acquired during both the theoretical classes and the complementary self-learning by using the virtual testing machines (Dobrzański and Honysz 2009; Vergara

and Rubio 2015). The importance of such techniques is reflected on the growing number of papers analyzing the impact of using virtual environments developed by university teachers on their students' learning (Gerson et al. 2001; Hashemi et al. 2006; Kang et al. 2013; Koretsky et al. 2011; Mosterman et al. 1994; Tori et al. 2011; Vergara et al. 2015c; Ullman and Sorby 1995). Following this trend, the authors have recently developed diverse computational tools whose aim is to enhance the teaching and learning activity of several engineering subjects (Vergara and Rubio 2015; Vergara et al. 2012, 2015b).

Within this framework, a methodological approach based on the use of computational didactic tools is revealed in this paper, linked to the teaching of one of the most commonly used material tests in civil engineering: the compression test for concrete samples. To achieve this goal, the testing machine performance is simulated by using two computational tools: (1) a virtual laboratory, which allows students to freely interact with a virtual testing machine, and (2) video tutorials (VTs), which can contribute to the development of both cooperative learning and self-learning skills.

According to a previous study (Vergara et al. 2012), students considered interactivity in real time as the most valuable capability of a VL. The potential impact of the use of VLs on the teaching/learning process of several technical subjects is really promising because this type of tools allows university teachers to solve two problems commonly found in practical classes. First, in excessively crowded laboratory groups (up to 20 students), some students are not able to see how the testing machine works when the teacher demonstrates it in the laboratory; however, this problem is easily overcome with these computational tools because students can easily visualize the testing machine operation conditions on the computer screen. Second, some students do not realize certain details of the concrete compression tests because of either the fast test speed developed during the test or the reduced screen size where the results are plotted. In the proposed didactic tools, the latter disadvantages are overcome because the test speed and the screen size where results are plotted can be regulated as required. So, because of these advantages, some university teachers were encouraged to design and apply virtual tools similar to the ones presented in this paper (Dobrzański et al. 2008; Hashemi et al. 2006;

¹Virtual Instruction in Materials and Engineering Technology Group, Dept. of Technology, Catholic Univ. of Ávila, 05005 Ávila, Spain (corresponding author). E-mail: diego.vergara@ucavila.es

²Virtual Instruction in Materials and Engineering Technology Group, Dept. of Constructional Engineering, Univ. of Salamanca, 37008 Salamanca, Spain.

³Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Salamanca, 37008 Salamanca, Spain.

Note. This manuscript was submitted on March 29, 2016; approved on August 4, 2016; published online on September 16, 2016. Discussion period open until February 16, 2017; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, © ASCE, ISSN 1052-3928.

Koretsky et al. 2011; Tori et al. 2011; Ullman and Sorby 1995), thereby improving the understanding of diverse concepts related to the testing machine working conditions.

The benefits of using this type of virtual simulations go beyond ensuring a better comprehension of the testing machine working conditions used in practical teaching of diverse engineering subjects; they also guarantee productive learning, i.e., students develop the habit of thinking, reasoning, and relating or explaining information (Forcael et al. 2012). Previous studies guarantee a more effective teaching/learning process by using virtual environments (Anderson et al. 2000). Thus, the usefulness of the proposed VT and VL can be applied to a wider spectrum of technical degrees (e.g., in civil, building, materials, mechanical, and mining engineering), in which the knowledge of the materials behavior is covered.

Computational Didactic Tools

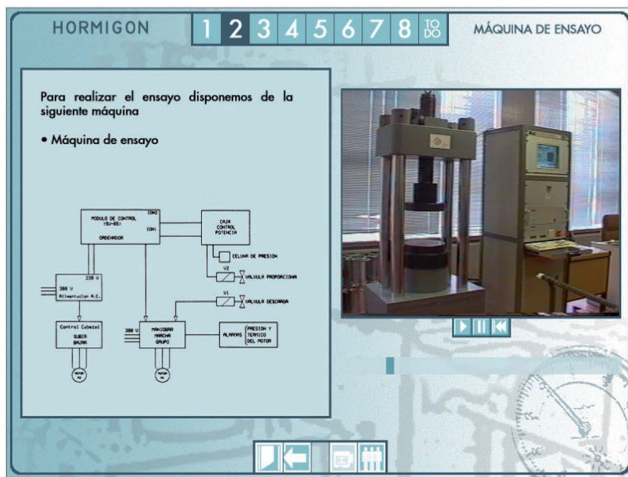
Video Tutorials

The use of VTs is widely spread either in the education environment (Buttcher 1986; Nicolson et al. 1994; Wells et al. 2012) or in the

professional field (Reynolds and Manson 2002; Yang and Lu 2007). The effectiveness of using such videos on student's learning is well documented in previous studies (Crook et al. 2012; Palmer 2007). With this in mind, the authors developed diverse VTs in a student-friendly virtual platform (Fig. 1), in which either the theoretical background concepts of compression testing or diverse steps followed during the compression test are covered.

As Fig. 1 shows, each VT is enclosed with an always-visible explanatory text. Students have access to this didactic tool anywhere and anytime through their Moodle account. These VTs allow students access to any video by pressing the corresponding button on the top of the window (Fig. 1) either sequentially (student watches the diverse steps in the same sequence of a conventional compression test) or randomly, allowing students to watch again the more-difficult steps or those not easily understood. In both ways, these VTs enhance the students' self-learning.

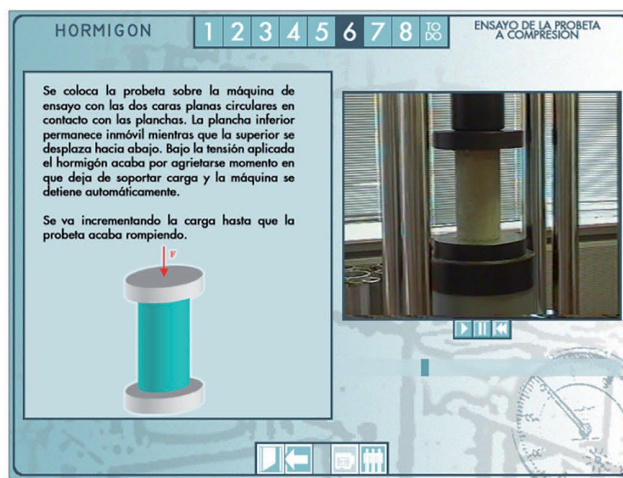
While the video plays, students can stop the VT, rewind or play it again with the help of commonly used buttons placed under the video preview (Fig. 1). This way, students can play the video as they wish, stopping it anytime to obtain a more detailed view of a certain step or rewinding it to see it again.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Different screenshots of VTs (images by Manuel Pablo Rubio): (a) compression test machine; (b) capping operation of the compression sample; (c) compression test of cylindrical concrete sample

By pressing the numbered buttons on the screen, the student is able to visualize the corresponding VT. A brief description of each one of them is depicted as follows: (1) theoretical background including a brief description of the testing machine components; (2) general view and components of the compression testing machine (CTM) including a one-line diagram connection scheme [Fig. 1(a)]; (3) basic concepts about concrete, such as concrete constituents, concrete dosage, concrete mixing, operation of vibration of the concrete sample; (4) data that must be included in the compression test sheet, e.g., curing times of the concrete samples used; (5) capping operation of the compression samples with a sulfur layer [Fig. 1(b)]; (6) real compression test applied to a concrete cylindrical sample with the real testing machine available at the materials testing laboratory [Fig. 1(c)]; (7) visualization of the test results on the testing machine computer screen and the way of extracting such results from the compression test machine; and (8) several simple questions about the previous VT to perform a self-evaluation of the most important concepts included in the VT.

Virtual Laboratory

Once students have learned the theoretical background of the compression test by using either conventional lecture or VTs, students can autonomously carry out a virtual compression test in the VL where the operation conditions of the real CTM are simulated following certain steps included in a practice sheet. The VL, previously described in a short paper (Vergara et al. 2014), includes a realistic modeling of both (1) a real CTM for concrete samples [Fig. 2(a); model SERIE MES 200AV of 2,000-kN maximum loading], and (2) the real materials testing laboratory [Fig. 2(b)]. The entire modeling of the material testing laboratory offers a significant advantage for future experiences because a virtual space is



(a)



(b)

Fig. 2. Virtual materials testing laboratory: (a) view of the CTM; (b) laboratory environment

available for placing other testing machines. By using this VL, students get familiar with the materials testing laboratory where real test are carried out during the practical teaching activities.

The developed VL shows the information in a three-dimensional (3D) environment and allows free interaction with the testing machines and diverse laboratory devices. In this way, an abstract experience (theoretical concepts) is converted to an experience similar to that of the real world (virtual reality) by using VL (Park et al. 2015; Vergara et al. 2016). This VL is categorized into the so-called window in the world because the user's vision of the world is achieved by using a computer screen that acts as a "window" (Vergara et al. 2015a). To reach this effect, the VL was developed with the commercial software *Quest 3D Power v.4*. This software is really effective for designing interactive virtual environments because it presents several advantages over other similar programs (Vergara and Rubio 2015): (1) speed of integrating or suppressing elements in the model; (2) simplicity in defining the flow of work; (3) flexibility to change the geometry and characteristics of the components in the model; (4) accessibility for any educational entity by using academic licenses; (5) 3D visual integration with the ability to import and export entities of other sources; (6) interactivity with a functional object-oriented programming; and (7) what-you-see-is-what-you-get (WYSIWYG) programming, i.e., results are directly shown in the program without need to render or export the application to verify if the programming was correctly done.

Although the photorealism of a VL in real time is bitterly complicated, the modeling of the presented VL was performed by trying to be as close as possible to reality. Because students need to know the machine working conditions and the operation options, all the machine details were considered in the VL modeling (Fig. 2). The main goal of that is to engage students in the learning process. In this way, students could easily get familiar with the real test machine components, which are depicted in Fig. 3 (mobile upper disc, fixed down disc, safety door, switch on/off button, emergency stop button, and computer screen). Moreover, the test machine screen is also modeled including all the screen options that are available during the compression test in the real machine. Regarding photorealism, a next-generation rendering engine was used in the illumination of the VL: (1) direct light, (2) ambient light, and (3) diffuse shadows. This lighting was included in the materials' properties through "baking" textures and hence in the application appearance. In this way, a pregenerated and realistic lighting is achieved in real time without needing to be calculated by the application. The results are shown in Fig. 2.

The VL allows students to perform the compression test according to the Spanish standard UNE-EN 12390-1 (European Standard 2013) for both types of concrete samples with the corresponding



Fig. 3. Basic components of the concrete samples CTM (SERIE MES 200AV)

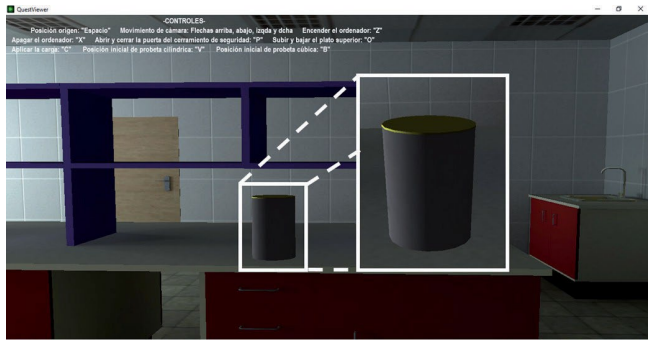


Fig. 4. Different concrete samples used in the virtual laboratory including a detailed view of the capping layer of a cylindrical testing sample

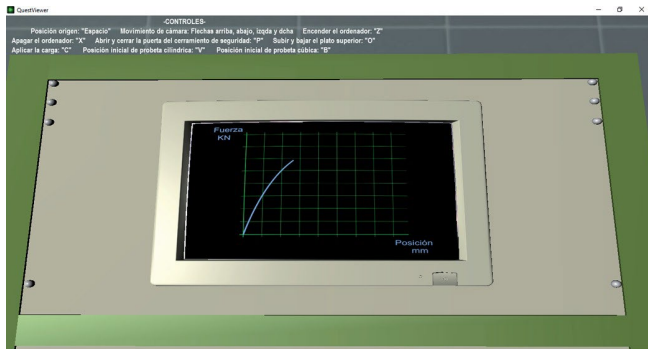


Fig. 5. Evolution of the concrete load-displacement curve during a virtual compression test

normalized dimensions (Fig. 4): (1) prismatic with a rectangular cross section, selected by pressing B on the keyboard; and (2) cylindrical with a circle cross section, selected by pressing V on the keyboard. Furthermore, according to the Spanish standard, the cylindrical samples are capped with a sulfur layer (Fig. 4).

The VL includes all the steps followed in any real compression test from the initial positioning of the sample on the machine discs to the final stage of obtaining results. Briefly, the steps are listed as follows: (1) position the sample on the machine discs (press the space key on the keyboard); (2) switch on the virtual computer screen (press Z on the keyboard); (3) move down the upper disc (press O on the keyboard), (4) close the safety door, which is mandatory for this sort of test according to UNE-EN 12390-1 (press P on the keyboard); (5) begin the compression test by applying the loading scheme (press C on the keyboard)—the evolution of load-displacement curve can be observed on the computer screen (Fig. 5); (6) open the safety door when the sample is broken (press P on the keyboard)—the broken sample appears in the testing machine (Fig. 6); (7) recover the test data of the load-displacement curve of the tested specimen for the corresponding analysis; and (8) press the switch-off button (press Z on the keyboard).

A legend which includes all the keyboard commands available in the VL is always visible on the top-left side of the screen to facilitate the simulation of the compression test. To improve the students' visualization of any detail during the virtual test, camera movement is available by pressing the keyboard arrows up, down, left, or right.

Contrary to reality, mistakes during simulation do not imply injuries or expensive reparations, so autonomous student training with the developed VL could be considered as a safety measurement. By using the VL, students get familiar with the safety

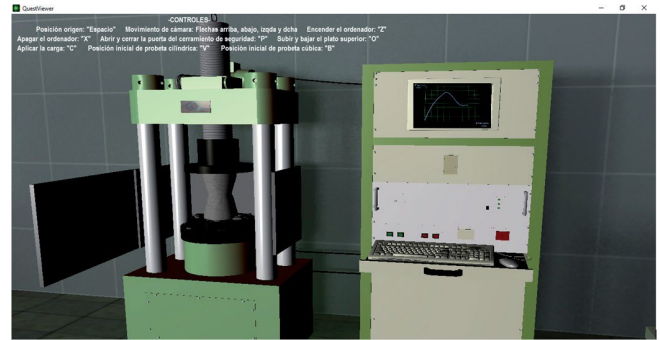


Fig. 6. Simulation of a typical brittle fracture of a cylindrical concrete sample in the VL

procedures established in the Spanish standard UNE-EN 12390-1 for testing concrete samples and, consequently, during the later compression test performed in the real materials testing laboratory, this source of problems is avoided. The VL includes all the safety measurements and procedures considered in the Spanish standard UNE-EN 12390-1. For example, according to the aforesaid standard, the compression test must not be carried out if the safety door is not locked. Some concrete pieces from the brittle fracture of a tested sample could be thrown (Fig. 6) and hit and injure students. Thus, this safety measurement is included in the simulation of the compression test as a sine qua non condition, so the student cannot continue with the simulation of the test if the safety door is not closed. This way, the test simulation reveals to students the usefulness of the safety door.

Safety use of testing machines is a key issue in real life. Thus, the authors believe that the students' training with the VL should include an emergency stop of the test. This way, in case of an emergency during the real test, students would know how to act when something unexpected occurs. So, from academic and safety points of view, students assimilate by using this VL all the safety measures needed for performing a safe and effective test. Finally, at the end of the simulation of the compression test, students can also observe in the VL the typical geometry of a concrete sample that has undergone a compression test up to fracture (cf. Fig. 6). In addition, during and after the test, they could also observe the load-displacement curve of the sample (Fig. 6). For example, Fig. 6 shows a typical load-displacement curve of a brittle material (e.g., concrete) under compression loading when catastrophic fracture takes place (fracture time).

Proposed Teaching Methodology

An innovative teaching methodology by using the previously presented computational tools, VT and VL, which are based on cooperative learning, is proposed in this paper. According to a previous study (Smith 1996), small groups can become more efficient through cooperative learning, although good experiences can also be found in bigger groups of students (Chen et al. 2009). So, the authors decided to put into practice the two aforesaid computational tools in small workgroups of three or four students. The results revealed how students helped one another to solve the proposed exercises, i.e., peer learning was enhanced (Collazos et al. 2007; Vergara and Rubio 2012). Therefore, both VTs and VL allow university teachers to apply cooperative learning in class. The proposed methodological approach to the teaching of the compression test for concrete samples consists of four consecutive steps (Fig. 7):

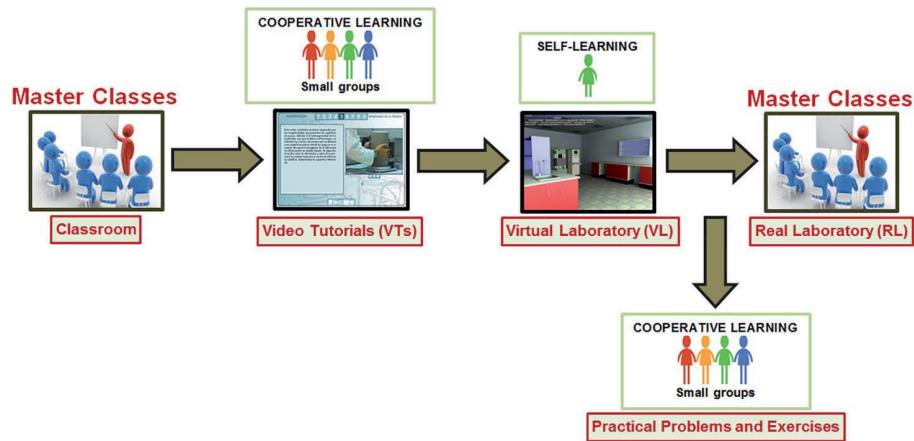


Fig. 7. Scheme of proposed methodological approach (image by Manuel Pablo Rubio)

(1) a preparatory lecture is carried out, covering the essential concepts about the compression test; (2) a VT is used in the classroom to make more attractive to students the explanation and the application of the theoretical background to the material testing; (3) a VL of the materials laboratory including the compression test machine, which allows students free interaction with the virtual compression machine, is available for the students during out-of-classroom study time; and (4) a last lecture in the real materials laboratory is carried out to fix the acquired knowledge in the previous steps by developing a real compression test. This approach can be considered as an active methodology, which promotes student participation in the teaching/learning process (Venter and Coetzee 2011; Vergara and Rubio 2012).

As the real innovation of this methodology approach resides on Steps 2 and 3, a more detail description of them is included as follows. In Step 2, students interact with the VTs in small workgroups, watching the recorded videos, reading the explanation texts on a computer screen, and solving potential doubts among themselves (collaborative learning between peers). Although initially a workgroup should be self-sufficient, the teacher is also in the classroom to assist students if any problem or doubt occurs. The aim of this first part, which lasts for approximately 40 min, is to introduce students to learning the concrete specimen compression tests.

In Step 3, students start to work with the proposed VL, interacting in a 3D environment with the CTM and carrying out a virtual test according to the guidelines included in a practice sheet. After the virtual test, the workgroup obtains an Excel document, which includes the data of the load-displacement curve corresponding to the tested concrete sample. Then, students must obtain and analyze the master curve from these data. They must include in a written report, which will be evaluated by the teacher, (1) the most relevant mechanical parameters of the tested concrete sample (e.g., Young modulus, yield strength, uniaxial compressive concrete strength, ultimate strength, total strain at uniaxial concrete strength, and deformation capacity) and (2) a discussion of the obtained results.

The VL allows the teacher to modify the material mechanical behavior of the tested concrete sample, including different types of concrete (e.g., different dosages, fiber-reinforcement concrete) or different curing times. Thus, this VL offers the teacher many possibilities to create different exercises from Excel data, so students can analyze the effect of different variables on the mechanical behavior of concrete samples, and they can extract the pertinent conclusions.

Students' Opinion

To know the students' opinion with regard to the use of these computational didactic tools, VTs and VL, in engineering education and to reveal their potential advantages, both computational tools were tested by students enrolled in the subject Building and Construction Materials included in the Civil Engineering degree at the Technical College of Ávila (University of Salamanca, Spain). Unfortunately, the laboratories of Technical College of Ávila have not a compression machine as the one simulated in this study, so in this particular case, these tools are very useful in solving such a problem. In addition, these tools were also applied in practical teaching activities at two different technical colleges in Portugal—the Technical College of Viseu and the Technical College of Bragança—within the framework of the Erasmus Programme for promoting university teacher mobility. Unlike the students in the Technical College of Ávila, the students in the colleges in Portugal could complete the whole sessions—interacting with the VTs and the VL as training tools and then observing a real compression test developed with a real testing machine by the teacher in the laboratory.

Once the teaching experience was finished, 70 engineering degree students (from the three technical colleges) anonymously filled a survey questionnaire, which included several questions about the usefulness of both computational didactic tools, VTs and VL (Table 1). The following data reflect the results of the survey, showing the arithmetic average of the students' test answers. Different results were found for both computational tools (Fig. 8).

The students rated 7.5 out of 10 the usefulness of the presented VL as a complement to the teacher explanation during the theoretical classes. In addition, in general terms, students rated 9 out of 10 the usefulness of this sort of computational tool for university teaching, which is consistent with the results of a previous study with another similar VL (Vergara et al. 2012). In addition, 100% of the students considered that (1) the interactivity of a VL enhances their comprehension of the concepts and ideas developed in theoretical classes (Question 3, Table 1); and (2) the learning process is more pleasant than when this sort of VL is not applied (Question 6, Table 1). The latter consideration was even reflected in some of the students' comments in which they compared this VL with the virtual reality of video games.

With regard to the other computational didactic tool presented in this paper, i.e., the VT, students rated both the usefulness of the presented VT (8.9 out of 10) and the general usefulness of this type

Table 1. Survey Questions

Question number	Question	Answer
1	Rate from 1 to 10 the educational usefulness of this type of didactic virtual resources (general opinion).	VL: VTs: Comments:
2	Rate from 1 to 10 the educational usefulness of the concrete compression testing (CCT) virtual tools.	VL: VTs: Comments:
3	Rate from 1 to 10 the following features in both virtual environments. Interactivity Motivation Ease of use	VL: VTs: VL: VTs: VL: VTs:
4	Do you consider that these resources are strengthening by each other and they complement each other or, on the contrary, do you think that some of them can be deleted if another is previously used?	Complement each other _____ can be deleted if _____ have been previously used.
5	Could you make any comment about previous question?	Comments:
6	Do you consider the use of virtual resources a more effective methodology than traditional classes?	Comments:
7	Which is the best option for learning concrete compression test?	(a) Master classes only (b) Master classes + VTs + VL (c) Master classes + VTs (d) Master classes + VL
8	Do you have any comment or recommendation about this experience?	Comments:

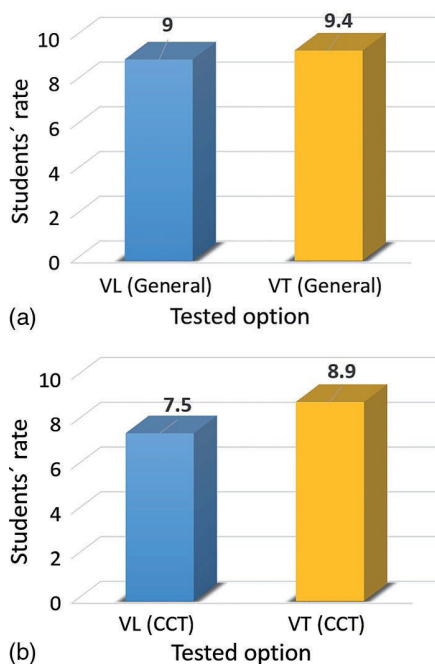


Fig. 8. Mean of the students' survey answers: (a) didactic usefulness of this type of computational tools (Question 1 in Table 1); (b) didactic usefulness of the exposed concrete computational tools (Question 2 in Table 1)

of computational tool for university teaching (9.4 out of 10) slightly higher than the VL. According to the students' comments, the higher valuation of VTs than the VL (Fig. 8) is attributed to the explanatory text enclosed in VTs. In any case, according to the answer to Question 4 (Table 1), the whole student body considered that both computational tools are complementary and that the

application in the classroom of this type of tools enhances the learning process in engineering degrees.

The student body also proposed several improvements to both didactic tools. For VL, students prefer virtual buttons on the screen instead of keyboard commands. For VTs, students believe that increasing interactivity could improve the didactic tool (obviously, this is impossible in a recorded video, but this problem is solved by using VL afterward). Another consideration for future developments is always to use the most updated software for designing computational didactic tools (Vergara et al. 2015c) because students show more motivation in learning with modern than old-fashioned software (Perdukova and Fedor 2013). This fact is similar to the different feeling when playing with modern or old-fashioned video games.

The aforementioned results are in full agreement with answers to Question 3 (Table 1), which are plotted in Fig. 9. The VL exhibits a higher interaction level (linked directly with video games) than VT; consequently, the resulting motivation is also higher. As previously shown in Fig. 8, the didactic usefulness of VT was rated higher. So, this VL is considered as a more motivating didactic tool than VT (because of the modern appearance and high level of interactivity). However, students considered VT as a more effective tool from an educational point of view. Both virtual environments obtained the same rating regarding ease of use (Fig. 9).

With regard to the use of virtual tools in the teaching process, a key question was asked to students (Question 7 in Table 1). Nobody chose the answers (c) or (d), and only 5% chose (a), i.e., 95% of students body prefers training with VTs and VL after master class (b). This reveals that, from the students' point of view, the use of different virtual resources during teaching is really profitable.

Finally, according to the survey comments (Question 8, Table 1), most of students considered using these tools in small workgroups a good experience because this environment contributes to the learning process and helps to solve doubts among their own classmates [collaborative learning between peers (Gokhale 1995; Wei and Ismail 2010)].

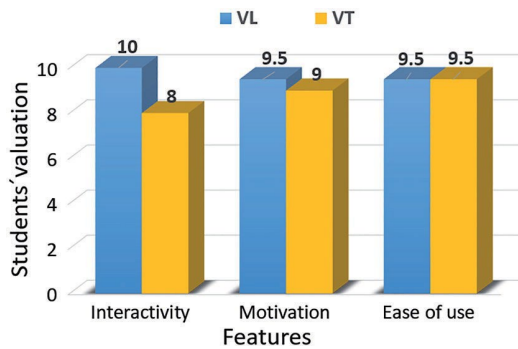


Fig. 9. Mean of the students' valuation about different features of VL and VT (Question 3 in Table 1)

Assessment of the New Methodological Approach

To evaluate the student learning outcomes, a comparison with previous years is necessary. Thus, the traditional methodology is shown in Fig. 10 [notice that the main difference between the traditional (Fig. 10) and the new (Fig. 7) methodologies is the use of virtual environments in the learning process]. So, the variation in academic results using both methodologies could be linked to the use of virtual didactic tools in the teaching/learning process. Thus, an analysis of obtained results is presented in this section considering two different cases: (1) teaching in the colleges in Portugal—new methodology (including virtual environments) versus traditional methodology; and (2) teaching in the college in Spain—new methodology (without virtual environments) versus traditional methodology. The analysis is based on diverse qualitative and quantitative variables that allow one to estimate the improvement in engineering students learning attributed to the use of virtual environments.

For the first case (colleges in Portugal), only qualitative analysis of learning was possible from the available data. Thus, the instructor of the subject appreciated that by using virtual environments (new methodology) (Fig. 10), the student body achieved a deeper knowledge about the topics (compared with previous years in which traditional methodology was used). This was reflected in the more active role of students in the teaching/learning process (because they were more interested and motivated). In fact, a better resolution of the practical problems and exercises was reported by the instructors of the two colleges in Portugal. Furthermore, during the practical class in the actual laboratory, the instructor noticed that students had few doubts compared with previous years. In addition,

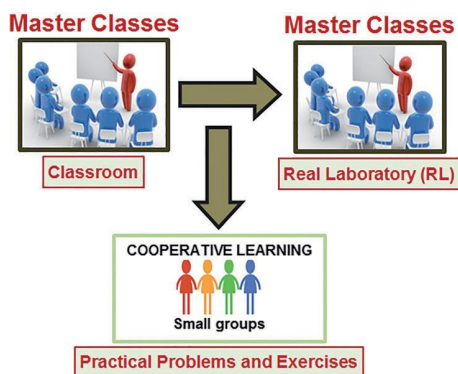


Fig. 10. Scheme of the traditional methodology

Table 2. Assessment Results after Using Traditional or New Methodology (without Real Laboratory)

Assessment results	Traditional methodology	New methodology
Mean	6.60	7.17
Standard deviation	1.53	1.35
Median	6.00	7.00
Pass rate (%)	65.21	78.26
Drop-out rate (%)	17.85	11.53

the main student questions/comments were linked to the testing procedure developed in the VL. This evidences the students' enthusiasm caused by their virtual experience.

For the second case (college in Spain), a quantitative analysis can be developed in terms of the comparison of the assessment results after using traditional or new methodology. Statistical variables of the students' marks such as mean, standard deviation, and median were collected (Table 2). In addition, other learning ratios such as pass rate and drop-out rate are included in Table 2. There was a 9% increase in the students' mean marks when virtual environments were used. Furthermore, there was a 12% decrease in the standard deviation, which indicates that the students' marks are closer to the mean value. In other words, the students' marks increased and are also closer to a higher mean value (7.17 out of 10). This increment is also reflected in the median value (Table 2), which reaches a value of 16%. This improvement can be attributed to the fact that there is not a real laboratory at the Technical College of Avila; consequently, virtual environments fulfill this shortage of equipment.

Therefore, it could be ensured that both virtual environments (VL and VT) (1) are really useful in engineering education and (2) improve the educational achievement of students, especially when these tools fulfill a lack of equipment in a real laboratory. Besides, in general terms, the authors noticed that the students' answers were better during dynamic classes, in which they take an active part in the teaching/learning process.

Conclusions

The proposed computational didactic tools—video tutorials and virtual laboratory—could enhance the technical degree students' understanding of a concrete compression test through a self-learning process. Furthermore, the skills and concepts assimilated during self-learning are very useful during the practical teaching activities in which the real compression test is performed in a real laboratory. This way, better student performance is obtained. These tools solve common problems found in laboratory classes in which, because of a lack of space in crowded groups of students, some students miss some of the compression test details during the teacher explanation. With these tools, this shortcoming is avoided because students are able to individually visualize in detail the whole compression test on a computer screen. So, the proposed computational tools enhance the self-learning process and thus guarantee a productive learning, i.e., developing the habit of thinking, reasoning, and relating or explaining information. Besides, the methodological approach presented in this paper contributes a cooperative experience, so students can learn and understand even more the concrete compression test details through both cooperative learning during classes and self-learning process at home.

The students' opinion about the didactic usefulness of the proposed virtual tools is slightly more favorable to VT than VL. On the contrary, regarding interactivity and motivation, VL obtained a

slightly better valuation than VT. The students proposed a new design of virtual environments, which allows on-screen interaction for controlling the virtual machine instead of using keyboard commands. Such an idea is really interesting because it would provide the students a virtual experience closer to reality, in such a manner that VL would act more as a simulator than it currently does. Therefore, virtual reality simulations need to be as close as possible to reality to become really attractive for users.

Students reflect that these tools complement each other and their individual weaknesses are overcome by using both didactic tools. Also, students consider that working with these tools in small workgroups enhances learning even more because potential doubts can be solved among peers.

Finally, it could be ensured that both virtual environments—VL and VT—(1) are really useful in engineering education and (2) improve the educational achievement of students, especially when they fulfill a lack of equipment in a real laboratory.

References

- Achuthan, K., and Murali, S. (2015). "A comparative study of educational laboratories from cost & learning effectiveness perspective." *Software engineering in intelligent systems*, Springer, Cham, Switzerland, 143–153.
- Anderson, J. R., Greeno, J. G., Reder, L. M., and Simon, H. A. (2000). "Perspectives on learning, thinking, and activity." *Educ. Res.*, 29(4), 11–13.
- Buttcher, P. G. (1986). "Computing aspects of interactive video." *Comput. Educ.*, 10(1), 1–10.
- Chen, K. C., et al. (2009). "Creating a project-based curriculum in materials engineering." *J. Mater. Educ.*, 31(1-2), 37–44.
- Chika, I. E., Azzi, D., Stocker, J., and Haynes, B. P. (2008). "Genuine lab experiences for students in resource constrained environments: The real lab with integrated intelligent assessment." *IEEE Multidiscip. Eng. Educ. Mag.*, 3(4), 112–119.
- Collazos, C. A., et al. (2007). "Evaluating collaborative learning processes using system-based measurement." *Educ. Tech. Soc. J.*, 10(3), 257–274.
- Crook, A., et al. (2012). "The use of video technology for providing feedback to students: Can it enhance the feedback experience for staff and students?" *Comput. Educ.*, 58(1), 386–396.
- Dobrzański, L. A., Jagiełło, A., and Honysz, R. (2008). "Virtual tensile test machine as an example of material science virtual laboratory post." *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, 27(2), 207–210.
- Dobrzański, L. A., and Honysz, R. (2009). "On the implementation of virtual machines in computer aided education." *J. Mater. Educ.*, 31(1-2), 131–140.
- European Standard. (2013). "Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds." *UNE-EN 12390-1*, Madrid, Spain.
- Forcael, E., Glagola, C., and González, V. (2012). "Incorporation of computer simulations into teaching linear scheduling techniques." *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000071, 21–30.
- Foss, B. A., and Eikaas, T. I. (2006). "Game play in engineering education—Concept and experimental results." *Int. J. Eng. Educ.*, 22(5), 1043–1052.
- García, J., and Entrialgo, J. (2015). "Using computer virtualization and software tools to implement a low cost laboratory for the teaching of storage area networks." *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 23(5), 715–723.
- Gerson, B. P., Sorby, S. A., Wysocki, A., and Baartmans, B. J. (2001). "The development and assessment of multimedia software for improving 3-D spatial visualization skills." *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 9(2), 105–113.
- Gokhale, A. A. (1995). "Collaborative learning enhances critical thinking." *J. Tech. Educ.*, 7(1), 22–30.
- Goodhew, P. J. (2002). "Programas interactivos (software) para la enseñanza de materiales." *J. Mater. Educ.*, 24(1-3), 39–44.
- Hashemi, J., Chandrashekar, N., and Anderson, E. E. (2006). "Design and development of an interactive web-based environment for measurement of hardness in metals: A distance learning tool." *Int. J. Eng. Educ.*, 22(5), 993–1002.
- Hilfert, T., and König, M. (2016). "Low-cost virtual reality environment for engineering and construction." *Visualization Eng.*, 4(2), 1–18.
- Kang, S., Chan, Y., Lu, C., Lai, J., and Lee, T. (2013). "Development of virtual equipment: Case study of the Venturi tube experiment." *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000158, 281–289.
- Koretsky, M., Kelly, C., and Gummer, E. (2011). "Student perceptions of learning in the laboratory: Comparison of industrially situated virtual laboratories to capstone physical laboratories." *J. Eng. Educ.*, 100(3), 540–573.
- Mosterman, P. J., et al. (1994). "Virtual engineering laboratories: Design and experiments." *J. Eng. Educ.*, 83(3), 279–285.
- Nicolson, R. I., Syder, D., and Freeman, M. (1994). "Construction of a visual (video-supported active learning) resource." *Comput. Educ.*, 22(1/2), 91–97.
- Palmer, S. (2007). "An evaluation of streaming digital video resources in on- and off-campus engineering management education." *Comput. Educ.*, 49(2), 297–308.
- Park, C., Le, Q., Pedro, A., and Lim, C. (2015). "Interactive building anatomy modeling for experiential building construction education." *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000268, 04015019.
- Perdukova, D., and Fedor, P. (2013). "Virtual laboratory for the study of technological process automation." *Int. J. Eng. Educ.*, 29(1), 230–238.
- Quest 3D Power v.4* [Computer software]. Act-3D B.V., Warmond, Netherlands.
- Reynolds, P. A., and Mason, R. (2002). "On-line video media for continuing professional development in dentistry." *Comput. Educ.*, 39(1), 65–98.
- Smith, K. A. (1996). "Cooperative learning: Making 'groupwork' work." *New Direct. Teach. Learn.*, 67, 71–82.
- Tori, R., Nakamura, R., Nunes, F. L. S., Bernardes, J. L., Ferreira, M. A. G. V., and Ranzini, E. (2011). "Interlab: Interactive technologies laboratory." *SBC J. 3D Interact. Syst.*, 2(2), 94–97.
- Ullman, K. M., and Sorby, S. A. (1995). "Enhancing the visualization skills of engineering students through computer modeling." *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 3(4), 251–258.
- Venter, C., and Coetzee, J. (2011). "Interactive learning through gaming simulation in an integrated land use-transportation planning course." *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000171, 04013003.
- Vergara, D., Lorenzo, M., and Rubio, M. P. (2015a). "Virtual environments in materials science and engineering: The students' opinion." *Handbook of research on recent developments in materials science and corrosion engineering education*, H. Lim, ed., IGI Global, Hershey, PA, 148–165.
- Vergara, D., and Rubio, M. P. (2012). "Active methodologies through interdisciplinary teaching links: Industrial radiography and technical drawing." *J. Mater. Educ.*, 34(5-6), 175–186.
- Vergara, D., and Rubio, M. P. (2015). "The application of didactic virtual tools in the instruction of industrial radiography." *J. Mater. Educ.* 37(1-2), 17–26.
- Vergara, D., Rubio, M. P., and Lorenzo, M. (2012). "New computer teaching tool for improving students' spatial abilities in continuum mechanics." *IEEE Tech. Eng. Educ.*, 7(4), 44–48.
- Vergara, D., Rubio, M. P., and Lorenzo, M. (2014). "Interactive virtual platform for simulating a concrete compression test." *Key Eng. Mater.*, 572, 582–585.
- Vergara, D., Rubio, M. P., and Lorenzo, M. (2015b). "A virtual environment for enhancing the understanding of ternary phase diagrams." *J. Mater. Educ.*, 37(3-4), 93–102.
- Vergara, D., Rubio, M. P., and Lorenzo, M. (2015c). "Multidisciplinary methodology for improving students' spatial abilities in technical drawing." *Sci. J. Educ. Tech.*, 5(1), 1–8.

- Vergara, D., Rubio, M. P., Prieto, F., and Lorenzo, M. (2016). "Enhancing the teaching/learning of materials mechanical characterization by using virtual reality." *J. Mater. Educ.*, 38(3-4), in press.
- Wei, C. S., and Ismail, Z. (2010). "Peer interactions in computer-supported collaborative learning using dynamic mathematics software." *Proc. Soc. Behav. Sci.*, 8, 600-608.
- Wells, J., Barry, R. M., and Spence, A. (2012). "Using video tutorials as a carrot-and-stick approach to learning." *IEEE Trans. Educ.*, 55(4), 453-458.
- Yang, S., and Lu, T. (2007). "T3 SOC design flow case study: Design a video processing pipeline." *Proc., IEEE Int. Conf. on ASIC*, IEEE, New York.

*3.2. Enhancing the teaching/learning of materials
mechanical characterization by using virtual reality*

ENHANCING THE TEACHING/LEARNING OF MATERIALS MECHANICAL CHARACTERIZATION BY USING VIRTUAL REALITY

D. Vergara^a, M.P. Rubio^b, F. Prieto^b and M. Lorenzo^c

^a VIMET Group, Technological Department, Catholic University of Avila, Spain; *diego.vergara@ucavila.es*

^b VIMET Group, EPS de Zamora, Campus Viriato, Universidad de Salamanca, Spain; *mprc@usal.es*

^c ETSII de Béjar, University of Salamanca, Spain; *mlorenzo@usal.es*

ABSTRACT

The use of virtual laboratories (VLs) in teaching/learning is increasing in the last decade. As each virtual tool, these educational resources must be constantly updated in order not to become obsolete and, so, to keep student motivation. Thus, an up-to-date and sophisticated virtual 3D environment - fitted as a serious game - is presented in this paper, which shows the operation of a universal testing machine in an interactive way. This 3D-VL motivates students to study the mechanical characterization of materials. According to survey results, students demand not only the combined use of both real and virtual laboratories for their experimental classes, but also they request virtual environments designed in 3D. Thus, 3D interactive VLs become really attractive for teaching, since their use is highly encouraging.

Keywords: *virtual laboratory, 3D virtual worlds, virtual reality, mechanical characterization.*

INTRODUCTION

Since active class sessions can help to motivate students ¹, Active Learning (AL) practices in university are currently increasing ². Besides, taking into account the well-known importance of the use of Information and Communication Technology (ICT) in the wider society, nowadays the combined use of AL and ICT is a relevant topic in education ³⁻⁵. Concretely, with regard to the application of

ICT in engineering education, there are many examples of virtual laboratories (VLs) based on AL⁶⁻¹⁶. Indeed, due to the common difficulties in spatial visualization that engineering subjects exhibit ¹⁷, there are evidences that interactive simulation in engineering curricula can enhance student learning and improve engineering education ^{18,19}. In addition, the effectiveness of using virtual environments in engineering education was proved in many research papers²⁰⁻²³.

Taking into account the increasing usefulness of these types of environments, it seems to be convenient to summarize the most important benefits when *virtual laboratories* are used in engineering education:

- To palliate problems related to the overcrowding of practical classes, which imply that many students were not able to observe the performance of the corresponding machine ²⁴.
- The time availability for handling the tool as much as one wishes ²⁵.
- The chance of implementing, in the virtual environment, didactical applications for reinforcing the acquired knowledge ¹⁰.
- To motivate student body for the study of the matter by bringing them closer to a friendly and familiar environment ^{23,26}.
- To economize costs of some practical classes ^{9,24,27}.
- To avoid potential risk of dangerousness which can appear at some physical (real-life) laboratories when certain materials are used ^{25,28}.

An interactive application can be considered as a VL when the following aspects are satisfied²³:

- A VL must show the phenomena and allow controlling the variables, which affect it.
- A VL must have the ability to obtain the numerical data of the involved magnitudes.
- A VL must include the ability to obtain the value of the relevant variables by using of measurement devices such as rule, chronometer, thermometer, balance, sample, etc.
- A VL should allow the observation of the magnitudes.

Regarding virtual environments linked with tensile testing or mechanical characterization of materials, there are different examples of teaching/learning: (i) virtual tools ^{9,12,22,29}; (ii) web pages including not only a vision of

tensile test but also interactive exercises in order to enhance the student learning (*SteelUniversity.org*); and (iii) video recording of real tensile tests really useful for teaching (different videos in YouTube Nevertheless, to date, no reference of a virtual tool linked with mechanical characterization of materials has been designed in a tridimensional (3D) interactive environment. A 3D virtual environment involves a higher realistic simulation than a 2D environment and, therefore, 3D virtual tools become more attractive and motivating to students ^{15,30}.

3D virtual laboratory shows the information in a 3D environment and allows the interaction with it. In this way, an abstract experience (the information processing) is converted to an experience similar to that of the real world (*virtual reality*). The typology of virtual environments used in the teaching/learning process covers from relative simple tools to the very complex ones. However, in general terms, two categories can be cited ²³:

- *window in the world*, where the user's vision of the world is achieved by means of a computer screen that acts as a "window".
- *immersion*, which introduces the user into a virtual world through haptic devices and helmet-mounted glasses.

In this paper, a novel 3D virtual laboratory is presented for enhancing the teaching/learning of mechanical characterization of materials. Taking into account that the tensile test is the most common method for obtaining the material's mechanical properties ³¹, a 3D interactive VL including a universal testing machine is exposed in this paper. However, it is advisable to emphasize that the use of 3D interactive virtual tools –similar to video-games– in teaching/learning activities is not a guarantee of success and, in this way, the effectiveness of using ICT in education is a current topic of research ³².

To make sure that this 3D-VL is really useful in teaching/learning process, an educational

support with practical exercises linked with the mechanical characterization of materials was included in the virtual tool. To design this educational support, the opinion of both students and teachers were considered. Thus, this educational tool has suffered continuous improvements up to reach the final version shown in this paper, which is expected to have a high didactic effectiveness. Besides, an educational experience of using this 3D-VL in an AL environment is exposed in the paper.

3D VIRTUAL TOOL

Two commercial software were used to design the 3D virtual laboratory: 3D Studio Max[®] and Quest 3D[®]. The most important features of this 3D-VL are: (i) 3D environment, (ii) interactivity, (iii) high realism, (iv) easiness of use, (v) motivation (awaked in the students), (vi) movement in real time and, finally, (vii) it allows one to implement a didactic accessory for helping students to enhance the knowledge of mechanical characterization of materials.

3DStudioMax[®] is a software for creating graphics and 3D animations. This general-purpose software allows the export/import of different models and animations to other applications, e.g., AutoCAD[®] or Quest3D[®]. This software was used for (i) 3D modelling of the laboratory environment, the furniture and the own universal testing machine; (ii) to assign the material type to each component; to create the more adequate lighting in the virtual laboratory, thereby looking as real as possible. Later on, the models obtained with 3DStudio Max[®] were exported to the software Quest3D[®], which is a tool that comprises graphical engine in real time of execution (movements in real time) and an object oriented programming system. The Quest3D[®] environment is used for including the interactivity of the movement within the scenario and the interaction with other objects placed within. In this sense, Quest3D[®] has some advantages with regard

to other software which allow implementing visual interactive components³³:

- (i) quick integration/delete of components in the model;
- (ii) easiness in the work flow definition;
- (iii) flexibility for changing the geometry and characteristics of objects in the model;
- (iv) 3D visual integration with capability for importing/exporting entities from/to other sources;
- (v) accessibility for each educative institution through academic licenses;
- (vi) the programming is based on the philosophy “WYSIWYG” (What You See Is What You Get), that is to say, results are directly seen in the program, so that one does not need to render or to export the application in order to verify the programming.

Taking into account the aforesaid features, authors of the present work chose this environment for designing the 3D-VL of tensile testing.

The main idea of this tool is framed within the so-called *serious games*, which can be aimed to a wide variety of users, from students to professionals^{34,35}. Thus, this type of virtual games can be used for each gender, can use any game technology and can be developed in any platform. In the 3D-VL shown in this paper there are mainly two phases. The first one is based on this type of serious games, in this case of didactic character (Figures 1 and 2), and the second one consisting in a collection of virtual exercises designed from the most purely educative point of view (Figure 3).

In the first phase (serious game), *realism* is one of the key issues. Thus, students have a sensation of being in a real testing laboratory (virtual reality). To achieve that goal, the designed 3D-VL includes not only a realistic model of the testing machine but also a realistic simulation of the whole laboratory (Figure 1). In addition, the use of Quest 3D[®] environments



(a)



(b)

Figure 1. Realism of the 3D-VL: (a) virtual environment; (b) detailed view of the universal testing machine used for tensile testing.

allows student to freely move. within the virtual laboratory, placing himself/herself anywhere and, even, students can rotate on themselves for visualizing the laboratory from any point of view. Thus, this 3D-VL is able to capture a higher degree of realism than other VL used previously in teaching tensile tests, since all of them are simulated in 2D environments^{9,12,22,29}.

On the other hand, the interactivity of this 3D-VL helps student to self-understand the testing machine performance (*self-learning*) and, furthermore, it helps to promote an active learning activity. Thus, students decide the right time (i) for placing the specimen in the machine jaws, and (ii) for activating the loading and, after that, they can visualize the specimen elongation during testing whilst the

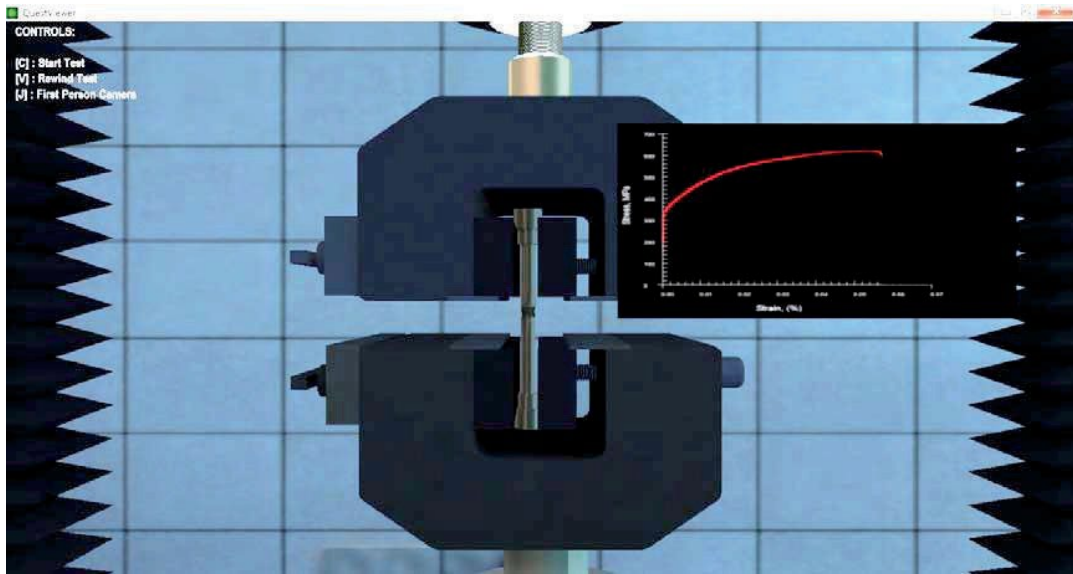


Figure 2. View of the high resolution camera during a virtual tensile test.

stress-strain curve is plotted on the screen of the virtual computer (Figures 1b and 2). Besides, they can check that the maximum load instant occurs simultaneously with the beginning of necking phenomena (Figure 2). This way, student has the feeling to be running a real test (with an added advantage of being able of repeat any action if something is not well understood). Furthermore, optionally students can activate the detailed visualization in real time of the stress-strain curve plotted during testing (Figure 2). To increase the realism of the 3D-VL, the most common sounds appearing during a real tensile test, were incorporated: the sound of loading application, sound of specimen catastrophic fracture and, even, the sound of the Windows[®] switch on of the virtual computer.

Finally, to make the tool easy to handle, a simple and clear legend was included on the left upper corner of the computer screen (Figures 1 and 2). Since this legend is always visible on the screen, students can easily find such key information in the case of any doubt.

METHODOLOGY

The methodology used in the classroom consisted in applying the virtual tool after previous theoretical explanation in a master class. The total duration of the class based on handling the 3D virtual tool was about 2 hours, divided in two stages:

- *3D-VL*: 15 minutes for performing the virtual test in an interactive way and acquiring a perfect understanding of the stress-strain curve evolution (Figures 1 and 2). It is convenient that each student carries out this phase individually, thereby realizing of all details of the performance of the tensile test.
- *Educational Accessory*: 1 hour and 45 minutes for solving the practical exercises implemented in the virtual platform and checking the problems' solutions (Figure 3). Exercises were designed in three different ways: (i) theoretical formulae (Figure 3a), (ii) problems with the mechanical properties of materials (Figure 3b) and (iii) examination of different

QuantViewer

Introduction

- Fill in the blanks with the correct answer:

$E = \frac{\square}{\varepsilon}$	$\sigma_T = \sigma(1 + \square)$
$\sigma = \frac{\square}{A_0}$	$\varepsilon_T = \ln(\square + \varepsilon)$
$L = \square(1 + \varepsilon)$	$\square = \frac{\Delta l}{l_0}$

TYPE 0

BACK TO LAB (ENTER)

NEXT (M)

PREVIOUS (N)

EXIT (RIGHT SHIFT)

(a)

QuantViewer

Exercise 7

- The following results are obtained in a traction test of an aluminum bar which initial length is $l_0=5.00$ cm and initial diameter is $\phi_0=1.30$ cm: $F=3180$ kp and $\Delta L=0.0175$ cm (in yield strength). The distance between marks after rupture is 5.65 cm and the final diameter is 1.05 cm in the fracture section. Calculate:

- Yield Strength.
- Young Modulus.
- Elongation and necking.
- Final length of a 125 cm length bar (made of the same material) loaded with 200 MPa.

TYPE 1

BACK TO LAB (ENTER)

NEXT (M)

PREVIOUS (N)

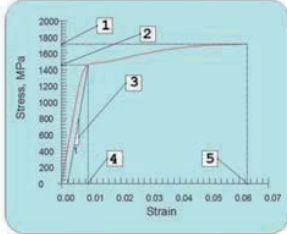
EXIT (RIGHT SHIFT)

(b)

QuantViewer

Exercise 9

- Relate mechanical parameters with the letters in the curve:



	$\sigma_{ys} = ?$
	$\sigma_{uts} = ?$
	$\varepsilon_{yp} = ?$
	$\varepsilon_u = ?$
	$E = ?$

Identify which is the correct material.

TYPE 2

BACK TO LAB (ENTER)

NEXT (M)

PREVIOUS (N)

EXIT (RIGHT SHIFT)

(c)

Figure 3. Virtual interactive exercises in the virtual tool: (a) Theoretical formulae; (b) problems; (c) mechanical parameters for different type of materials.

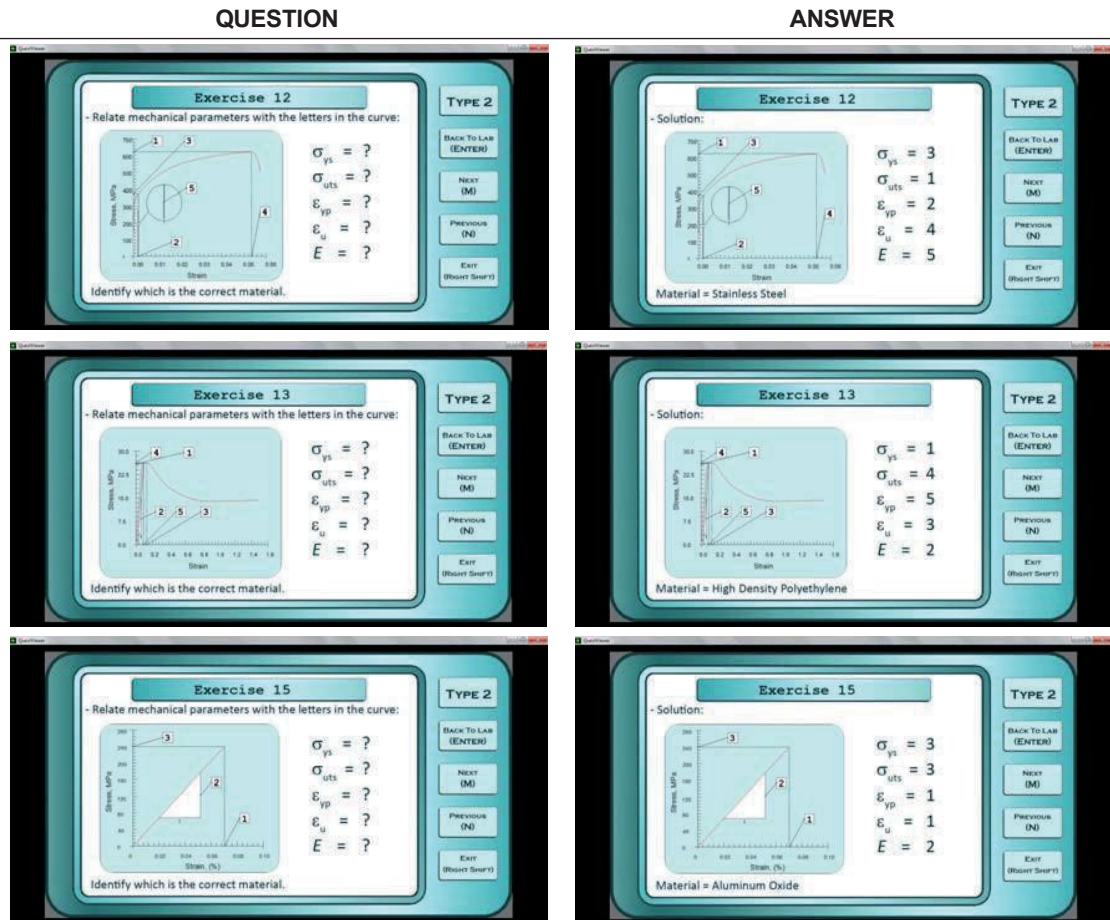


Figure 4. Exercises for different materials families.

- stress-strain curves to obtain the mechanical parameters for different type of materials (Figures 3c and 4), which, according to a previous paper³⁶, is an effective and clarifying method of teaching mechanical properties of materials. This last phase of solving problems is convenient to be trained by cooperative learning based on small groups of 2-3 students³⁷, since such groups can enhance by themselves a more effective cooperative learning.

Apart from that, students are really motivated to collaborate between themselves since these active classes with the serious game are evaluated. Thus, each student obtains his/her

corresponding mark. A scheme of the methodological proposal is shown in Figure 5.

What is more important is to learn all the concepts related to materials mechanical characterization. Thus, to this end, the teacher must control cooperative learning in order to make sure that students are trying to solve the exercises in a correct way. Furthermore, it would be advisable that this educational activity is evaluated, so that students consider it in a serious way. In this way, authors linked this activity with the qualification of the whole practical classes of the subject. Students must write down a report about the experience, expounding both the results of the exercises and their own conclusions.

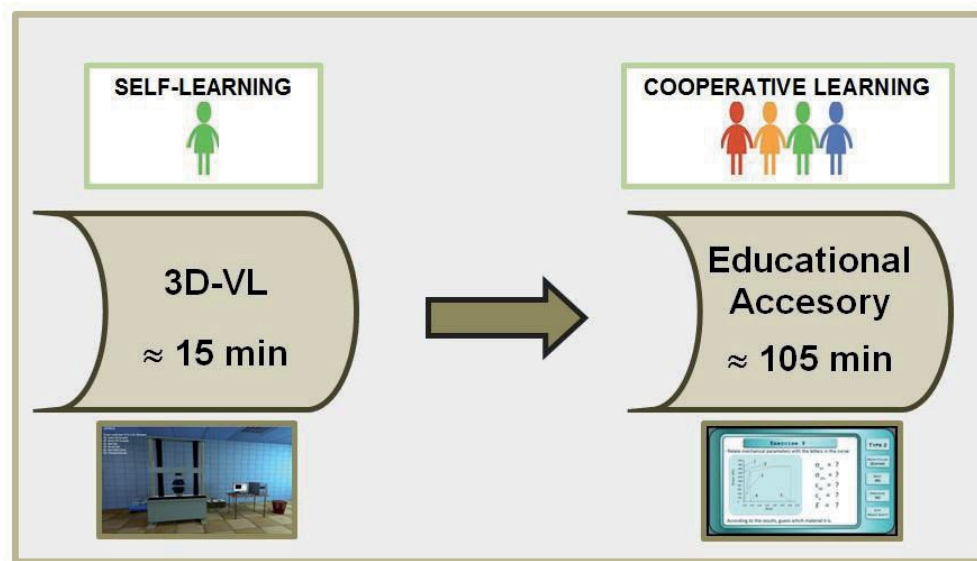


Figure 5. Scheme of the active learning methodology with the 3D virtual tool.

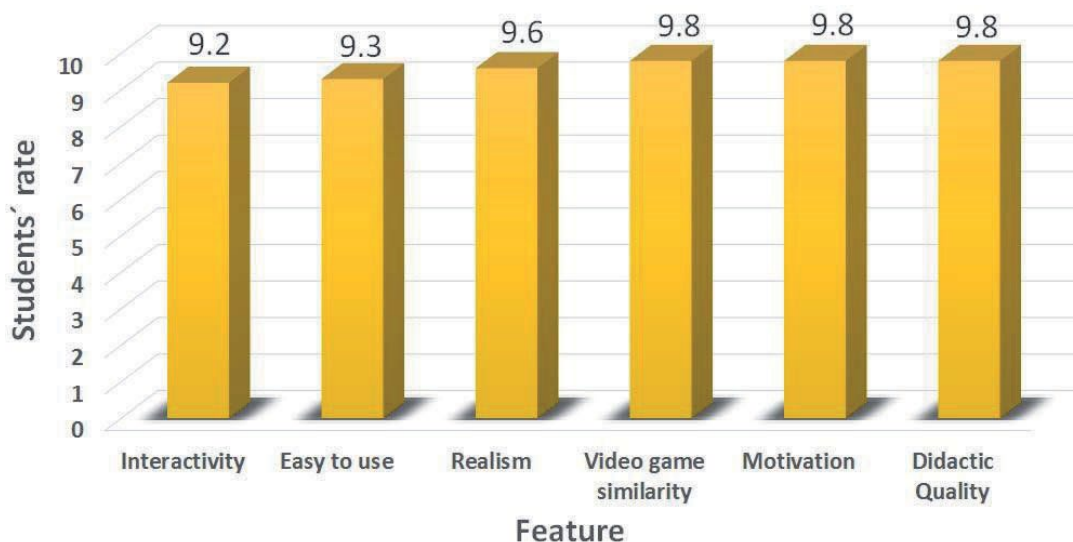


Figure 6. Students' valuation of the 3D Virtual Tool.

STUDENTS' OPINION

The 3D-VL has been evaluated by applying surveys to engineering students at diverse universities (University of Salamanca and Catholic University of Avila) and, furthermore, the surveys were also completed by a great variety of students of several European countries during a course organized by AEEPO (Autonomous European Educational

Programs Organization). Thus, a total number of 110 students were surveyed to achieve the following results shown in this paper. Students were enrolled in five different degree programs: Mechanical Engineering, Geological Engineering, Civil Engineering, Architecture and Geology. Surveys rated the following features: interactivity, ease of use, realism, similitude with a videogame environment, motivation (for being an intuitive and easy-

understanding tool), didactic quality, educational application, etc. Figure 6 was obtained from the arithmetic average of the student rating. Such results serve to verify the good assessment of this serious game by the student body, since all the VL features were given high ratings (over 9 out of 10). The features subjected to evaluation are placed in Figure 6 in an increasing order of students' valuation. In addition, students were asked if they considered that a previous explanation is needed for understanding the 3D virtual tool or, otherwise, they consider that it is not necessary because of this tools is self-explaining. Survey answers indicate both options, on the one hand they think that the stage similar to a videogame is self-explaining but, on the other hand, a previous class with a teacher is needed for the complementary exercises.

In addition, it is worth to highlight the clear students' demand of 3D virtual labs, due to the high importance that they give to realism and similitude with videogames. This idea is reflected on the results shown in Figure 7, when students were asked to choose between (i) "I prefer 3D-VL" or (ii) "I have no preference, 2D VL or 3D VL, the key point is just how didactic the tool is". Most of the students (61.7%) choose the 3D tool. This plot shows the today's importance of serious games in university teaching.

On the other hand, students were asked in the survey about which is the best methodology for the practical credits (of experimental subjects): (i) VL; (ii) Real Laboratory (RL); or (iii) Mixture of VL and RL. Results indicate that 78.3% of the student body chose the combined option VL+RL (Figure 8), i.e. students *do* demand the use of VL in the classroom, but as a reinforcement of testing in RL. The most logical order for applying such activities is, firstly the use of VL and later the RL, since the VL is in fact, a next step of the master class and enhances that student's wish for even more experimenting in the real world. On the other hand, the next question was included in the survey: "Would you like to

have more classes with virtual tools in other subjects?" If the answer is yes, please list which subjects". Among the students' answers, almost all the subjects including an experimental character of engineering degrees were listed.

Besides, many engineering students declared that, after seeing the tensile test in the RL, they did not learn more than after using the VL. This is mainly due to practical classes of a tensile test in a RL are conducted by a teacher, and the students act as a simple onlookers. Even so, the engineering student body demands the use of RL in their training, just as an essential way to verify the acquired knowledge during their classes with VLs.

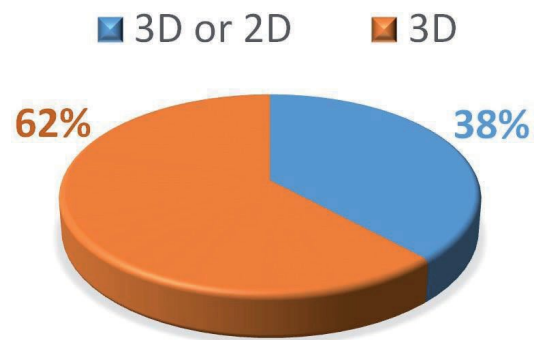


Figure 7. Students' opinion of the VL scene.

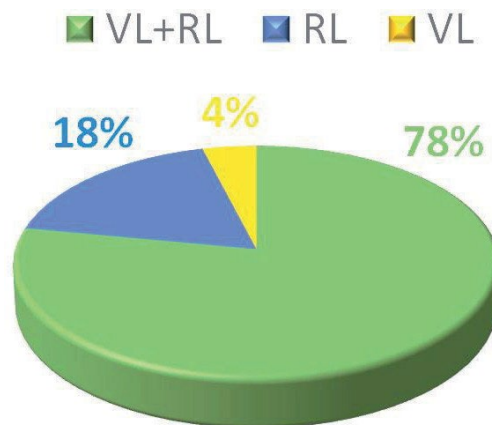


Figure 8. Students' selection of the best methodology for the experimental classes.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The technological advance of any tool or machine, which uses electronic devices, supposes that the market permanency of any product would be short, since in a brief timeline a new commercial model appears, making the old one obsolescent. The same happens with the educative technologies and, therefore, teachers involved must constantly update their knowledge about ICT. In this sense, each day it is harder to motivate student body and to catch their attention by using “old” virtual environments, which from the aesthetic point of view seem to be obsolete. Taking this into account, authors of this paper think that it is really convenient to take advantage of the newest and most sophisticated resources to build up a didactic virtual environment. This idea is strengthened with the results obtained in the students’ answers of the surveys included in this paper.

Therefore, VL used in the classroom must have, in addition of a high didactic quality, an appearance as realistic as possible for motivating student body to use them and, furthermore, to involve students in the teaching/learning process, thereby enhancing the Active Learning. These aims are clearly enhanced by using 3D environments. In fact, according the scarce motivation awaked in the engineering students when using 2D virtual tools and the students’ opinion reflected in the surveys (Figure 7), it can be elucidate that 2D VL are becoming obsolescent. This fact supposes that teachers must periodically update the VL (with the most modern technologies), so that their didactic resources do not become old-fashioned. According to survey results (Figure 7), to be really effective, a virtual tool not only must be didactic but also it must get the students’ attention. On the contrary, student body do not feel really motivated by using virtual resources.

Up to date, the 3D-VL presented in this paper exhibits an aesthetic appearance and design, which clearly attract students (even also some teachers who have handled it).

This is supported by the survey results that show high ratings for all 3D-VL features (Figure 6). Even so, knowing the so exigent students demand with regard to keep virtual tools attractive, authors are currently expanding the educative complement including more stress-strain curves of diverse materials families: metallic, ceramics and polymers. Some examples are shown in the Figure 4. Thus, the traditional approach to the subjects linked with Materials Engineering analyzing almost exclusively metals for tensile tests is avoided. With this extension in the 3D-VL, engineering students can interactively learn the difference between a fragile and ductile behaviour, and they can compare, in a reasoning way, the mechanical behaviour of different materials (in the same way of the apps included in the web page *SteelUniverty.org*).

Authors wanted to highlight with this paper an advance in designing educative technologies used for simulating virtual laboratories of Materials Science and Engineering, by using 3D environments based on serious games. Even so, authors are conscious that, as in the case of any virtual tool, which tries to keep catching the user attention, they will have to perform periodical improvements in the virtual platform with the aim of keeping its modern aspect in the future. To achieve that goal, it is convenient to carry out annual surveys with the aim of detecting when the tool is beginning, (from the didactic point of view), not to be motivating and effective. Besides, another aspect influencing the students’ opinion is the methodology implemented in the virtual tool, which must be continuously updated as well.

REFERENCES

1. C. Baillie and G. Fitzgerald, *Eur. J. Eng. Educ.* **25**, 145 (2000).
2. S. Freeman, S.L. Eddy, M. McDonough, M.K. Smith, N. Okoroafor, H. Jordt and M.P. Wenderoth, *Proc. National Acad. Sci.* **111**, 8410 (2014).

3. D. Vergara and M.P. Rubio, *J. Mater. Ed.* **34**, 175 (2012).
4. A.M. Croteau, V. Venkatesh, A. Beaudry and J. Rabah, *48th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Honolulu, Hawaii, 2015, p. 111.
5. D. Vergara, M.P. Rubio and M. Lorenzo, *Sci. J. Educ. Tech.* **5**, 1 (2015).
6. L.I. Gil, E. Blanco and J.M. Aulí, *Eur. J. Eng. Educ.* **25**, 243 (2000).
7. M. Auer, A. Pester, D. Ursutiu and C. Samoila, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Maribor, Slovenia, 2003, p. 1208.
8. B. Bhattacharya, *Innovations Educ. Teach. Inter.* **42**, 93 (2008).
9. L.A. Dobrzański, A. Jagiełło and R. Honysz, *J. Achievem. Mater. Manuf. Eng.* **27**, 207 (2008).
10. L.A. Dobrzański and R. Honysz, *J. Mater. Ed.* **31**, 131 (2009).
11. M. Stefanovic, M. Matijevic, V. Cvijetkovic and V. Simic, *Comput. Appl. Eng. Educ.* **18**, 526 (2010).
12. L.A. Dobrzański and R. Honysz, *J. Achievem. Mater. Manuf. Eng.* **42**, 196 (2010).
13. O.A. Herrera and D.A. Fuller, *Australas. J. Educ. Tech.* **27**, 428 (2011).
14. D. Vergara, M.P. Rubio and M. Lorenzo, *Key Eng. Mater.* **572**, 582 (2014).
15. E. Ince, F.G. Kirbaslar, E. Yolcu, A.E. Aslan, Z.C. Kayacan, J. Alkan, A.C. Akbasli, M. Aytekin, T. Bauer, D. Charalambis, Z.O. Guneş, C. Kandemir, U. Sari, S. Turkoglu, Y. Yaman and O. Yolku, *Turk. Online J. Educ. Tech.* **13**, 1 (2014).
16. D. Vergara, M.P. Rubio and M. Lorenzo, *J. Mater. Ed.* **37**, 93 (2015).
17. M. Garmendia, J. Gisasola and E. Sierra, *Eur. J. Eng. Educ.* **32**, 315 (2007).
18. B.A. Fox and T.O. Eikaas, *Inter. J. Eng. Educ.* **22**, 1043 (2006).
19. S.K. Chaturvedi and O. Akan, *International Mechanical Engineering Education Conference (IMEEC)*, Beijing, China, 2006, p. 1.
20. S. Gadzhanov and A. Nafalski, *World Trans. Eng. Tech. Educ.* **25**, 162 (2010).
21. T. Machet, D. Lowe and Ch. Gütl, *Eur. J. Eng. Educ.* **37**, 527 (2012).
22. A. Kiraz, C. Kubat, Y.Y. Özbek, Ö. Uygun and H. Eski, *Acta Phys. Polon. A* **125**, 310 (2014).
23. D. Vergara, M. Lorenzo and M.P. Rubio, *Virtual Environments in Materials Science and Engineering: the Students' Opinion*, Chapter 8 in *Recent Developments in Materials Science and Corrosion Engineering Education*, ed. H.L. Lim, IGI Global Publishers, USA, 2015, p. 148.
24. C. Tüysüz, *Inter. Online J. Educ. Sci.* **2**, 37 (2010).
25. K. Achuthan and S.S. Murali, *4th Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015)*, Czech Republic, 2015, p. 143.
26. J.G. Zubia, U. Hernández, I. Angulo, P. Orduña and J. Irurzun, *Inter. J. Online Eng.* **5**, 1861 (2009).
27. J. García and J. Entrialgo, *Comput. Appl. Eng. Educ.* **23**, 715 (2015).
28. D. Vergara and M.P. Rubio, *J. Mater. Ed.* **37**, 17 (2015).
29. S.P. Brophy, A.J. Magana and A. Strachan, *Adv. Eng. Educ.* **3**, 1 (2013).
30. B. Balamuralithara and P.C. Woods, *Comput. Appl. Eng. Educ.* **17**, 108 (2009).
31. D. Roylance, *Uniaxial Mechanical Response*, Chapter 1 in *Mechanical Properties of Materials*, MIT, USA, 2008, p. 128.
32. S. Mumtaz, *J. Inf. Tech. Teach. Educ.* **9**, 319 (2000).

33. R. Pérez, S. Jöns, A. Hernández and D. Young, *Conciencia Tecnológica* **41**, 28 (2011).
34. I. Mayer, G. Bekebrede, C. Harteveld, H. Warmelink, Q. Zhou, T. van Ruijven, J. Lo, R. Kortmann and I. Wenzler, *Br. J. Educ. Tech.* **45**, 502 (2014).
35. K. Alanne, *Eur. J. Eng. Educ.* **41**, 204 (2015).
36. J. L. Meseguer-Valdenebro, V. Miguel, M. Caravaca, A. Portolés and F. Gimeno, *J. Mater. Ed.* **37**, 103 (2015).
37. K.A. Smith, *New Direct. Teach. Learn.* **67**, 71 (1996).

3.3. A virtual environment for enhancing the understanding of ternary phase diagrams

A VIRTUAL ENVIRONMENT FOR ENHANCING THE UNDERSTANDING OF TERNARY PHASE DIAGRAMS

Diego Vergara ^a, Manuel Pablo Rubio ^b and Miguel Lorenzo ^c

^a Technological Department, Catholic University of Avila, C/ Canteros, s/n, 05005 Ávila, Spain; *dvergara@ual.es*

^b Escuela Politécnica Superior de Zamora, Campus Viriato, University of Salamanca, Avda. Requejo 33, 49019 Zamora, Spain; *mprc@usal.es*

^c Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, University of Salamanca, Avda. Fernando Ballesteros, 2, 37700 Béjar, Salamanca, Spain; *mlorenzo@usal.es*

ABSTRACT

Materials and Mechanical Engineering students often find spatial visualization difficult. The problem appears in particular in the field of ternary phase diagrams. In order to improve the students' spatial skills in such a field, an interactive virtual application was developed using diverse commercial software: (i) 3DStudioMax[®] for designing the ternary equilibrium diagram and (ii) Quest3D[®] for giving the tool a more intuitive and ease-of-use character. The final design of the 3D virtual tool allows students to interact in real time with a ternary diagram, e.g. rotating views, changing the point of view, cutting the diagram revealing isothermal sections, observing hidden zones of the diagram by applying the transparency option, exploding view of phases and, so on.

Keywords: *engineering education, ternary phase diagram, 3D interactive virtual platform, three-dimensional viewing.*

INTRODUCTION

Phase transformations are important in a variety of industrial processes involving heat to thermochemical treatment of metal alloys. Therefore a deep knowledge of the phase diagrams (and associated microstructures) is required for students of mechanical and materials engineering. In particular, ternary phase diagrams (TPDs) are especially useful for analyzing countless metal alloys composed by a mixture of three elements, e.g., Mo-Si-B, as well as ceramic and inorganic glass systems composed of three compounds, e.g., NaO-CaO-SiO₂. All of which are interesting from the

industrial point of view. From analysis of the appropriate TPDs, the final microstructure of the material is revealed and certain material/mechanical properties can be assessed. To this end, three-dimensional (3D) phase diagrams with a triangular base are commonly used, placing at the edges of the triangle the three elements comprising the metal alloy. Even so, for the sake of clarity, the TPD is simplified sometimes to a binary phase diagram (BPD) just considering an isoconcentration section of the TPD¹.

Most of the well-known book references commonly used in the teaching of *Materials*

Science and Engineering devote several chapters to this issue²⁻⁵, mainly focusing on BPD of the most used alloys. However, due to the complexity of the analysis of phase changes in ternary alloys, most of the reference books do not include –or just give scarcely– any ideas about such issue²⁻⁵. Thus, students are not able to find any help for solving the *visualization problems*, which they must face when studying TPDs. The spatial visualization is really a serious problem that engineering students must overcome for carrying out tasks as future engineers⁶. In this sense, within the field of chemistry, some teachers have developed a virtual tool (VT) for enhancing the 3D understanding of the CO₂ and H₂O phase diagram⁷. However, although there are some examples of books analyzing TPDs of industrial alloys⁸, it is not easy to find any reference in this field regarding a development of virtual tools for solving the students' visualization problems.

According to previous studies⁹⁻¹³, the spatial visualization skill can be improved by training. So, taking into account the current widespread use of didactic tools for the university teaching and their efficient results¹⁴⁻¹⁷, an *interactive virtual tool* is developed in this paper in order to solve the visualization problems of the students. This VT allows them to develop a better and deeper understanding of the phase

changes of ternary alloys by means of the study and analysis of virtual TPD. To achieve this goal, two different commercial software were used: (i) 3DStudioMax[®], for the 3D modeling of diverse TPD of the most commonly used engineering alloys, and (ii) the software Quest3D[®], for adding interactivity to the previously modeled virtual 3D phase diagrams. Interactivity is a key issue in virtual tools for increasing the students' motivation¹⁸⁻²⁰.

DIDACTIC VIRTUAL TOOL

Two commercial software were used to develop the didactic VT. First, the modeling of the TPD was carried out by means of 3DStudioMax[®] software, to examine the different zones of the phase diagram. This way, a more realistic 3D spatial view can be viewed by changing the point of view or rotating the diagram instead of the common isometric view. However, the general-purpose software 3DstudioMax[®] is not able to be modified by untrained users and, consequently, a more simple user software, such as Quest3D[®], was used for giving an intuitive character and interactivity to the didactic VT. The applications of Quest3D[®] were developed by connecting diverse functional components named "channels". The connection of the "channels" forms a tree structure, which represents the program

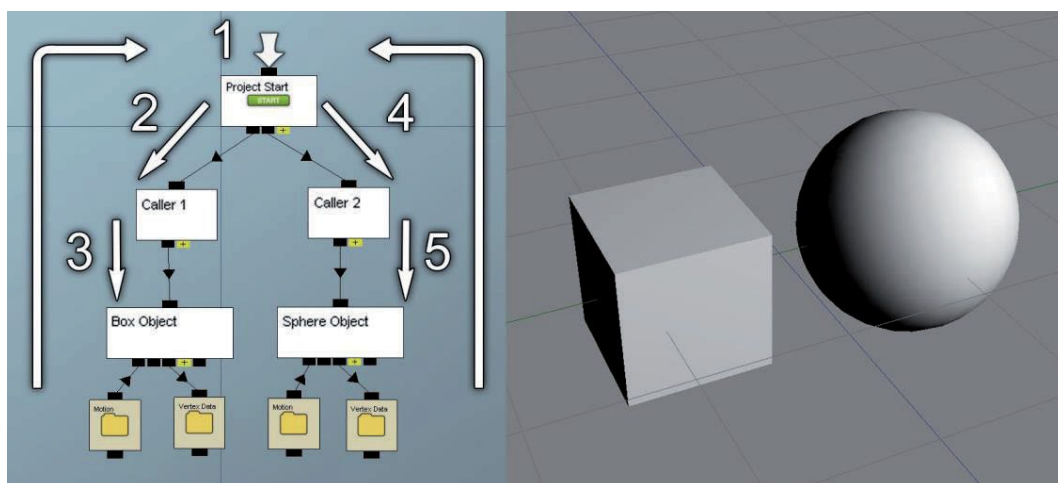


Figure 1. An example for understanding how channels of Quest3D[®] work.

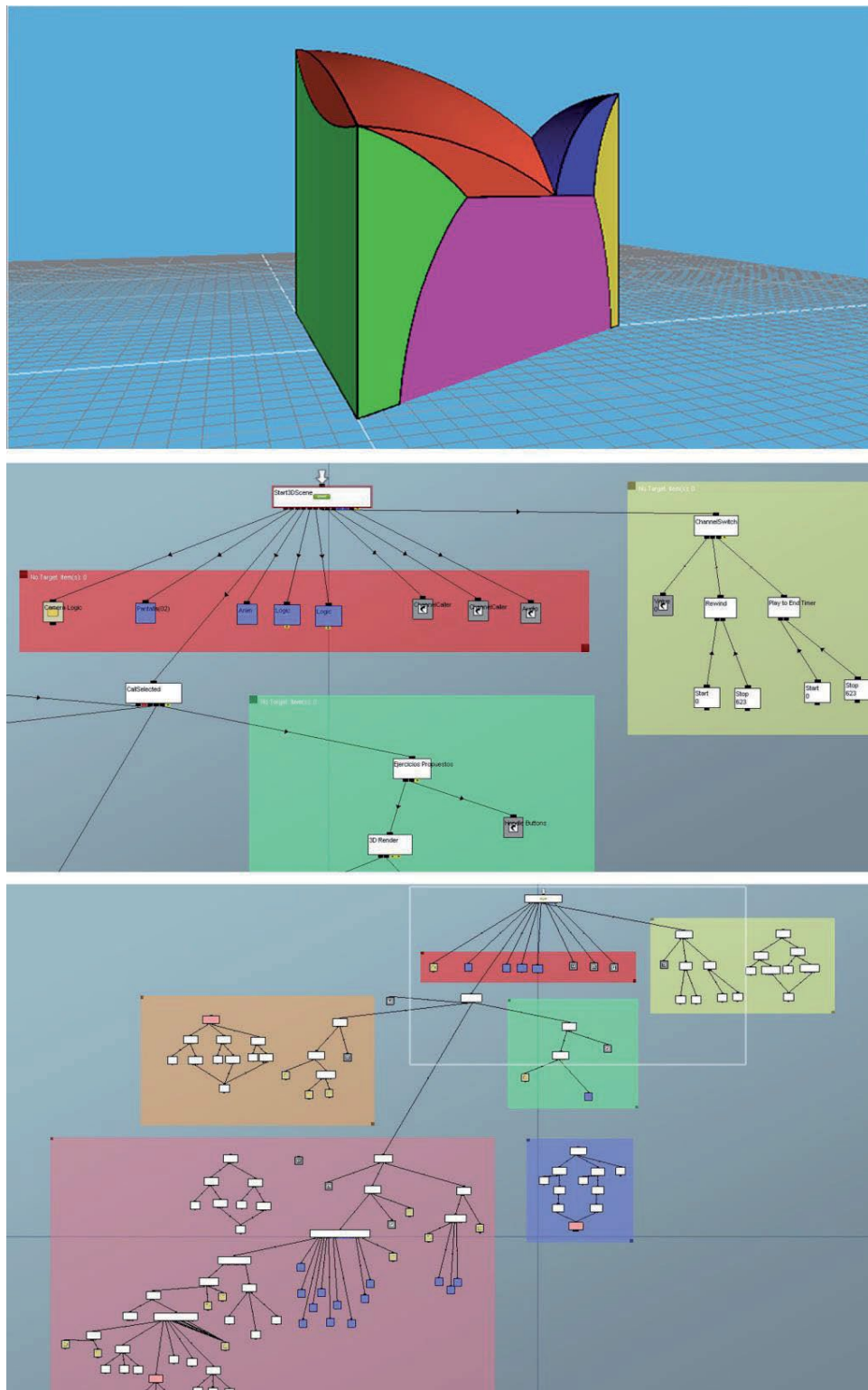


Figure 2. Screenshots of the programming environment of Quest3D® for the TPD VT.

structure. So, in Figure 1 is shown how this tree structure works in one simple example for creating a box and a sphere. Channel callers work from left to right, therefore firstly the “Start Channel” invokes the left channel – Caller 1–. After that, the “Caller 1” channel invokes the hierarchy beneath it –Box Object–, which is a channel of type “3D Object”. This channel displays a box on the screen (frame). After executing the hierarchy on the left hand side, the Start Channel continues with its second child –Caller 2–. So, this channel invokes its child “Sphere Object”, creating the sphere showed on the screen (right hand of Figure 1). When the structure is completely executed, the program begins anew with the “Start Channel”.

Although it is complicated to show a readable image of this process in the TPD VT, the general idea of this tree structure of channels is displayed in Figure 2. The surfaces which compose the 3D TPD were designed with Quest3D[®] as surfaces obtained from non-uniform B-spline curves (NURBS) previously modeled with 3DStudioMax[®]. Later, different colors and textures were linked to each surface allowing an easier identification (visualization) of the diverse TDP fields. In addition, Quest3D[®] allows obtaining an animated exploded view of the TPD in order to visualize the regions in a clearer way. Furthermore, this software combines a graphic engine with a development platform, which nowadays is used in diverse fields, such as product design, architecture, videogames, entertainment software and simulators from imported CAD models. The main characteristic of this software is the programming procedure, which allows – as the authors wished– real time interaction, completely different from the commonly used languages, e.g. C++. However, the advantages of using Quest3D[®] go further, since this software provides two key features: (i) the program code can be modified while the application is executed, making easier the correction of errors during programming, and besides (ii) the ultimate (final) version of the application can be published as an executable file. Consequently, the virtual TPD can be

viewed using any web browser such as *Microsoft Internet Explorer* or *Firefox* by means of an *Active X* control. As an example, Figure 2 shows a TPD modeled with 3DStudioMax[®] where two of the elements of the alloy are fully soluble in the solid state (e.g. field 4 in Figure 3) and both are partially soluble with the third element. This is one of the most typical examples of an hypothetical TPD included in specialized texts^{1,21-22}, despite such a diagram do not corresponds with a real ternary alloy system with industrial interest.

For the sake of clarity, each phase, or phase mixture, e.g. region 5 is comprised of two phases, is identified in the plots of this paper by using arabic numeral notation. Besides, for a better understanding the *liquidus* phase was not included in this 3D TPD model, since such a phase has no industrial relevance. Figure 3b shows another interesting feature of 3DStudioMax[®] from the didactic point of view: the exploded view. This option allows a complete viewing of the phase fields and reveals those fields which are hidden by the outer fields, e.g. the field 6 shown in Figure 3b or the *solidus* and *solvus* lines which obviously are hidden in the assembled view (Figure 3a). The student can disassemble the virtual TPD and explore its geometry as wished. Hidden lines or fields are also visible by using the transparency option (Figure 3c). The VT allows the chance of identifying with a legend each one of the diverse fields which comprise the TPD. So, each color in the TPD corresponds with a solid solution (Greek alphabet letters) or a two-phase –or even three-phase– region^{1,21-22} (Figure 4).

Rotation is another interesting feature of the VT from the didactic point of view since it enhances the students’ self-learning by exploring and observing changes produced in the TPD. So, in the Figure 5 it is shown the virtual TPD from several points of view (rotation angles: 0°, 60° and 160°), corresponding to the angles that allows the visualization of the BPDs forming the TPD. Indeed, a TPD is just a composition of three BPD which are included in the outer faces of

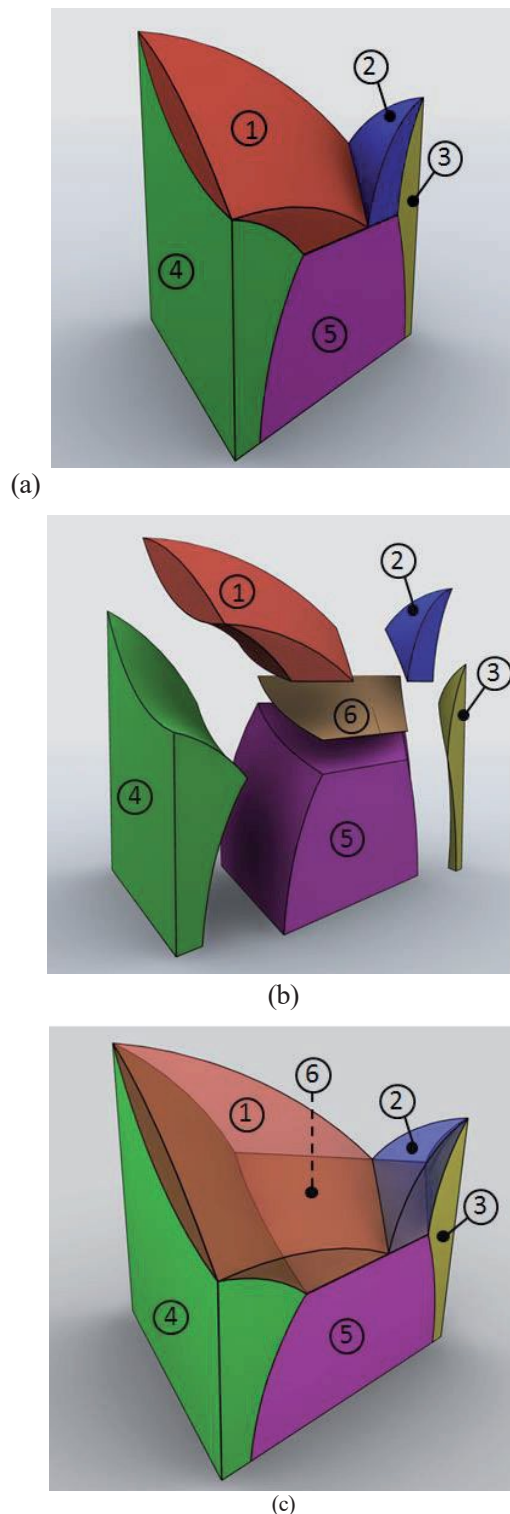


Figure 3. TPD modeled with 3DStudioMax[®]. (a) general view, (b) exploded view, and (c) ternary diagram with the transparency option activated.

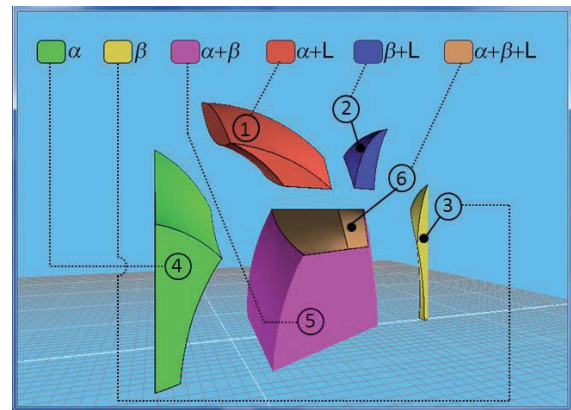


Figure 4. Exploded view including a legend in Quest3D[®] environment

the corresponding sides of the base triangle of the 3D TPD. The authors do not consider it really useful from a pure didactic point of view to include numerical values in the virtual TPD – elemental composition or temperature of a given industrial alloy–. Thus, the analysis of this TPD is completely general and the acquired knowledge is a good starting point for understanding any another industrial alloy used in industry. A common practice for analyzing TPDs is to study isothermal (for a given temperature) sections of the TPD. This way, the isothermal cross section (a simple equilateral triangle plot) reveals the different fields of the TPD. Taking this into account, such a feature was included in the proposed VT (Figure 6). Thus, the student is able to view directly the different isothermal layers of the diagram by means of modifying the temperature on the left side of the screen and observing the resulting cut on the right in real time (Figure 6).

The understanding of the teacher's explanation is enhanced by the direct viewing of the isothermal cuts. This way, Figure 6 shows the three representative isothermal sections of the virtual TPD analyzed in this paper (above maximum eutectic line temperature, at the binary eutectic line and below minimum eutectic line temperature). So, the designed VT is really useful when students must analyze isothermal cross sections of complex TPD. As an example, on one hand an isothermal cross section of the TPD above or below the

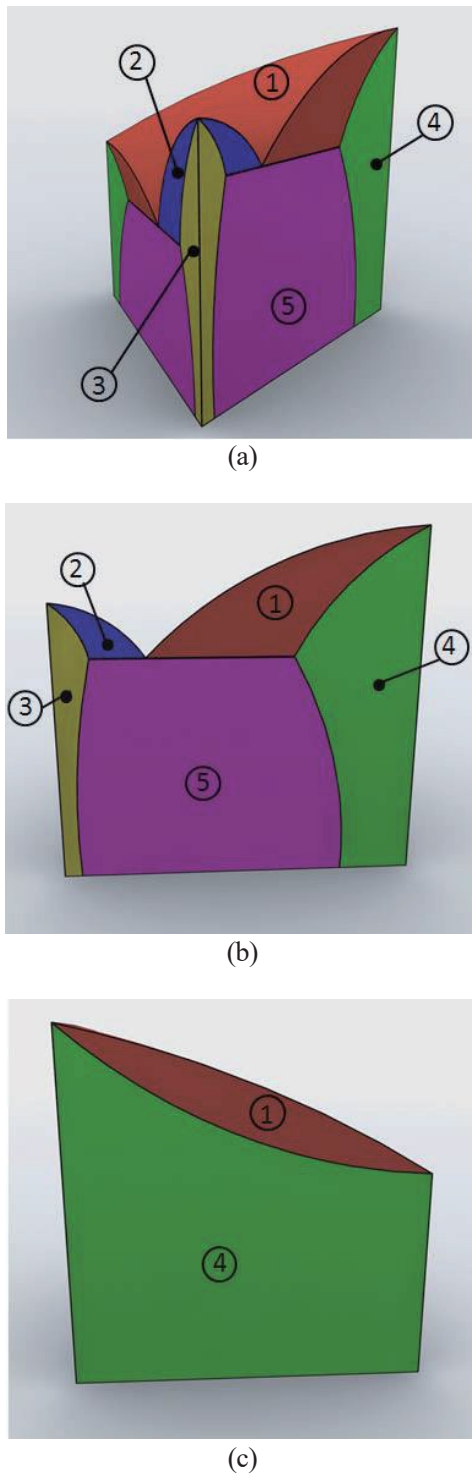


Figure 5. Rotation option applied to the TPD revealing the binary phase diagrams: (a) rotation angle 0° ; (b) rotation angle 60° and (c) rotation angle 160° .

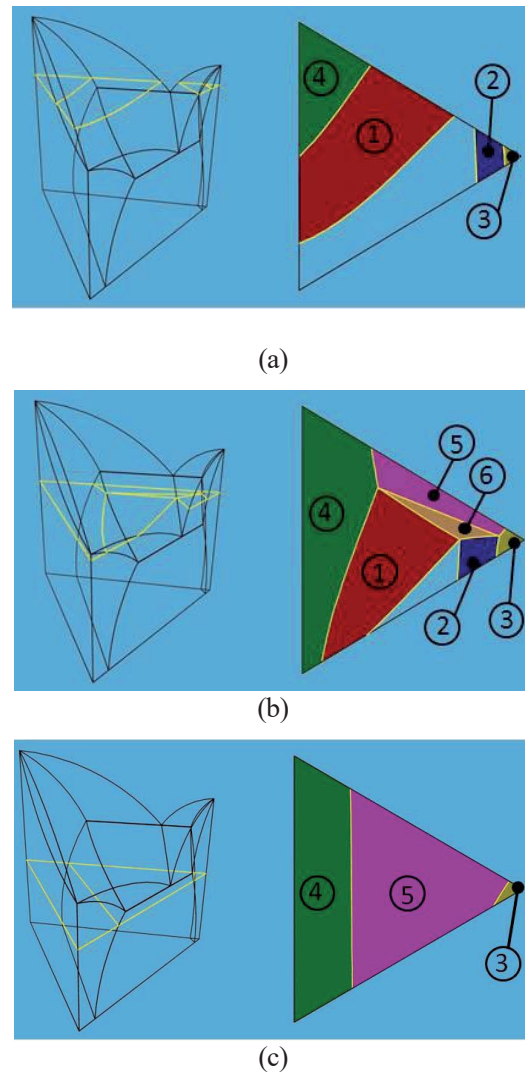


Figure 6. Isothermal sections using colored regions: (a) above maximum eutectic line temperature, (b) at the binary eutectic line, and (c) below minimum eutectic line temperature.

temperature corresponding to the binary eutectic line (Figures 6a and 6c) can be relatively easy to be visualized by students, on the other hand the isothermal cut of the TPD at the binary eutectic temperature is not so easy to be obtained and be understood by students (Figure 6b). So, the VT presented here allows a better understanding by showing the isothermal cut of the TPD for a given temperature, revealing the diverse phases which exhibit the alloy. The different zones of the isothermal cut can be colored (Figure 6) for obtaining a clearer

identification of each phase, thereby increasing the students' understanding.

STUDENTS' OPINION

In order to check the students' opinion in relation to the VT, a survey was carried out to students of diverse engineering degrees at the University of Salamanca: (i) Mechanical Engineering and (ii) Materials Engineering. Eighty students quantitatively rated different features of the presented didactic VT: (i) didactic quality, (ii) interactivity, (iii) ease of use, and (iv) motivation. This last feature of the VT focuses on encouraging students in order to continue using the tool itself. According to obtained results (Table 1 and Figure 7), students highly rated the didactic quality and their motivation when using the VT. Indeed, the low value of standard deviation (Table 1) suggests a low dispersion of the students' answers (from 9 to 10 for the first one feature – didactic quality–, and from 7 to 9 for the second one –motivation–). However, the students rating of interactivity and ease-of-use of the VT is slightly lower. Even so, the standard deviation does not reach a very high value (Table 1). This is due to answers were ranged from 6 to 9 for both cases. In the case of the interactivity, a possible explanation of its lower rating could be the need for constantly keeping updated the virtual resources for gaining the

Table 1. Some examples of survey questions.

QUESTION	ARITHMETIC AVERAGE	STANDARD DEVIATION
Value from 1 to 10 the "Didactic Quality" of the TPDs virtual tool.	9.8	0.42
Value from 1 to 10 the "Interactivity" of the TPDs virtual tool.	7.5	0.88
Value from 1 to 10 the "easiness of use" of the TPDs virtual tool.	7.1	1.03
Value from 1 to 10 the "motivation" generating by the TPDs virtual tool.	8.8	0.51

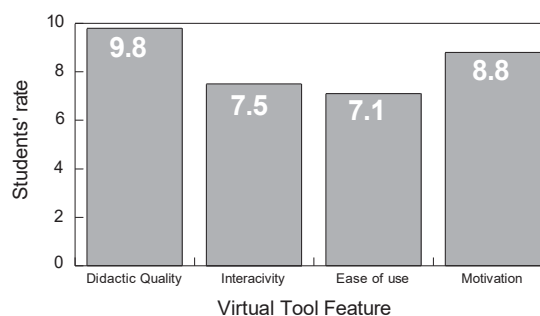


Figure 7. Students' valuation of the didactic virtual tool.

students' attention²³. The students are accustomed to using the most modern (and continuously upgraded) interactive applications not only for didactic purposes, such as virtual laboratories²⁴⁻²⁷, but also for entertainment, such as videogames.

Even so, the use of the TPD VT in the classroom revealed two key issues in the students' learning process: (i) the students' questions during the class was notably reduced –probably due to the improvement of the spatial visualization of the TPD by using the VT, which allows a better understanding of TPD–; (ii) the key concepts were readily assimilated by students, as the answers to the final exam questions revealed; and (iii) students quickly understand the key TPD concepts due to the awakened interest in this topic when students use the VT.

Furthermore, students answered different questions related to the teaching methodology by use of the didactic VT described (Figure 8). On one hand, it seems that students consider this virtual application to be a very useful tool for learning TPD. Results reveal that students

consider that the use of this VT requires a previous master class where the key concepts of TPD theory were covered (Figure 8a) in order to achieve a deep and effective understanding. On the other hand, students' opinion shows that the presented VT helps to solve the spatial visualization difficulties in the TPD comprehension (Figure 8b).

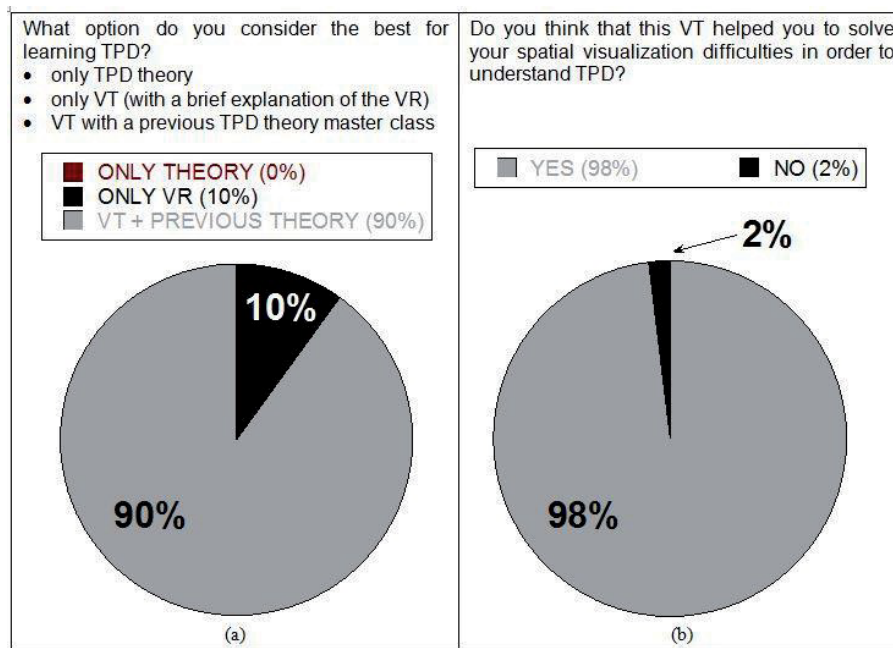


Figure 8. Students' answers with regard to: (a) the best methodology for learning TPD; (b) spatial visualization improvements by using the proposed VT.

CONCLUSIONS

Students' spatial visualization problems, such as the ones found in the learning of ternary phase diagrams, can be effectively solved by using virtual tools. The benefits of using an innovative virtual tool for leaning ternary phase diagrams in engineering degrees were shown in this paper. According to the students' opinion, the proposed virtual application allows students to overcome their spatial visualization difficulties, thereby improving the understanding of the phase transformations which are produced during cooling in a complex ternary alloy. Also, the use of diverse options of the virtual tool (e.g. exploded view, rotate view, transparency, change of field colors, and so on) allows students a deeper understanding through a real time interaction with a ternary phase diagram. Thus, the spatial visualization problems associated with analyzing complex 3D shapes are practically removed by means of a self-learning process. However, according to the students' opinion, the use of virtual tools –as the one presented

here– do not substitute but complement the master class where the key concepts about the ternary phase diagrams are discussed. Taking into account the constantly updating of virtual resources, students considered that an upgrade of the proposed virtual tool (with more modern interactivity options) should be necessary in the near future in order to maintain the same interest and motivation in the student body.

REFERENCES

1. D.R.F. West, *Ternary Phase Diagrams*, Chapman & Hall, New York, 1982.
2. M.F. Ashby and D.R.H. Jones, *Engineering Materials 2*, Butterworth Heinemann, Oxford, 1999.
3. J.F. Shackelford, *Introduction to Materials Science for Engineers*, Prentice Hall, New York, 2005.
4. W.F. Smith and J. Hashemi, *Foundations of Materials Science and Engineering*, Mc Graw Hill, Boston, 2006.

5. D.R. Askeland, P.P. Fulay and W.J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, Cengage Learning, Stamford, 2011.
6. S. His, M.C. Linn and J.E. Bell, *J. Eng. Educ.* 86, 151 (1997).
7. A. Herráez, R.M. Hanson and L. Glasser, *J. Chem. Educ. Lett.* 86, 566 (2009).
8. Y.-M. Chang, D.P. Birnie and W.D. Kingery, *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
9. S.W. Crown, *J. Eng. Educ.* 90, 347 (2001).
10. C. Leopold, R.A. Górska and S.A. Sorby, *J. Geom. Graphics* 5, 81 (2001).
11. M. Alias, T. Black and D. Gray, *Int. Educ. J.* 3, 1 (2002).
12. A. Rafi, K.A. Samsudin and A. Ismail, *Educ. Tech. Soc.* 9, 149 (2006).
13. G. Prieto and A. Velasco, *Quality & Quantity* 44, 1015 (2010).
14. R. Tori, R. Nakamura, F.L.S. Nunes, J.L. Bernardes, M.A.G.V. Ferreira and E. Ranzini, *SBC J. 3D Interact. Syst.* 2, 94 (2011).
15. J. Monge and V.H. Monge, *Revista Educación* 31, 91 (2007).
16. D. Vergara and M.P. Rubio, *J. Mater. Educ.* 34, 175 (2012).
17. M.S. Castro, M.M. Reboredo and M.A. Fanovich, *J. Mater. Educ.* 36, 1 (2014).
18. P. J. Goodhew, *J. Mater. Educ.* 24, 39 (2002).
19. B. Balamuralithara and P.C. Woods, *Comput. Appl. Eng. Educ.* 17, 108 (2009).
20. D. Vergara, M.P. Rubio, and M. Lorenzo, *IEEE Tech. Eng. Educ.* 7, 44 (2012).
21. F.N. Rhines, *Phase Diagrams in Metallurgy: Their Development and Application*, McGraw-Hill, New York, 1956.
22. <http://www1.asminternational.org/asmenterprise/apd/help/intro.aspx>
23. D. Vergara, M. Lorenzo, and M.P. Rubio, *Virtual Environments in Materials Science and Engineering: the Students' Opinion*, Chapter in *Recent Developments in Materials Science and Corrosion Engineering Education*, ed. H.L. Lim, IGI Global Publishers, 2015 (in press).
24. L.A. Dobrzański and R. Honysz, *J. Mater. Educ.* 31, 131 (2009).
25. S.P. Brophy, A.J. Magana and A. Strachan, *Adv. Eng. Educ.* 3, 1 (2013).
26. Z. Tatli and A. Ayas, *Educ. Tech. Soc.* 16, 159 (2013).
27. D. Vergara, M.P. Rubio and M. Lorenzo, *Key Eng. Mater.* 572, 582 (2014).

This page intentionally left blank

*3.4. The application of didactic virtual tools in the
instruction of industrial radiography*

THE APPLICATION OF DIDACTIC VIRTUAL TOOLS IN THE INSTRUCTION OF INDUSTRIAL RADIOGRAPHY

D. Vergara ¹ and M.P. Rubio ²

¹ Technological Department, Catholic University of Avila, Spain; dvergara@ual.es

² EPS de Zamora, Campus Viriato, Universidad de Salamanca. Avda. Requejo 33, 49019 Zamora, Spain; mprc@usal.es

ABSTRACT

In this article an interactive virtual platform (IVP) is introduced to be used in the instruction of industrial radiography. The design of this virtual tool is the result of a collaborative process between teachers and students and, therefore, this X-ray IVP includes the characteristics that both groups demand. Students' opinion reflected in several surveys guarantee that this IVP is an educational and motivating virtual resource. Furthermore, the students' opinion about several fundamental characteristics of virtual didactic tools is also included in this article, namely: (i) realism, (ii) interactivity, (iii) ease of use, (iv) real time, (v) motivation and (vi) didactic quality.

Keywords: *virtual didactic tool; industrial radiography; virtual laboratory; welding defects.*

INTRODUCTION

Industrial radiography is a non-destructive testing technique that is used in the evaluation of pieces due to the fact that it facilitates the detection of possible faults or imperfections in their interior¹. This type of test is based on electromagnetic radiations (X-rays or γ -rays), which are capable of penetrating any material because of the shortness of their wavelength². One of the most common uses of this technique in the industrial sector it is the evaluation of moulded parts and welded connections³.

In spite of the professional importance of industrial radiography, there are no books at the

university teaching level that deal this topic with the relevancy which it deserves. Specifically missing are examples/illustrations indicating the radiographic aspect of the most common typologies of welding defects, as well as providing exercises to reinforce the knowledge in this area, etc. In fact, there are more and more websites –the only advisable bibliography nowadays for engineering students– where the authors explain the implication of industrial radiography in the evaluation of welds in a didactic environment^{4,5}. Some teachers are, however, applying innovative educational methodologies to foster an active educational program in industrial radiography⁶.

On the other hand, due to the possible problems of radiation that the use of this type of machinery in real life entails, practical classes of this topic usually cannot be taught in a technical school, remaining restricted to theoretical classes. In fact, the practical teaching of industrial radiology in an engineering school presents serious administrative disadvantages due to the regulation and the laws involved in the use of radiological devices. A possible solution would be to resort to a virtual environment that would help to show this practical part to the students, but nowadays there is no commercial didactic tool to solve this problem and neither is there any evidence of teachers who have designed a virtual application with an educational purpose in this area.

Therefore, in order to overcome this lack, a virtual laboratory is described in this article where the student can do an X-ray photograph of a weldment in an interactive way and, in addition, the student can also solve a collection of virtual exercises to assess his/her knowledge about the welding faults found in X-rays of weldments. The basic aim of the virtual resource presented in this article is purely didactic and it will be used for students to (i) assimilate the functioning of an X-ray machine and, (ii) solve a series of virtual exercises that reinforce their knowledge of the detection of the typical welding discontinuities.

VIRTUAL PLATFORM

The virtual didactic tools that allow the student to interact freely with them, favour a process not only of self-learning but also of social interaction with his/her classmates⁷. Thus, these simulations not only assure a better comprehension of the functioning of the machines used in the practices of different subjects of engineering but in addition they guarantee a productive type of learning, i.e., they develop the habit of thinking, of reasoning and relating or of explaining the information⁶. On the other hand, it is necessary to bear in mind that, according to previous studies⁸, engineering students prefer using specific programs developed for a specific subject instead of generic commercial applications. Keeping this in mind, the authors of this article have designed an Interactive Virtual Platform (IVP) that simulates the functioning of an X8008 model industrial radiology machine of the company Viscom AG Vision Technology (Figure 1). In this regard, the IVP tool can turn out to be very useful in various technical qualifications applications where the detection of faults by means of industrial radiography, mainly in moulded or welded pieces, is part of the instructional agenda, e.g., Industrial Engineering, Civil Engineering, Building Engineering, Materials Engineering, etc.).



Figure 1. IVP designed by authors..

Quest3D[®] and 3D Studio Max[®] environments were used to design this tool. The joint use of both programs helps the virtual designed tool to be three-dimensional (3D), interactive, very realistic, easy to use, pleasant and motivating, with real time movements and, in addition, it allows implementation of a didactic complement to reinforce the knowledge of the topic of study. With the 3D Studio Max[®] program the three-dimensional surroundings of the laboratory, the furniture and the X-ray machine were modeled, assigning different materials to each and creating the appropriate lighting. All these aspects were achieved looking for the major degree of realism for an application in real time. Later, the models obtained were exported to Quest3D[®], which includes a graphical engine in time of execution and a system of visual programming orientated to objects. In this program, both the interactivity of movement through the scene (virtual laboratory) and the interaction with the elements mentioned were incorporated. This program uses the Direct X technology that is easily accessible to any user, since he/she only needs a graphical card with the technology mentioned above. Quest 3D[®] presents several advantages over other programs that purport to implement visual interactive components⁹:

- Speed of integrating or suppressing elements in the model,

- Simplicity at the moment of defining the flow of work,
- Flexibility to change the geometry and characteristics of the components in the model,
- 3D visual integration with the ability to import and export entities of other sources,
- Accessibility for any educational entity by means of academic licenses,
- The programming is based on the philosophy of WYSIWYG (What You See Is What You Get), i.e., results are seen directly in the program without need to render or to export the application in order to verify if the programming was done correctly.

All these aspects are what favoured the decision of the authors of the present work to use this environment to design the IVP of industrial radiography.

It is convenient to specify that the virtual tool presented in this article has undergone an evolution with time¹⁰, from the first version up to the current one in which the aspects of improvement that the pupils demanded as they used it have been included. This way, the IVP of X-rays presents some really interesting properties from the educational point of view¹¹: (i) realism, (ii) interactivity, (iii) ease of use, (iv) real time, (v) motivation and (vi) didactic quality.



Figure 2. Environment of the simulated laboratory.



Figure 3. Testing materials: (a) real part, (b) 3D scanned parts.



Figure 4. X-ray obtained in the IVP.

The realism of the virtual environments is an aspect that awakes a great interest in students¹², mainly when these are created in three dimensions. In this regard, the X-ray IVP that is analyzed –developed in 3D– bears in mind several aspects:

- The X-ray machine itself (Figure 1),
- The virtual environment of the laboratory itself, including even the exterior environment to this one that shows a virtual simulation of the campus itself (Figure 2),
- The test materials, which were obtained by the use of a 3D scanner applied to a real weldment (Figure 3),
- The virtual X-rays obtained in the IVP, which were digitized from real X-ray photographs (Figure 4).

The environment applied in this IVP is similar to the one employed in videogames known as the "shooter", in which the user visualizes the environment in the first position and, from this perspective, the environment provides *per se* a major degree of realism. In addition, the simulation of the functioning of the virtual machine up to obtaining the X-ray of a piece was assured in the most real way as possible, following the same steps that must be taken in the reality and including aspects that identified

the real world, e.g., the sound of the machine running, of the turning on and off of the virtual computer, etc.

On the other hand, the property of interactivity is one of the most valued for an IVP¹²⁻¹⁶. This property assumes that the student perceives the virtual didactic tool as a video game, since both use very similar software. The main aim of this characteristic is to make the study turn out to be much more pleasant and attractive to the student body. The present industrial radiography IVP has been designed in order to allow the users to interact freely with it, manipulating it with the mouse of the computer and certain keys of the keyboard (see controls in Figures 1-4). As a result, the student can freely move through the virtual laboratory of this IVP, being positioned in any point of the three-dimensional space and being able to visualize the environment from any point of view and perspective.

Inside the area of virtual tools, teachers always look and try to make the virtual interface as intuitive as possible¹⁷. Thus, in order to design a really easy to use IVP it is suitable to do tests with the student body before obtaining the final version. In this regard, considering the indications of the students who previously used versions of this X-ray IVP, the current version includes the following changes in order to make its use be easier and more intuitive to the user:

- Direct placement of the piece to be analyzed in the X-ray machine,
- Presentation on the virtual computer screen of an as close to real as possible X-ray (Figure 4),
- Presentation of a simple, clear and detailed key of movements (see controls in Figures 1-4).

With regard to the importance of interacting in real time, it is necessary to bear in mind that the current community demands a rapid and immediate response in any device. In fact, the most demanded video games are those that provide an immediate response to an action¹⁸ – feedback– and, on the contrary, those that do

not do it become obsolete. Keeping this in mind, this IVP of industrial radiography is based on creating an environment similar to those of first-person shooter video games, achieving in this way that the movements take place in real time. First-person shooters and third-person shooters are different types of 3D shooter game¹⁹. The first one features a first-person point of view with which the player sees the action through the eyes of the player character. In the case of third-person shooters the player can see the character he is controlling. These games developed in a 3D environment tend to be somewhat more realistic than 2D shooter games²⁰. The similarity of didactic IVPs with this type of video games (3D shooter) helps to give a sensation of modernity in the virtual tool, which manages to awake the curiosity in the student so he/she continues investigating the use of this educational technology (reinforcing in this way the didactic content of the platform).

The motivation that the IVP awakes in the students is actually a consequence of the previously analyzed properties, since it depends directly on them. Though it is clear that an educational technology is not a video game, many students compared this IVP with one of them (surely due to the type of environment which it has been designed in and the possibilities of movements and applications it presents). This fact can enhance the motivation of the students and, therefore, attract them towards the study of industrial radiography. Although there are lots of examples of virtual environments designed in 2D, which are applied, in engineering qualifications²¹⁻²⁷, the current trend is focusing towards designing in 3D^{7,11-12}. In spite of the importance that virtual three-dimensional laboratories have because they imply a major realism that favours the motivation of the student¹², the authors have still not found any didactic application based on a "3D shooter" environment for industrial radiography teaching. This 3D environments typology, besides motivating the student to bring him/her closer to a virtual world similar to the one of a video game, manages to transmit some didactic knowledge to the student. Therefore, this IVP supposes a new approach of the educational technology applied in the university teaching.

The virtual environments applied in the educational sector can enrich the processes of education learning if they present a good didactic quality. In this regard, the student body that used the first versions of this IVP demanded a collection of virtual exercises to complete and to improve the educational application of the tool¹⁰. Taking students' comments into consideration, an access to virtual documents with the basic theory of the industrial radiography was included in the IVP (Figure 5). These documents are available at all time in order to enable a better understanding of the study subject. Besides, several test versions of a new educational application were also created and were included in the virtual environment of the IVP. All of them were tested and examined by the students before obtaining the final version here presented. The purpose of this educational complement is to help the student body to recognize the typical welding discontinuities (Figure 6) and, in addition, to turn it out to be easy and intuitive to handle. Consequently, a collection of exercises has been included in the virtual computer of the

IVP. They are based on clarifying the typologies of discontinuities that certain real X-rays of weldments present, e.g. excessive penetration, root concavity, incompletely filled groove, external and internal undercut, linear misalignment, cracks, lack of side fusion, inclusions, porosity, etc. From these exercises with virtual X-rays the teacher can ask the student to identify the type/s of defect/s that the welded piece has, to comment the possible errors of execution of the welded piece, etc., i.e., the teacher can raise different questions related to industrial radiography so that the students develop the concepts learned during the previous theoretical classes. This fact implies using a more active methodology than the traditional lecture class. Later the student can gain access to the solution, which is also implemented in this educational virtual complement. Even so, it is convenient to make clear to students that in real life there are already automated processes for the digital analysis of the welding discontinuities and defects, which are even more effective than the human recognition²⁸⁻³⁰.

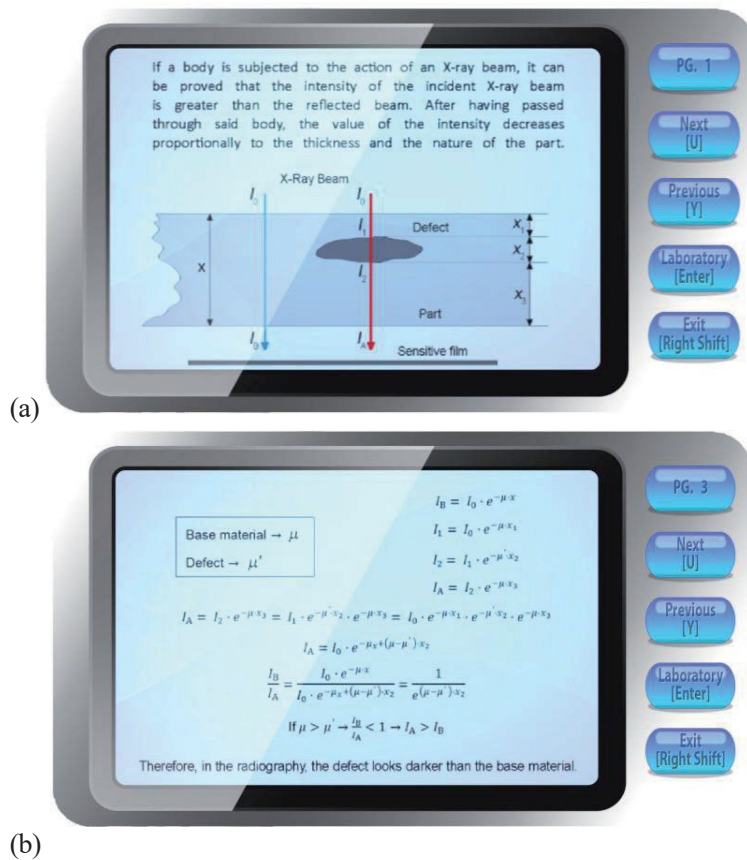


Figure 5. Some examples of basic theory accessible from the IVP:

(a) Page 1 in the IVP;

(b) Page 3 in the IVP.

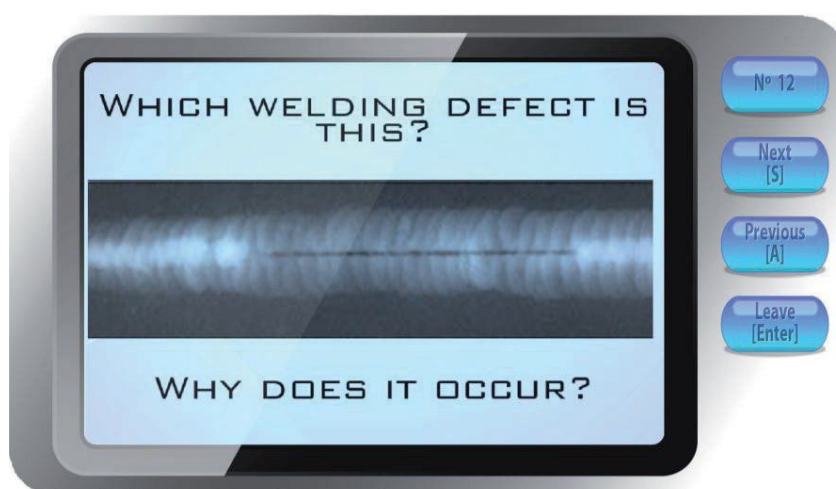


Figure 6. Educational complement.

STUDENTS' OPINIONS

The valuations of the properties of the present IVP that are shown in both Table 1 and Figure 7 correspond to the arithmetic mean of the answers given by eighty students belonging to different engineering qualifications (civil engineering and industrial engineering). The six properties have been really well valued for this didactic tool, making it possible to affirm that the IVP presents a propitious design to be applied in the classroom. Even so, considering the statistical dispersion measures, the first four properties –(i) realism, (ii) interactivity, (iii) ease of use and (iv) real time– have a low standard deviation that never exceeds the value of 0.5 points, which indicates that the opinion of the students is very similar regarding these four properties of the IVP. In fact, the students' valuation ranges from 9 to 10 in all cases. On the contrary, regarding the last two properties – (v) motivation and (vi) didactic quality– the standard deviation is around 1.0. This indicates that, in spite of such a high average, the opinion of the students differs some more in these cases. Some of them are completely sure of the fact that this IVP motivates the study of the industrial radiography and others, though giving a high valuation, are not so sure. Even so, the range of values fluctuates between 7 and

10 points, i.e. the general valuation of students is really high for both properties of the IVP, not only for the didactic quality but also for the level of motivation of the students in order to continue using the IVP.

There is doubt cast on the effectiveness of using this type of technology in education, but seeing the average value and the range of values obtained in students' surveys (Figure 7) this query remains absolutely rejected. On the other hand, since there is a standard deviation of 1.0 in the valuation of the didactic quality (Table 1), an extension of the educational complement could be necessary. According to the suggestions of the student body, several examples of each one of the typologies of welding fault should be included and placed in a random way in the educational complement of the IVP, reinforcing in this way the process of memorization. Students can enhance their knowledge of industrial radiography even more if the IVP provides more than one example of each welding fault. The authors consider that these measurements should be appropriate to improve the last two properties of the IVP – motivation and didactic quality– and, consequently, to enhance the students' opinion about them.

Table 1. Some examples of survey questions.

QUESTION	ARITHMETIC AVERAGE	STANDARD DEVIATION
Value from 1 to 10 the property "realism" of the IVP.	9.8	0.36
Value from 1 to 10 the property "interactivity" of the IVP.	9.7	0.43
Value from 1 to 10 the property "ease of use" of the IVP.	9.3	0.50
Value from 1 to 10 the property "real time" of the IVP.	9.8	0.39
Value from 1 to 10 the property "motivation" of the IVP.	9.0	1.05
Value from 1 to 10 the "didactic quality" of the IVP.	9.4	0.98

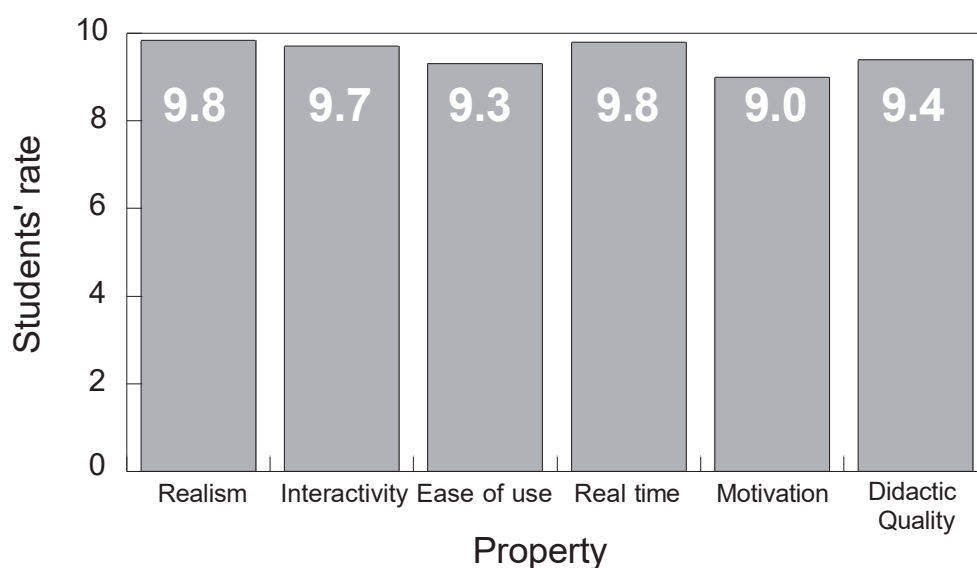


Figure 7. Students' valuation of the IVP.

Another change demanded by the students is that the IVP is left on the network so it could be available at any time. In the face of this demand, the authors are working in this direction to create a web page to hang the IVP of X-rays but its implementation in the network presents several disadvantages due to the application with which it has been created, Quest3D[®]. In the first place, only one file of great size is created, which is very useful to install from a CD or pen drive but very difficult to manage to use from Internet. Of secondary importance is that if the file is left on the network any user could download and make an undue use of it, without taking in consideration

the corresponding copyright. The solution to these two problems is to use another programming environment (different from Quest3D[®]) that is focused on the web, which optimizes both the transmission of information and the size of the files and, particularly, it allows users to handle it only when they are connected. To this end, there are several options: (i) programming everything in Java, though it is very complicated and nowadays it is not very optimized for 3D graphs; (ii) using other environments as Unity3D[®], that manages these graphs very well and, in addition, allows their use from other fixed or mobile systems (Android, Apple, Windows, etc.). Bearing these

possibilities in mind, the authors expect to make this tool operative in the web in a future, but for the moment they have hung a short video-demonstration on a YouTube link³¹, where readers of this paper may appreciate the didactic potential of this tool.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

According to previous studies^{21,32}, the use of virtual environments enhances development of professional skills. Even so, the important thing is not actually the use of this type of educational technology, but how these are designed and how the teacher applies them in the classroom to fully exploit their educational potential. In this sense it is very important to design the virtual didactic tool as a collaborative process between teacher and students. Following this principle, the IVP presented in this article has undergone several updates from its first version up to the current design, which also includes an educational complement in order to learn the typologies of discontinuities and defects that weldments present. To reach the current IVP, the opinion of the student body was really essential in order to design and to improve this virtual didactic tool for the teaching of industrial radiography.

This IVP facilitates the educational focus and besides, since it allows a free interaction with it, students enrolled in technical degrees can understand the functioning of industrial X-ray equipment better than in case of traditional lecture classes. In addition, this virtual tool overcomes the disadvantage of not being able to teach a practical class in this subject, due to the problems of radiation and the legal regulation that restricts use of this type of machinery. On the other hand, it is important to clarify that the X-rays obtained by means of this IVP do not correspond with the actual X-rayed virtual piece (this is impossible according to the principles of industrial radiology and would suppose an important scientific revolution). Even so, these virtual X-rays are copied from real X-rays and, at a didactic level, they make it

possible for students to identify and understand the different types of welding defects that exist.

Students' opinion reflected by the surveys guarantee that a suitable degree of design of this didactic X-ray IVP has been reached and, in this way, its application in the classroom is really useful. Therefore, as a final conclusion, the authors want to emphasize that the process of designing this type of virtual educational technology is an evolutionary process in which the weaknesses detected and identified by the student body are constantly modified and updated (collaborative process between teachers and students). The authors consider that this example of application of IVP in industrial radiography can be an inspiration to other professors in order to apply didactic virtual tools in his/her subjects.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors wish to express their gratitude to the engineers M. Zurro and F. Prieto for their contribution in the development of the virtual tool.

REFERENCES

1. M.K. Felisberto, T.M. Centeno, L.V.R. Arruda, and H.S. Lopes, 10th SEM International Congress on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa (CA), USA, 2004.
2. J. Lang, and A. Middleton, Radiography of cultural material, Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2005.
3. N. Nacereddine, and M. Tridi, Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Zagreb, Croatia, 2005, pp. 88.
4. <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>

5. <http://gafoorxspeed.com/industrial-radiography1.html>
6. D. Vergara, and M.P. Rubio, *J. Mater. Ed.* **34**, 175 (2012).
7. A.C. da Silva, and N. Felix, *Educação Gráfica* **15**, 7 (2011).
8. R. Barrio, J. Parrondo, E. Blanco, and J. Fernández, *Revista de Formación e Innovación Educativa Universitaria*, **4**, 55 (2011).
9. R. Pérez, S. Jöns, A. Hernández, and D. Young, *Conciencia Tecnológica*, **41**, 28 (2011).
10. D. Vergara, M.P. Rubio, and F. Prieto, *Revista Iberoamericana de Educación en Tecnología y Tecnología en Educación*, **11**, 76 (2013).
11. D. Vergara, M. Lorenzo, and M.P. Rubio, *Virtual environments in materials science and engineering: the students' opinion*, Chapter in *Recent Developments in Materials Science and Corrosion Engineering Education*, ed. H.L. Lim, IGI Global Publishers, (in press).
12. B. Balamuralithara, and P.C. Woods, *Comput. Appl. Eng. Ed.* **17**, 108 (2009).
13. R. Tori, R. Nakamura, F.L.S. Nunes, J.L. Bernardes, M.A.G.V. Ferreira, and E. Ranzini, *SBC J. 3D Interact. Syst.* **2**, 94 (2011).
14. L. Barreto, A. Vilaça, and C. Viana, *IEEE Multidiscip. Eng. Ed. Mag.* **4**, 13 (2011).
15. D. Vergara, M.P. Rubio, and M. Lorenzo, *IEEE Tech. Eng. Ed. (ITEE)* **7**, 44 (2012).
16. D. Vergara, M.P. Rubio, and M. Lorenzo, *Key Eng. Mater.* **572**, 582 (2014).
17. Ö. Karagöz, and N. Özdener, *Bulgarian J. Sci. Ed. Policy* **4**, 216 (2010).
18. M. de Aguilera, and A. Méndiz, *ACM Comp. in Entertainment* **1**, 1 (2003).
19. A. Rollings, and E. Adams, *Fundamentals of Game Design*, Ed. Pearson Prentice Hall, 2007.
20. R. Rouse, *Game design: Theory and practice*, Second edition, Ed. Jones & Bartlett Learning, 2010.
21. D. Shin, E.S. Yoon, S.J. Park, and E.S. Lee, *Comp. Chem. Eng.* **24**, 1381 (2000).
22. F.A. Candelas, S.T. Puente, F. Torres, F.G. Ortiz, P. Gil, and J. Pomares, *Int. J. Eng. Ed.* **19**, 363 (2003).
23. P. Bhargava, J. Antonakakis, C. Cunningham, and A.T. Zehnder, *Comput. Appl. Eng. Ed.* **14**, 1 (2006).
24. I.E. Chika, D. Azzi, J. Stocker, and B.P. Haynes, *IEEE Multidisciplinary Eng. Educ. Mag.* **3**, 112 (2008).
25. C. Chan, and W. Fok, *Eng. Ed.* **4**, 70 (2009).
26. L.A. Dobrzański, and R. Honysz, *J. Mater. Ed.* **31**, 131 (2009).
27. L.A. Dobrzański, and R. Honysz, *J. Achievements Mater. Manuf. Eng.* **42**, 196 (2010).
28. N. Nacereddine, M. Zelmat, S.S. Belaïfa, and M. Tridi, *Eng. Tech.* **2**, 145 (2005).
29. B. Mhamed, S. Abid, and F. Fnaiech, *Adv. Signal Process.* **1**, 1 (2012).
30. V.R. Rathod, R.S. Anand, and A. Ashok, *Nondestruct. Test. Eva.* **27**, 305 (2012).
31. <http://youtu.be/YXeo-6nE8t4>
32. E. Martínez, V. Carbonell, M. Flórez, and J. Amaya, *Comput. Appl. Eng. Ed.* **18**, 757 (2010).

*3.5. Active methodologies through interdisciplinary
teaching links: industrial radiography and technical drawing*

ACTIVE METHODOLOGIES THROUGH INTERDISCIPLINARY TEACHING LINKS: INDUSTRIAL RADIOGRAPHY AND TECHNICAL DRAWING

D. Vergara and M.P. Rubio

EPS de Zamora, Campus Viriato, Universidad de Salamanca. Avda. Requejo 33, 49019 Zamora, Spain; dvergara@usal.es ; mprc@usal.es

ABSTRACT

Industrial radiology is widely used in the inspection of cast parts and welds, primarily to identify potentially critical defects, such as internal fissures or cracks. This encourages Industrial Engineering students to perceive radiology as a subject with direct applications in their future professional life, which arouses greater interest than other topics related to Materials Science. Although the often limited amount of class time devoted to industrial radiology may present some difficulties, what really is a problem for the teacher is the spatial visualization from radiographs of industrial parts that present internal defects, mainly because students should imagine three-dimensional pieces that are captured in two-dimensional radiographs. To solve this problem the authors of this article have designed two types of exercises based on simulation of radiographs of parts with internal imperfections, so that students with difficulties of spatial visualization can exercise this capacity.

Keywords: *Active methodologies; Interdisciplinary links; Industrial radiology, Technical drawing, Spatial visualization.*

1. INTRODUCTION

Industrial radiography is a non-destructive testing technique that allows detection and identification of internal faults or imperfections that a mechanical part can have¹. Conventional radiographic techniques are based on X-rays or y-rays, which are types of electro-magnetic radiation capable of penetrating any material because of the shortness of the wavelength (.)². It can be assumed that both radiography and ultrasonic inspection are the two most used at

the industrial level for the non-destructive testing (NDT) of technical parts.

Despite the practical relevance of the subject under consideration in this article (industrial radiology), there are very few books focused on university teaching, which include some explanation of how these methods are used in the field of Materials Science and Engineering. The vast majority of books do not even treat NDT, in some cases focusing on issues of little practical relevance to industrial applications of

defect detection in engineering³. Even books within the sphere of teaching the subject of detection of defects in parts by industrial radiology⁴⁻⁷ do so in a superficial way, and they rarely propose problems, or exercises and practical case studies to students.

That is why in this article two different types of exercises are discussed, which can be developed for implementation in classes related to industrial radiology. The approach of the exercises aims to (i) make learning industrial radiology more enjoyable and (ii) resolve problems related to three-dimensional visualization of industrial parts that many students have⁸⁻¹⁰, which prevents them from understanding the concepts of industrial radiography. Spatial visualization is defined as the ability to manipulate viewing of complex shapes mentally, and it is an aspect that may hinder the instruction¹¹⁻¹⁵ about defect detection if not properly developed. Therefore, with the different exercises set out in this article, interdisciplinary links of radiology with technical drawing are established in order to try to solve this problem in industrial radiography explanations.

To be able to fully assimilate this part of the syllabus of NDT within the overall role of characterization in Materials Science, students have to relate the basic concepts of industrial radiology (characteristics and properties of materials, types of imperfections, etc.) with the geometry and dimensions of the parts analyzed. This implies a clear link between two disciplines: materials science and technical drawing. Earlier publications have emphasized the importance of spatial visualization capability in the future professional life of an architect or an engineer¹⁶. Therefore, part of the work of the authors of this article has been focused on improving engineering students' spatial visualization from examples of active methodologies applied in subjects not related to technical drawing (e.g. ternary phase diagrams¹⁵, engineering mechanics¹⁷), which illustrate that spatial visualization can be improved by training¹⁸⁻²².

Active learning refers to a method of learning that encourages student participation in the learning process through meaningful teaching activities²³⁻²⁴ (contributing students to think about they are doing). According to previous studies²⁵, this method allows students to get a better understanding of difficult concepts and let them retain the knowledge acquired for a long period of time. As has already been published in certain educational studies: "The secret of teaching is not just to transmit knowledge forward, it is to transmit eagerness, especially to those who do not have it²⁶", and "Teachers play an influential role in increasing students' situational interest in the active-learning classroom²⁷". Consequently, the aim sought with the approach presented in this paper is to achieve greater participation and motivation of students and, according to surveys, it seems to have succeeded.

2. THEORETICAL BASE OF X RAYS

Radiographic inspection is widely used in the field of industrial engineering²⁸⁻³⁰. The biggest field of application is based on the examination of moulded parts and welded connections³¹, especially when it is necessary for service conditions to ensure that there are no internal defects that may affect their behaviour in use. In moulded or extruded products, this procedure enables the detection of defects such as blowholes and gas porosity, shrinkage voids, cracks, cold junctions, hot tearing, segregation and non-metallic inclusions. In welded connections defects as those due to an excess or lack of penetration, lack of fusion, cracks, non-metallic inclusions, gas porosity and shrinkage cavities can be detected.

Radiographic inspection is a non-destructive test method used in the examination and testing of metal products, and is based on the properties that X-rays have (or gamma rays in special cases^{2,32}) to go through the optically opaque materials, and to display the contrast of absorption of the penetrating radiation through non-homogeneous parts of the same product or metal component. In conventional radiography

a beam of X-rays or y-rays comes into contact with the object tested in a way that the radiation not absorbed by the material is collected on a sensitive film, or by a detector, specially designed for detecting the radiation transmitted through the material. Other detectors include photosensitive paper, fluorescent displays, Geiger counters and xerographies⁷.

Variations in density, thickness and chemical composition in the inspected object generate variations in the intensity of the transmitted radiation, manifesting as photographic density variations (shades of gray) in the developed film. Thus, it is possible to use this test technique to detect heterogeneities or internal defects in the materials. In radiography, the darker portions correspond to areas where the flux of radiation through the object was more severe, and the lighter parts correspond to areas of the work piece that suffered higher radiation absorption. Therefore, defects such as cracks, voids, blowholes or internal cavities, i.e., defects with a lower density/absorbing power material are revealed in the radiograph as darker areas. In contrast, refractory inclusions appear as lighter areas because they absorb a greater amount of radiation.

Mathematically, the intensity (I) of the X-ray beam that reaches the sensitive film is given by the Beer-Lambert equation:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) = I_0 \exp(-\mu_m p x) \quad (1)$$

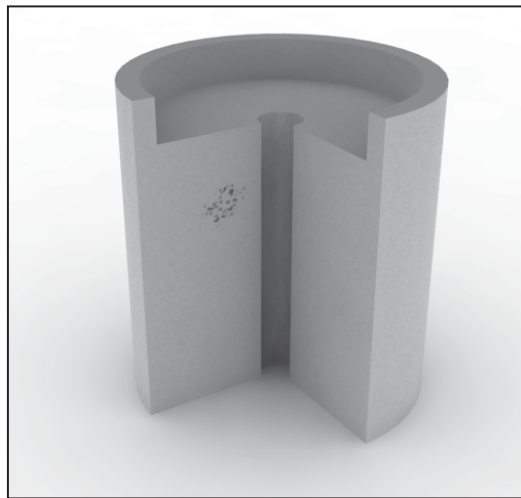
where I_0 is the intensity of the X-ray beam that falls on the material or test piece, μ is the linear absorption coefficient (cm^{-1}), μ_m is the mass absorption coefficient (cm^2/g), p is the density of the material (g/cm^3) and x is the thickness of the material (cm) that the beam has passed through. Given that the value of μ varies with the type of material, the intensity of the emerging beam (I) will be different if there is some kind of defect in the path of this radiation, as this will have a different absorption coefficient from that of the surrounding material.

3. METHODOLOGICAL APPROACH

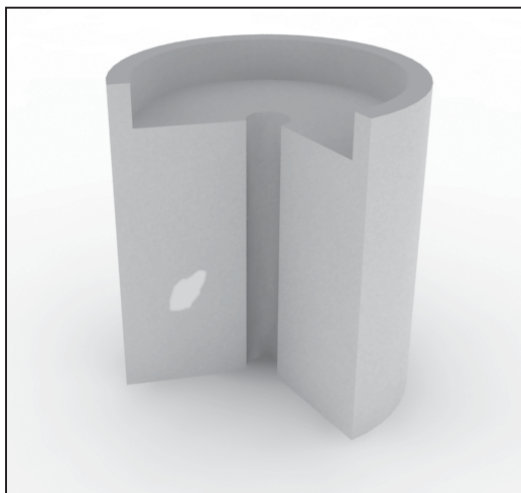
As stated previously, the methodological proposal to facilitate the understanding of the detection and identification of defects by industrial radiology will be divided into *two types of exercises*. Both also seek to improve the student's spatial vision, as this is critical to spatially visualize three dimensional (3D) industrial parts represented in an industrial radiograph in two dimensions (2D). Therefore the main objective of the considered methodologies is to improve the ability of spatial visualization of an industrial part from the understanding of different colourings that can appear on the radiograph of the part, considering also the possible location and morphology of internal defects or faults.

3.1 Exercises based on Technical Drawing

The syllabus or topics of Technical Drawing taught in technical degrees, i.e., architecture and engineering, can be related to industrial radiology from exercises based on obtaining the plan, elevation and profile of different parts. An example of the relationship between these two subjects can be seen in Figures 1 and 2. The first one, executed with the program 3DStudio[®], shows a quarter-sectioned part in perspective, showing the internal defects it may have: (i) a common concentration of pores in welded parts (Figure 1a), and (ii) an inclusion with an arbitrary shape (Figure 1b). These two different quarter sections exhibited in Figs. 1a and 1b (from different perspectives) are necessary to achieve a correct spatial visualization of the whole part, with the total number of defects. Figure 2 shows both the appearance of a part from the plan, elevation and profile (Figure 2a), and the appearance that the part would have after being radiographed from the same viewpoint (Figure 2b), seeing in this way the interdisciplinary link between technical drawing and industrial radiology. In order to understand the location of defects, a mental effort related to spatial visualization capacity is required.



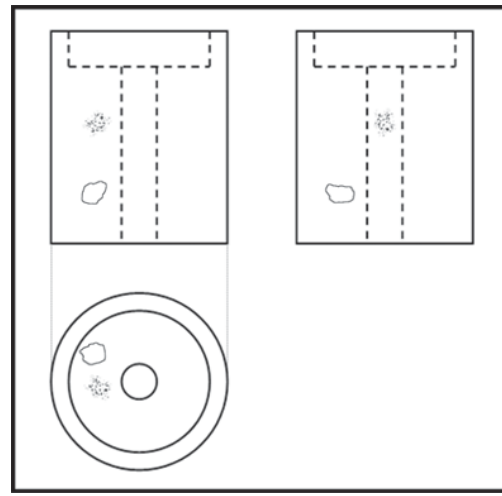
(a)



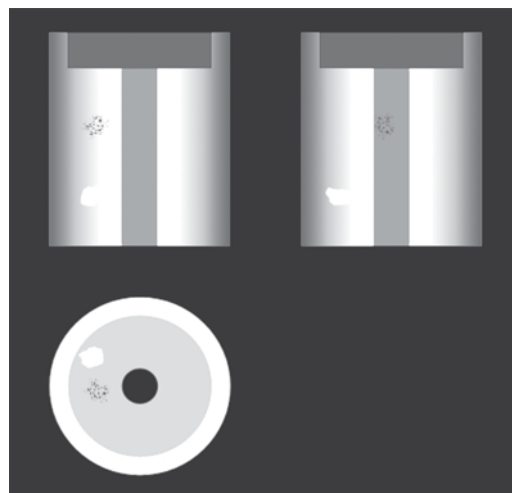
(b)

Figure 1. Quarter sectioned part showing imperfections within.

In this example the appearance of the plan, elevation and profile of the radiographed piece (Figure 2b) was performed considering that it is completely homogeneous and, thus, the boundaries between areas of different thicknesses are clearly defined, i.e., the actual gray gradient that could hinder the understanding of a radiograph has not been considered. Taking into account the main objective of the present methodology, which is to help students to understand industrial radiographs and to improve their spatial abilities, authors consider a good idea to start the learning process of industrial radiology in a



(a)



(b)

Figure 2. Relation between technical drawing and industrial radiology: (a) plan, elevation and profile of the work piece of Figure 1; (b) same views but in a radiographic base.

simple and efficient way by means of the elimination of "shadings". Consequently, the gray gradients found in a real radiograph are not initially considered at the beginning of the teaching methodology and, so, the understanding of both (i) the part and/or (ii) the defects location can be improved. The colour the image takes of the inclusion depends on the mass absorption coefficient^{2,32}. In this case (Fig 2b) it would be a refractory inclusion and, therefore, it would absorb more radiation than the work piece material, thus appearing with a lighter colour in radiograph in Figure 2b.

What is asked of the student from this methodological approach is to obtain the views of an industrial part with defects or imperfections in it, but not from the traditional view of technical drawing, but from a point of view associated with materials science and engineering: industrial radiology. We should emphasize several aspects developed by using these defects to improve the ability of spatial vision: (i) the clear implication of spatial visualization from a graphic point of view (Figure 2a) (ii) the relationship between it and the mathematical basis of industrial radiology, that involves deducing the gray gradient distribution of a radiograph (Figure 2b), developing the habit of thinking, reasoning and relating or explaining the information received (*productive learning*³³), and (iii) the approach of students to practical cases of industrial applications, helping, collaterally, to gain a higher motivation for the subject.

3.2 Simulation of radiographs of fictitious parts with internal defects

The second type of exercise is based on simulations of radiographs of fictitious parts with defects. The authors consider two stages of difficulty for these types of exercises. The lowest level of difficulty for the pupils would consist in obtaining an industrial part from a *simplified simulation* of its radiography. In this case the fictitious radiographs would only emphasize the geometry, the shape and the arrangement of the most common defects, regardless of the actual gray gradient that hinders the understanding of a radiograph (Figure 3). To perform these simulations the drawing tool in Microsoft Word[®] was used (Figure 4). The main purpose of these exercises is to understand the various colours that the radiograph of a part can take, according to the thickness it has in one area or another. Therefore, it is considered that the work piece is completely homogeneous so the boundaries between zones with different thicknesses are well defined and the teaching can be focused on more relevant issues, e.g., the influence of the absorption coefficient on the coloration of the radiograph from the thickness of the piece;

identification of defects which appear, defining the geometry, shape and arrangement of these, etc. Figure 3 shows, in addition to the different thicknesses of the piece depending on the coloration, a grouping of small defects with a more or less circular shape, which is usually the appearance gas porosity takes in welded parts.

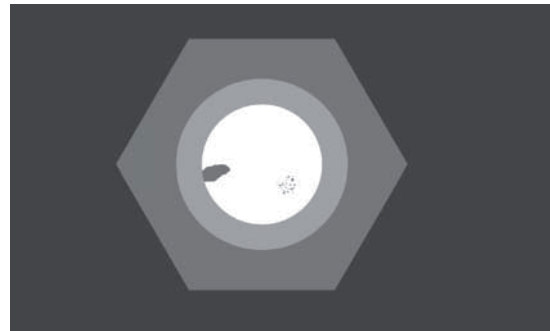


Figure 3. Example of a simplified simulation of the radiograph of a fictitious part.

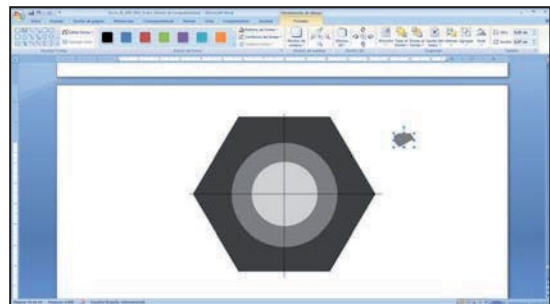


Figure 4. Example of a radiograph simulation using the drawing tool in Microsoft Word[®].

What is asked of the student from these simulations is to draw in three dimensions (3D) a possible geometry of the radiographed part, in a way that it has to be decided, among all possibilities, in what position would be placed the imperfections, how thick the different areas are, if the imperfections are all of the same material or not, etc. Some examples of these drawings made for students are shown in Figure 5. They can also demonstrate in a qualitative way the colour adopted by different defects in the radiograph (darker or lighter than the base material of the part). An example written for students is shown in Figure 6. Another teaching suggestion related to this methodology is to suggest to the student a possibility of reversing the exercise, i.e., that a piece be invented that

contains within it certain defects (previously set by the teacher) and, then, simulate, at this level of simplification, the radiograph that part could get from different points of view (similar to the approach of the previous section). This proposal may help to improve the ability of spatial visualization of students. Thus, this type of exercise not only facilitates the subsequent understanding of any actual radiograph but also ensures a *productive learning*.

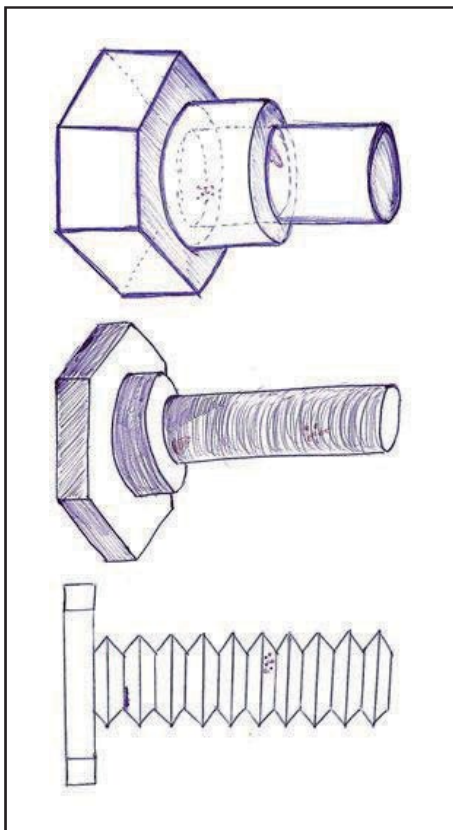


Figure 5. Same examples of drawings made for students to represent the part shown in Figure 3.

Figure 7 shows the second level of difficulty in this type of exercises. This is the same teaching methodology but from more sophisticated simulation models. What is intended to create with these new models is an appearance of industrial radiographs closer to reality. Although the starting points of these new models are simplified simulations, performed with the drawing tool in Microsoft Word® (Figures 2b and 3), alterations that contribute to

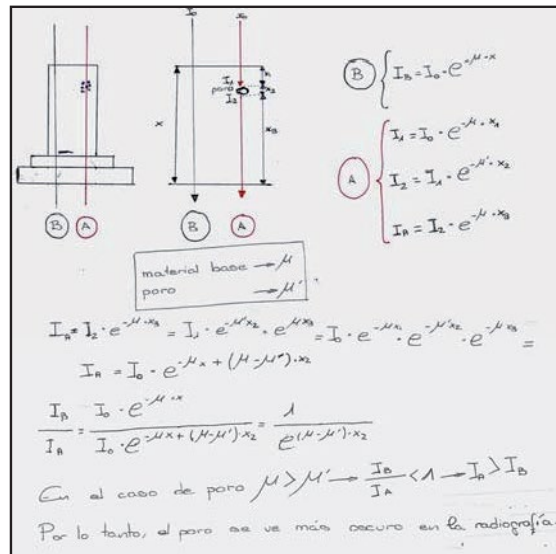
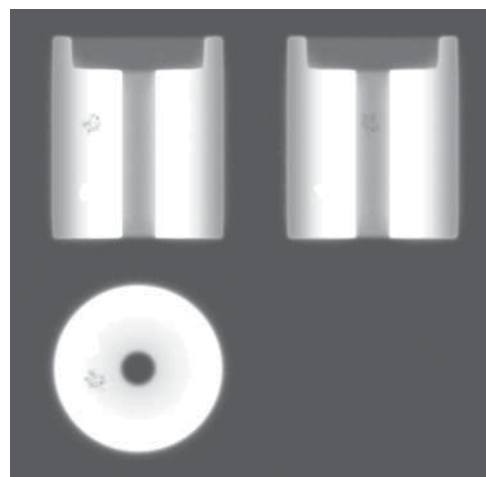


Figure 6. Qualitative explanation of the grade of darkness adopted by pores in the part of Figure 3 (made for students, in Spanish).



(a)



(b)

Figure 7. More realistic simulation of radiographs of parts with internal defects.

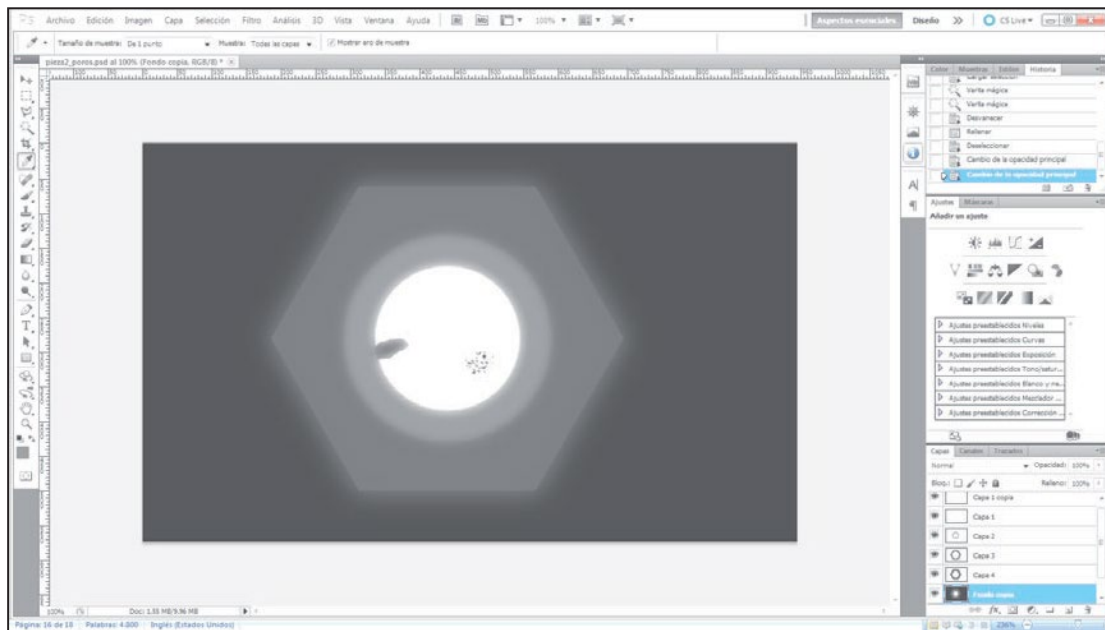


Figure 8. Example of a more realistic radiograph simulation using Photoshop®.

the more realistic final appearance were made with Photoshop® and Digital Fusion® programs. In Figure 8 the use of different layers during the construction process of this realistic appearance with Photoshop® can be observed.

One can clearly observe the difference of difficulty of this stage (Figure 7) compared to the previous simplified simulation (Figure 2b and 3), seeing there is now a gray gradient at the boundaries of the various zones, that makes the visual perception become more complex. As an example we can see how the pores that were very close together in the simplified simulation (Figure 3) tend to establish a diffuse limit on this more realistic simulation, in a way that depending on the actual thickness, they can apparently look like a single pore in some cases (Fig. 7b). With this methodological approach students can be requested to obtain the exact part that was radiographed -giving the three possible views (Fig. 7a)- or to deduce a possible geometry for the radiographed part -giving only one of the possible views (Fig. 7b)-.

4. APPLICATION IN THE CLASSROOM

The methodology applied in the classroom to teach the industrial radiology agenda as the

subject is related to Materials Science has been developed by the authors in several phases presented below.

Phase 1:

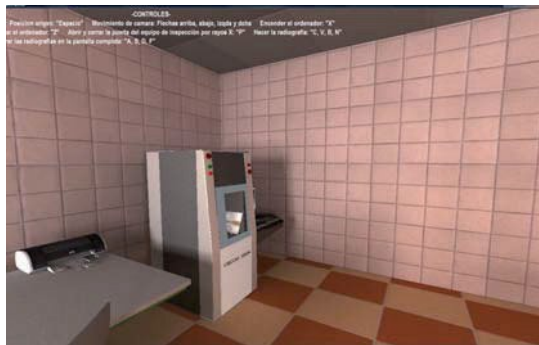
Students receive a 2-hour lecture related to the syllabus of industrial radiology, in which the Beer-Lambert equation (1) is explained and its application on radiographs of inhomogeneous parts with manufacturing defects, thus justifying the different colorations, which an industrial radiography usually shows.

Phase 2:

The authors have designed an *interactive virtual platform* (IVP) to show students the operation of a real industrial radiography machine³⁴ (X8008 model, Viscom AG Vision Technology). Furthermore, students recognize the use of IVP similar to the use of a videogame, due to the interactivity possibilities of the virtual machine. With this IVP (Figure 9) students can interact and execute virtual radiographs of weldments with internal defects. Then each student qualitatively analyzes, according to the mathematical knowledge acquired in the previous phase, the radiographs



(a)



(b)

Figure 9. Interactive virtual platform to simulate the operation of an industrial radiology machine: (a) virtual laboratory; (b) welded part inside the machine.

obtained with the IVP. They are not related to the virtual weldment (Figure 9b), i.e. the radiographs are real but not corresponding to the radiographed virtual part. These radiographs (Figure 10) are very useful in the learning process of industrial radiology since they show the appearance of real radiographs to students. This phase is a one hour practical lesson in the classroom.

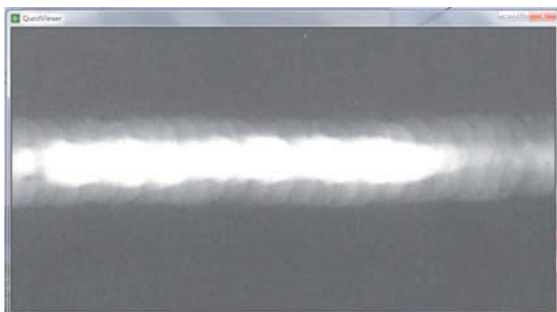


Figure 10. One example of radiograph obtained by the IVP.

Phase 3:

The two types of exercises discussed in Section 3 (Methodological Approach) of this article are presented and explained (about 30 minutes) and then a collection of exercises is given out to the students so they apply their knowledge and resolve them not only at a technical drawing level but also explaining mathematically the reason for the colours of the radiographs (in a qualitative way).

Phase 4:

Once the fundamental concepts are assimilated and the students have mathematically understood why there are different colours of the possible defects, teaching can be supported in an environment closer to reality. Thus, the authors have taught practical lessons (30 minutes) with real radiographs that they could observe under a halogen light (there was not an X-ray viewer available in their laboratories). This implies that the number of students that can be grouped into each explanation around the light is small and, depending on the total number of students, it may or not be a feasible practice. One possible solution for the future would be to scan real radiographs, but for this, a transparency adapter for the scanner is necessary.

It should be noticed that the first year this methodology was applied the students developed both phases 2 and 3 individually. The problem with that is that the student who was not able to visualize a part three-dimensionally was left with doubts and questions and did not make progress. In the following academic years it has been verified that the best option is through *cooperative learning* in groups of 3-4 people. According to previous studies these small groups can themselves encourage the efficiency of the cooperative learning³⁵, although there are good experiences with bigger groups, too³⁶. Thus the authors have seen how students helped each other to spatially understand the parts to the ones who had difficulties visualizing them, therefore promoting or enhancing *peer learning*³⁷⁻³⁹. Furthermore, according to surveys

Table 1. Some examples of survey questions

1. Rate from 1 to 10 the employed methodology
2. Do you think that this methodology is better than the traditional engineering education?
3. Do you think that your spatial abilities were improved by the use of the employed methodology? Rate from 1 to 10
4. Is it an efficient method to learn? Rate from 1 to 10
5. Do you like this topic: industrial radiography? Rate from 1 to 10
6. Do you think that the acquired knowledge of industrial radiography can be useful for your professional future? Rate from 1 to 10
7. Do you think that working in work-groups help you to learn more? Rate from 1 to 10
8. Do you think that employing an IVP is an enjoyable and entertaining way to learn? Rate from 1 to 10
9. Did this methodology contribute to the understanding of the mathematical basis of industrial radiography? Rate from 1 to 10

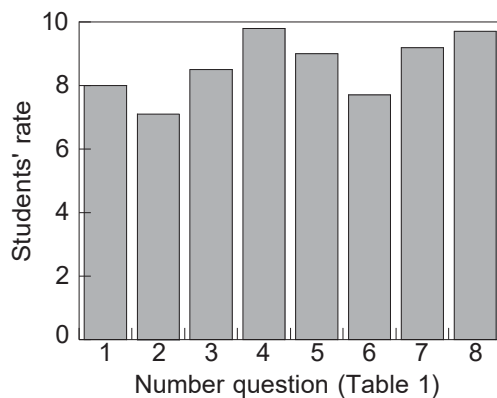


Figure 11. Students' opinion about the exposed methodology (arithmetic average).

carried out in relation to the methodology followed in this topic of industrial radiology (Table 1), students considered that (i) the educational experience was rewarding for them (Figure 11) and (ii) that they had learned enough of the subject at issue and also in an enjoyable and entertaining way (Figure 11). The students' rates shown in Figure 11 are the arithmetic average test answers of an overall population of 36 students.

According to previous studies⁴⁰, engineering students tend to be more dissatisfied with the methodologies followed by their teachers than students in other degrees. Therefore, an engineering professor should create situations and generate or breed new methodological approaches or tools that arouse curiosity, participation and collaboration in students. In this way, students would no longer be passive and they would share with the teacher the participation and responsibility of the processes and activities, thus generating a continuous interaction between both parts, which promotes the philosophy of "learning how to act by acting and reflecting on that acting"⁴¹.

In this way, with the innovative and totally original methodology proposed herein, the authors expect that the teaching of industrial radiology turns out to be more enjoyable and at the same time effective for an engineering student. In this regard, according to surveys carried out (Table 1 and Figure 11), students mark it as a methodology that (i) clearly helps to understand the mathematical basis of industrial radiography and (ii) helps to perceive industrial radiography as a more practical subject than others of Materials Science. Spatial visualization ability has also been developed, so it can be assured that this article presents an innovative active methodology that creates interdisciplinary links between two areas of engineering: Materials Science and Technical Drawing.

5. CONCLUSIONS

- This methodological approach solves the *lack of exercises* in books related to university teaching of industrial radiology.
- The authors of this article have developed a series of *virtual teaching resources* that have helped them to present an active methodology in the teaching of industrial radiology.
- This methodology establishes an *inter-disciplinary educational link* between the area of Materials Science and Technical Drawing, making the student develop the ability of spatial visualization.
- This didactic approach develops a *productive type of learning*, as it helps the student to relate the mathematical basis of industrial radiology with the spatial geometry of industrial parts with internal manufacturing defects.
- The authors verified that *peer learning* contributed to the employed methodological approach motivating the students to learn about industrial radiology, and it was therefore, more efficient.
- Demonstrating to students that there is a relationship between different subjects in the degree program creates a feeling of a *well-organized curriculum*.

REFERENCES

1. M.K. Felisberto, T.M. Centeno, L.V.R. Arruda and H.S. Lopes, *Proceedings of the 10th SEM International Congress on Experimental and Applied Mechanics*, Costa Mesa (CA), USA, 2004.
2. J. Lang and A. Middleton, *Radiography of cultural material*, Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2005.
3. M.J. Butler, *Reliability Eng.* **4**, 61 (1983)
4. J.F. Shackelford, *Introduction to materials science for engineers*, Ed. Pearson Education, New Jersey, 2008.
5. J. Cembrero, C. Ferrer, M. Pascual and M.A. Pérez, *Ciencia y tecnología de materiales – problemas y cuestiones*, Ed. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (Madrid), 2005.
6. P. Coca and J. Rosique, *Ciencia de materiales, teoría, ensayos, tratamientos*, Ed. Pirámide, Madrid (España), 2003.
7. D.R. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*, Ed. Thomson Learning, USA, 2001.
8. G. Prieto and A. Velasco, *J. Geom. Graph.* **8(1)**, 107 (2004).
9. M. Garmendia, J. Gisasola and E. Sierra, *Europ. J. Eng. Ed.* **32(3)**, 315 (2007).
10. E. Sierra and M. Garmendia, *New Achiev. Tech. Ed. Develop.* 119-149 (2010)
11. K.M. Ullman and S.A. Sorby, *Comp. Applic. Eng. Ed.* **3(4)**, 251 (1990).
12. A. Rafi, K. Anuar, A. Samad, M. Hayati and M. Mahadzir, *Automation in Construction* **14**, 707 (2005).
13. F. Alkan and E. Erdem, *Proc. Soc. Behav. Sci.* **15**, 3446 (2011).
14. H.B.P. Gerson, S.A. Sorby, A. Wysocki and B.J. Baartmans, *Comp. Applic. Eng. Ed.* **9**, 105 (2001).
15. D. Vergara and M.P. Rubio, *Educação Gráfica* **16(1)**, 44 (2012).
16. S. Hsi, M.C. Linn and J.E. Bell, *J. Eng. Ed.* **86**, 151(1997).
17. D. Vergara, M.P. Rubio and M. Lorenzo, *IEEE Tech. Eng. Ed. (ITEE)*, **7(4)**, 44 (2012).
18. M. Baenninger and N. Newcombe, *Sex Roles* **20(5/6)**, 327 (1989).
19. S.A. Sorby and B.J. Baartmans, *J. Eng. Ed.* 301 (2000).
20. S.W. Crown, *J. Eng. Ed.* 347 (2001).
21. C. Leopold, R.A. Górska and S.A. Sorby, *J. Geom. Graph.* **5(1)**, 81 (2001).

22. G. Prieto and A. Velasco, *J. Geom. Graph.* **6(1)**, 99 (2002).
23. M. Prince, *J. Eng. Ed.* 223 (2004).
24. P.J. Goodhew, *J. Mater. Ed.* **29(1-2)**, 43 (2007).
25. R. Lacuesta, G. Palacios and L. Fernández, *Proceedings of the 39th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, San Antonio, Texas (2009).
26. J. Vaello, *Cómo dar clase a los que no quieren*, Ed. Santillana, Madrid (España), 2007.
27. J.I. Rotgans and H.G. Schmidt, *Teach. and Teacher Ed.* **27**, 37 (2011).
28. J.C. Rockley, *Electr. & Power*, 321 (1977).
29. Y.S. Susiapan, R.A. Rahim, J. Pusppanathan and R.M. Zain, *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on CIRCUITS*, 168-171 (2009).
30. D. Vavrik, J. Dammera, J. Jakubek, I. Jeon, O. Jirousek, M. Kroupa and P. Zlamal, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A633**, S152 (2011).
31. N. Nacereddine and M. Tridi, *Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, 88-93 (2005).
32. M. Rodríguez, *La difracción de los Rayos X*, Ed. Alhambra, Madrid (España), 1982.
33. P. Hernández, *Diseñar y enseñar. Teoría y técnicas de la programación y del proyecto docente*, Ed. Narcea, Madrid (España), 1995.
34. D. Vergara, M.P. Rubio, M. Zurro and F. Espejo, *Proceedings of Jornadas de Innovación y TIC Educativas - JITICE'12*, Móstoles (España), 69-72 (2012).
35. K.A. Smith, *Directions for Teach. Learn.* **67**, 71 (1996).
36. K.C. Chen, L. Vanasupa, B. London, T. Harding, R. Savage, W. Hughes and J. Stolk, *J. Mater. Ed.* **31(1-2)**, 37 (2009).
37. L.M. Rodríguez and T. Escudero, *Enseñanza de las Ciencias* **18(2)**, 255 (2000).
38. C.A. Collazos, L.A. Guerrero, J.A. Pino, S. Renzi, J. Klobas, M. Ortega, M.A. Redondo and C. Bravo, *Ed. Tech. Soc.* **10(3)**, 257 (2007).
39. D. Vergara, *Revista de Currículum y Formación del Profesorado* **16(2)**, 339 (2012).
40. M. Moussavi, *IEEE (FIE'96 Proceedings)*, 1434 (1996).
41. J. Jolibert, *Revista latinoamericana de lectura: lectura y vida* **21(3)**, 1 (2000).

This page intentionally left blank

4. Resúmenes de las publicaciones

Para cada uno de los artículos presentados, un resumen en castellano en el que se especifican: los objetivos de la investigación, la metodología utilizada, los resultados alcanzados, y las conclusiones finales.

4.1. New approach for the teaching of concrete compression tests in large groups of engineering students

Resumen:

En la docencia de las asignaturas de ciencia de materiales en titulaciones técnicas es necesario poner en práctica los conocimientos adquiridos en las clases teóricas. Un tema importante es el de la caracterización de las propiedades de los materiales mediante máquinas de ensayo. Esto se hace utilizando laboratorios donde se encuentran los equipamientos necesarios pero que habitualmente pueden presentar limitaciones para el aprendizaje: (i) los grupos de prácticas con gran número de alumnos y pocas máquinas de ensayos (normalmente solo una por su coste elevado), hay estudiantes que no llegan a ver cómo se hace el ensayo durante la explicación del profesor en el laboratorio; (ii) algunos estudiantes no ven ciertos detalles de la práctica debido a que el ensayo se realiza rápidamente durante la prueba o la zona de pantalla donde se obtienen los resultados es pequeña. Una solución de coste asequible para estos problemas es el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y más concretamente los Laboratorios Virtuales (LV).

Los entornos virtuales son una forma eficaz y amigable de introducir estas tecnologías en la docencia universitaria, especialmente en aquellas asignaturas incluidas en las titulaciones técnicas, como ingeniería o arquitectura. La opinión de los estudiantes en publicaciones previas es consistente con este hecho, reflejando el uso necesario y muy recomendable de los recursos virtuales en el aula.

Los laboratorios virtuales (LV) se revelan como herramientas didácticas muy útiles, aún más cuando no se disponga de los equipos en el laboratorio. Además, los estudiantes también pueden utilizar los LV como herramientas de formación antes de utilizar dispositivos de laboratorio reales, evitando posibles daños en la máquina. Sin embargo, a pesar de las ventajas de los LV desde el punto de vista didáctico, la práctica en directo sigue siendo necesaria y aconsejable en aquellos casos en los que se dispone de la máquina de ensayo real.

En este trabajo se presenta un enfoque metodológico basado en el uso de herramientas didácticas informáticas, vinculado a la enseñanza de uno de los ensayos de materiales más utilizados en la ingeniería civil: el ensayo a compresión de probetas de hormigón. Para ello, el uso de la máquina de ensayos se simula mediante dos aplicaciones informáticas propias: (1) un laboratorio virtual, que permite a los estudiantes interactuar libremente con una máquina de ensayo virtual, y (2) videotutoriales (VT) dentro de una aplicación multimedia, que contribuyen al desarrollo de habilidades de aprendizaje cooperativo y de autoaprendizaje.

Además, en este artículo se comparan dos experiencias de enseñanza/aprendizaje diferentes: (1) uso del laboratorio real después de usar ambos entornos (LV y VT); y (2) usando sólo entornos virtuales (LV). En ambos casos, el uso de estas herramientas mejora los resultados de aprendizaje de los estudiantes, especialmente cuando existe una falta de equipamiento real. Además, los resultados de las preguntas de la encuesta muestran la alta motivación que despiertan los entornos virtuales, y los resultados de la evaluación reflejan un aumento en la capacidad de los estudiantes.

Objetivos:

- Diseñar un enfoque docente innovador de las prácticas mediante dos aplicaciones informáticas que permita mostrar y simular virtualmente el ensayo a la compresión de una probeta de hormigón.
- Conseguir que estas herramientas permitan que los estudiantes se familiaricen con los conceptos teóricos del uso de la máquina del ensayo.
- Lograr que los conocimientos adquiridos mediante dichas herramientas puedan ser realmente útiles para mejorar el aprendizaje de los estudiantes durante sus posteriores prácticas de laboratorio con la máquina real.
- Ofrecer a los estudiantes la oportunidad de aplicar los conceptos teóricos en entornos virtuales, superando así las limitaciones de grandes grupos de estudiantes de ingeniería que utilizan el equipo de prueba disponible.
- Proponer una metodología de enseñanza innovadora mediante el uso de las herramientas informáticas presentadas anteriormente, VT y LV, aplicando el aprendizaje cooperativo.

- Comprobar si las herramientas propuestas potencian el proceso de autoaprendizaje y así garantizan un aprendizaje productivo, es decir, desarrollar el hábito de pensar, razonar y relacionar o explicar información.

Metodología:

Para los Videotutoriales (VT), se grabaron diversos vídeos de un ensayo real y se incorporaron en una aplicación multimedia acompañados por su correspondiente texto explicativo. En esta aplicación se cubren los conceptos teóricos básicos del ensayo de compresión y los diversos pasos a seguir durante la prueba, ya sea secuencialmente (el estudiante observa los diversos pasos en la misma secuencia de un ensayo de compresión convencional) o aleatoriamente, lo que permite a los estudiantes elegir el paso y volver a ver los más difíciles o los que no se entienden fácilmente. En ambos sentidos, estos VT mejoran el autoaprendizaje de los estudiantes.

En el Laboratorio Virtual (LV), se puede realizar de forma autónoma una prueba de compresión virtual donde se simulan las condiciones de funcionamiento de la máquina de ensayos real siguiendo unos pasos incluidos en una ficha de prácticas. El LV incluye un modelado realista de una máquina real de ensayos de compresión de hormigón, modelo SERIE MES 200AV de 2.000 kN de carga máxima, y el entorno del laboratorio de ensayos de materiales real por el que se puede mover el alumno como si fuera un videojuego. Permite realizar el ensayo de compresión según la norma española UNE-EN 12390-1 (Norma europea 2013) para dos tipos de probetas de hormigón con sus correspondientes dimensiones normalizadas.

El enfoque metodológico propuesto para la enseñanza del ensayo a compresión de probetas de hormigón consta de cuatro pasos consecutivos: (1) se lleva a cabo una clase teórica preparatoria, cubriendo los conceptos esenciales sobre el ensayo; (2) se utilizan los VT en el aula para hacer más atractiva la explicación y la aplicación de los antecedentes teóricos a la prueba del material; (3) los estudiantes tienen a su disposición la aplicación del LV en las aulas de informática del centro lo que permite la interacción libre con la máquina de compresión virtual; y (4) se realiza una última clase en el laboratorio real para fijar los conocimientos adquiridos en los pasos anteriores mediante el desarrollo de un ensayo de compresión real. Este enfoque puede considerarse como

una metodología activa, que promueve la participación de los estudiantes en el proceso de enseñanza/aprendizaje.

La verdadera innovación de este enfoque metodológico reside en los Pasos 2 y 3: En el Paso 2, los estudiantes interactúan con los VT en pequeños grupos de trabajo, viendo los videos grabados, leyendo los textos explicativos y resolviendo posibles dudas entre ellos (aprendizaje colaborativo entre pares). En el Paso 3, los alumnos comienzan a trabajar con el LV, interactuando en un entorno 3D con la máquina y realizando una prueba virtual según las pautas incluidas en una hoja de prácticas. Tras la prueba virtual, el grupo de trabajo obtiene un documento Excel, que incluye los datos de la curva carga-desplazamiento correspondiente a la muestra de hormigón ensayada. Luego, los estudiantes deben obtener y analizar la curva maestra a partir de estos datos y la tienen que incluir en un informe escrito, que será evaluado por el docente.

Para conocer la opinión de los estudiantes sobre el uso de estas herramientas didácticas, VT y LV, en la enseñanza de la ingeniería y comprobar sus potenciales ventajas, ambas aplicaciones fueron probadas por los estudiantes matriculados en la asignatura Materiales de Construcción del Grado de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior de Ávila (Universidad de Salamanca, España) y en dos escuelas técnicas de Portugal: la Escuela Politécnica de Viseu y la Escuela Politécnica de Bragança.

Una vez finalizada la experiencia docente, 70 estudiantes de las titulaciones de ingeniería (de las tres facultades técnicas) cumplieron de forma anónima una encuesta, que incluía varias preguntas sobre la utilidad de las dos herramientas, VT y LV.

Resultados:

Los alumnos valoraron con 7,5 sobre 10 la utilidad del LV presentado como complemento a la explicación del profesor durante las clases teóricas. Además, en términos generales, los estudiantes valoraron con 9 sobre 10 la utilidad de este tipo de aplicación interactiva para la docencia universitaria. Asimismo, el 100% de los estudiantes consideró que (1) la interactividad de un LV potencia la comprensión de los conceptos e ideas desarrollados en las clases teóricas; y (2) el proceso de aprendizaje es más agradable que cuando no se aplica este tipo de LV. Esta última consideración se reflejó incluso en algunos de los

comentarios de los estudiantes en los que compararon este LV con la Realidad Virtual de los videojuegos.

Con respecto a la otra aplicación presentada en este trabajo, es decir, los VT, los estudiantes valoraron tanto su utilidad (8,9 sobre 10) como la utilidad general de este tipo de aplicaciones para la docencia universitaria (9,4 sobre 10), ligeramente más alto que el LV. Según los comentarios de los estudiantes, la valoración más alta de los VT que del LV se atribuye al texto explicativo adjunto a los VT. En cualquier caso, todo el alumnado consideró que ambas herramientas son complementarias y que su aplicación en el aula potencia el proceso de aprendizaje en los grados de ingeniería.

Los resultados antes mencionados están en total concordancia con las respuestas a la pregunta de la encuesta que pide comparar ambas aplicaciones. El LV exhibe un mayor nivel de interacción (vinculado directamente con los videojuegos) que los VT; en consecuencia, la motivación resultante también es mayor. Como se mostró anteriormente, la utilidad didáctica de los VT se calificó más alto, por lo que, la LV se considera una herramienta didáctica más motivadora que los VT (debido a la apariencia moderna y el alto nivel de interactividad). Sin embargo, los estudiantes consideraron los VT como una herramienta más efectiva desde el punto de vista educativo. Ambos entornos virtuales obtuvieron la misma calificación en cuanto a facilidad de uso.

Con respecto al uso de herramientas virtuales en el proceso de enseñanza, se hizo una pregunta para que eligieran la mejor metodología de uso. El 95% de los estudiantes prefirió entrenar con VT y LV después de la clase teórica. Esto revela que, desde el punto de vista de los estudiantes, el uso de diferentes recursos virtuales durante la docencia es realmente rentable.

Finalmente, de acuerdo con los comentarios de la encuesta, la mayoría de los estudiantes consideró el uso de estas herramientas en pequeños grupos de trabajo como una buena experiencia porque este ambiente contribuye al proceso de aprendizaje y ayuda a resolver dudas entre sus propios compañeros (aprendizaje colaborativo entre pares).

Conclusiones:

Las aplicaciones interactivas propuestas (videotutoriales y laboratorio virtual) pueden mejorar la comprensión de los estudiantes de grado técnico de un ensayo de comprensión

de hormigón a través de un proceso de autoaprendizaje. Además, las habilidades y conceptos asimilados durante el autoaprendizaje son de gran utilidad durante las actividades prácticas docentes en las que el ensayo de compresión real se realiza en un laboratorio real. De esta forma se obtiene un mejor desempeño de los estudiantes. Estas herramientas resuelven problemas comunes que se encuentran en las clases de laboratorio en las que, debido a la falta de espacio en grandes grupos de estudiantes, algunos estudiantes pierden los detalles del ensayo durante la explicación del profesor. Con estas herramientas, se evita esta deficiencia porque los estudiantes pueden visualizar individualmente en detalle toda la prueba de compresión en una pantalla de ordenador. Así, las herramientas interactivas propuestas potencian el proceso de autoaprendizaje y garantizan un aprendizaje productivo, es decir, desarrollar el hábito de pensar, razonar y relacionar o explicar información. Además, el enfoque metodológico presentado en este trabajo aporta una experiencia cooperativa, para que los estudiantes puedan aprender y comprender mejor los detalles del ensayo a través del aprendizaje cooperativo durante las clases y el proceso de autoaprendizaje en casa.

La opinión de los estudiantes sobre la utilidad didáctica de las herramientas virtuales propuestas es ligeramente más favorable a los VT que al LV. Por el contrario, en cuanto a interactividad y motivación, LV obtuvo una valoración ligeramente mejor que VT.

Los estudiantes indicaron que estas herramientas se complementan entre sí y que sus debilidades individuales se superan utilizando ambas herramientas didácticas. Además, consideran que trabajar con estas herramientas en pequeños grupos de trabajo mejora aún más el aprendizaje porque las posibles dudas se pueden resolver entre compañeros.

Finalmente, se puede asegurar que ambos entornos virtuales —LV y VT— son realmente útiles en la formación de ingenieros y mejoran el rendimiento educativo de los estudiantes, especialmente cuando se enfrentan con la falta de equipamiento en un laboratorio real.

4.2. *Enhancing the teaching/learning of materials mechanical characterization by using virtual reality*

Resumen:

El uso de laboratorios virtuales (LV) en la enseñanza/aprendizaje está creciendo en el ámbito universitario y sobre todo en las prácticas docentes de las titulaciones técnicas. Una de las razones de este éxito es que aplican metodologías de “aprendizaje activo” (AA), o sea se “aprende haciendo”. Otra razón es que se basan en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), aprovechando las posibilidades de los sistemas informáticos y pueden sustituir costosos laboratorios. Concretamente, en lo que respecta a la aplicación de las TIC en la enseñanza de la ingeniería, existen ya muchos ejemplos de laboratorios virtuales (LV) basados en AA.

Los beneficios más importantes que aportan son: Aminorar problemas relacionados con la masificación de las clases prácticas, se puede usar la aplicación tanto como se desee, evitar riesgos, incluir aplicaciones didácticas para reforzar los conocimientos, aumentar la motivación de los estudiantes y economizar costes.

En cuanto a los LV vinculados con ensayos caracterización mecánica de materiales, existen diferentes tipos de enseñanza/aprendizaje: (i) Aplicaciones informáticas 2D; (ii) páginas web que incluyen también ejercicios interactivos; y (iii) grabaciones en video de ensayos reales útiles para la docencia. Sin embargo, hasta la fecha no hay referencias de una herramienta virtual sobre la caracterización mecánica de materiales en un entorno interactivo tridimensional (3D). Un laboratorio virtual 3D implica una simulación más realista que un entorno 2D y, por tanto, más atractivo y motivador para los estudiantes.

El laboratorio virtual 3D (LV-3D) muestra el ensayo en un entorno 3D y permite la interacción con él. De esta forma, la experiencia teórica (el procedimiento del ensayo) se convierte en una experiencia similar a la del mundo real (Realidad Virtual). En términos generales, se pueden citar dos categorías de LV-3D: (1) *Ventana al mundo*, donde la visión del mundo virtual del ensayo es en la pantalla del ordenador que actúa como una

"ventana". Similar a los videojuegos habituales. Y (2) *Inmersión completa*, que introduce completamente al usuario en el mundo virtual del laboratorio a través de dispositivos hápticos y gafas montadas en un casco. Aporta experiencias más realistas, pero requiere de equipamientos costosos.

En este trabajo se presenta un novedoso laboratorio virtual 3D para potenciar la enseñanza/aprendizaje de la caracterización mecánica de materiales. Teniendo en cuenta que el ensayo de tracción es el método más común para obtener las propiedades mecánicas del material, en este artículo se expone un LV interactivo 3D que incluye una máquina de ensayo universal y su funcionamiento.

Para asegurar que este LV-3D sea realmente útil en el proceso de enseñanza/aprendizaje, se incluyó en la aplicación un apoyo educativo con ejercicios prácticos vinculados a la caracterización mecánica de materiales. Además, en el artículo se expone una experiencia educativa de utilización de este LV-3D en un entorno de AA.

Objetivos:

- Diseñar, modelar y programar una aplicación informática que simule un laboratorio virtual 3D con una máquina universal del ensayo de tracción de materiales y su funcionamiento. Será del tipo “ventana al mundo”.
- Elaborar un conjunto de ejercicios prácticos de caracterización mecánica de materiales y su implementación en la LV-3D desarrollada.
- Proponer una metodología de uso del laboratorio virtual 3D desarrollado, estudiando la mejor forma de implementarlo en las clases y comprobando los tipos de enseñanza/aprendizaje que se pueden aplicar.
- Evaluar el LV-3D y su metodología de uso en clase mediante la realización de encuestas a los estudiantes de diversas titulaciones con asignaturas relacionadas.

Metodología:

Las características de diseño que se requieren en este LV-3D son: (i) entorno 3D, (ii) interactividad, (iii) alto realismo, (iv) facilidad de uso, (v) despierte motivación en los estudiantes, (vi) movimiento en tiempo real y, finalmente, (vii) que permita implementar

un apartado didáctico para ayudar a los estudiantes a potenciar los conocimientos de caracterización mecánica de materiales.

Se utilizaron dos programas comerciales para desarrollar el laboratorio virtual 3D: 3DStudio Max® y Quest 3D®. El 3DStudioMax® es un software comercial para crear gráficos y animaciones 3D. Este software de propósito general permite la exportación / importación de diferentes modelos y animaciones a otras aplicaciones. Se utilizó para (i) el modelado 3D del entorno del laboratorio, el mobiliario y la propia máquina universal de ensayos; (ii) asignar el tipo de material a cada componente; y (iii) crear la iluminación en el laboratorio virtual, para que se viera lo más real posible. Posteriormente, los modelos obtenidos con 3DStudio Max® fueron exportados al software Quest3D®, que es una herramienta que consta de un motor gráfico en tiempo real de ejecución (interacción en tiempo real) y un sistema de programación orientado a objetos. El entorno Quest3D® se utiliza para incluir la interactividad del movimiento dentro del escenario y la interacción con los objetos (máquina de ensayos).

La aplicación diseñada se enmarca dentro de los denominados juegos serios, programas que utilizando técnicas y tecnologías propias de los videojuegos se usan en campos diferentes al del entretenimiento y pueden estar dirigidos a una amplia variedad de usuarios, desde estudiantes hasta profesionales. El LV-3D que se muestra en este trabajo se compone de dos partes. la primera del tipo de los juegos serios, en este caso de carácter didáctico, y la segunda consiste en una colección de ejercicios virtuales diseñados desde el punto de vista educativo.

En la primera parte (juego serio), el realismo es uno de los temas clave. El usuario tiene la sensación de estar en un laboratorio de pruebas real (Realidad Virtual). Para lograr ese objetivo, el LV-3D diseñado incluye no solo un modelo realista de la máquina de ensayos, sino también una simulación realista de todo el laboratorio. Además, el uso de entornos Quest 3D® le permite moverse libremente dentro del laboratorio virtual, Este LV-3D es capaz de captar un mayor grado de realismo que otros VL utilizados anteriormente en la enseñanza de ensayos de tracción, ya que están simulados en entornos 2D. Por otro lado, la interactividad de este LV-3D ayuda al alumno a entender por sí mismo el funcionamiento de la máquina de ensayos (autoaprendizaje) y, además, promueve una actividad de aprendizaje activa.

La metodología de implementación en el aula consistió en usar la aplicación virtual después de la explicación teórica en una clase magistral. La duración total de la clase basada en el manejo de la herramienta virtual 3D fue de unas 2 horas, divididas en dos etapas:

- *LV-3D*: 15 minutos para realizar la prueba virtual de forma interactiva y adquirir un conocimiento completo de la evolución de la curva tensión-deformación. Es conveniente que cada alumno realice esta etapa de forma individual, conociendo así todos los detalles de la realización de la prueba de tracción.
- *Parte didáctica*: 1 hora y 45 minutos para la resolución de los ejercicios prácticos implementados en la plataforma virtual y comprobación de la solución de los problemas. Esta última fase de resolución de problemas es conveniente hacerla en pequeños grupos de 2-3 estudiantes, ya que de esta forma se puede potenciar un aprendizaje cooperativo más efectivo. Los estudiantes están realmente motivados para colaborar entre ellos ya que se evalúan estas clases activas con el juego serio. Así, cada alumno obtiene su nota correspondiente. Al terminar, los alumnos deben redactar un informe sobre la experiencia, exponiendo tanto los resultados de los ejercicios como sus propias conclusiones.

Resultados:

El LV-3D fue evaluado aplicando encuestas a estudiantes de ingeniería de dos universidades (Universidad de Salamanca y Universidad Católica de Ávila) y, a una gran variedad de estudiantes de varios países europeos durante un curso organizado por AEEPO (Autonomous European Educational Programs Organization). Se encuestó a un total de 110 estudiantes que cursaban los grados de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Geológica, Ingeniería Civil, Arquitectura y Geología, todos ellos con asignaturas de ciencia de materiales y se obtuvieron los resultados que se muestran en este trabajo.

Las encuestas puntuaron de 0 a 10 las siguientes características: interactividad, facilidad de uso, realismo, similitud con un entorno de videojuego, motivación (por ser una herramienta intuitiva y de fácil comprensión), calidad didáctica, aplicación educativa, etc., y se obtuvo del promedio aritmético de la puntuación de los estudiantes. Los resultados sirven para

verificar la buena valoración de este juego serio por parte del alumnado, ya que todas las características del LV recibieron puntuaciones altas (más de 9 sobre 10).

También, se preguntó a los estudiantes si consideraban necesaria una explicación previa para comprender la herramienta virtual 3D. Las respuestas de la encuesta fueron que el escenario similar a un videojuego es fácil de usar y entender, pero que se necesitaría una clase previa con un profesor para los ejercicios complementarios.

Por otra parte, se les pidió que eligieran entre (i) “Prefiero LV-3D” o (ii) “No tengo preferencia entre LV-2D o 3LV-D. La mayoría de los estudiantes (61,7%) eligió la aplicación 3D. Se observa preferencia de los estudiantes por los laboratorios virtuales 3D, debido a la gran importancia que dan al realismo y la similitud con los videojuegos.

Por otro lado, en la encuesta se preguntó a los estudiantes cuál es la mejor metodología para los créditos prácticos (de asignaturas experimentales): (i) LV; (ii) Laboratorio Real (LR); o (iii) Mezcla de LV y LR. Los resultados indican que el 78,3% del alumnado eligió la opción combinada LV + LR, es decir, los estudiantes prefieren el uso de LV en el aula, pero como refuerzo de las prácticas en LR. El orden más lógico para aplicar tales actividades es, en primer lugar, el uso de LV y luego el LR, ya que LV es, de hecho, el siguiente paso de la clase magistral y aumenta el deseo del estudiante de experimentar aún más en el mundo real. Por otro lado, se incluyó la siguiente pregunta en la encuesta: “¿Te gustaría tener más clases con herramientas virtuales en otras materias? Si la respuesta es afirmativa, enumere los temas”. Entre las respuestas de los estudiantes, se enumeraron casi todas las materias que incluían un carácter experimental de las carreras de ingeniería.

Además, muchos estudiantes de ingeniería declararon que, después de ver la prueba de tracción en el LR, no aprendieron más que después de usar el LV. Esto se debe principalmente a que las clases prácticas de una prueba de tracción en un LR son realizadas por un profesor, y los estudiantes actúan como simples espectadores. Aun así, el alumnado de ingeniería exige el uso de LR en su formación, como una forma imprescindible de verificar los conocimientos adquiridos durante sus clases con LV.

Conclusiones:

El rápido avance de las TIC, exige que los profesores implicados en la creación y desarrollo de herramientas docentes virtuales deban actualizar sus conocimientos y las renueven constantemente. En este sentido, cada día es más difícil motivar al alumnado y captar su atención utilizando aplicaciones “antiguas”, que desde el punto de vista estético parecen estar obsoletas. Por eso es realmente conveniente aprovechar los recursos más novedosos y avanzados para construir el entorno virtual didáctico. Esta idea se refuerza con los resultados obtenidos en las respuestas a las encuestas incluidas en este trabajo.

Por tanto, los LV utilizados en el aula deben tener, además de una alta calidad didáctica, una apariencia lo más realista posible para motivar al alumnado a utilizarlas e implicarlos en el proceso de enseñanza/aprendizaje, potenciando así el Aprendizaje Activo. Esto se consigue mediante el uso de entornos 3D. De hecho, de acuerdo con la opinión de los estudiantes reflejada en las encuestas, se ve que los LV-2D se están volviendo obsoletos. Según los resultados de la encuesta, para ser realmente eficaz, una herramienta virtual no solo debe ser didáctica, sino que también debe llamar la atención de los estudiantes.

El LV-3D de este trabajo presenta un diseño estético, que claramente atrae a los estudiantes (incluso también a algunos profesores que lo han utilizado) que lo demuestran en los resultados de la encuesta con calificaciones altas para todas las características del LV-3D.

Los autores piensan que este trabajo es un avance en el diseño de tecnologías educativas utilizadas para la simulación de laboratorios virtuales de Ciencia e Ingeniería de Materiales, mediante el uso de entornos 3D basados en juegos serios. Aun así, son conscientes de que deberán realizar periódicamente mejoras en el laboratorio virtual con el objetivo de mantenerlo al día y que siga motivando a los estudiantes. Además, otro aspecto que influye en la opinión de los estudiantes es la metodología de implementación en las clases, que también debe actualizarse continuamente.

4.3. *A virtual environment for enhancing the understanding of ternary phase diagrams*

Resumen:

Las transformaciones de fase son importantes en una gran variedad de procesos industriales que utilizan calor en el tratamiento termoquímico de aleaciones metálicas. Por lo tanto, los estudiantes de Ingeniería Mecánica y de Materiales necesitan un conocimiento profundo de los diagramas de fase (y microestructuras asociadas). En particular, los *diagramas ternarios de fase* (DTF) son especialmente útiles para analizar innumerables aleaciones metálicas compuestas por la mezcla de tres elementos.

A partir del análisis de los DTF apropiados, se revela la microestructura final del material y se pueden evaluar sus propiedades mecánicas. Para ello, se suelen utilizar diagramas de fase tridimensionales (3D) de base triangular, colocando en las esquinas del triángulo los tres elementos que componen la aleación metálica.

La mayoría de las referencias bibliográficas más conocidas que se utilizan habitualmente en la enseñanza de Ciencia e Ingeniería de Materiales dedican varios capítulos a este tema, centrándose principalmente en los *diagramas binarios de fase* (DBF) de las aleaciones de dos componentes más utilizadas. Sin embargo, debido a la complejidad del análisis de los cambios de fase en las aleaciones ternarias, la mayoría de los libros de referencia no incluyen –o apenas dan– ideas sobre este tema. Por lo tanto, los estudiantes no encuentran ninguna ayuda para resolver los problemas de visualización que deben enfrentar al estudiar los DTF.

La visualización espacial es una habilidad importante que los estudiantes de ingeniería deben desarrollar para desempeñar sus tareas como futuros ingenieros. Definida como la habilidad para gestionar mentalmente formas tridimensionales complejas es una destreza personal que depende de las capacidades innatas del individuo (casi nula en unas personas y muy desarrollada en otras) y se puede mejorar mediante entrenamiento utilizando metodologías que favorezcan su desarrollo. Es fundamental en el trabajo y comprensión

de los DTF. Sin embargo, aunque existen algunos ejemplos de libros que analizan DTF de aleaciones industriales, no es fácil encontrar alguna referencia en este campo sobre el desarrollo de aplicaciones virtuales didácticas para la resolución de problemas de visualización de los estudiantes.

Como se ha dicho antes, la habilidad de visualización espacial se puede mejorar con el entrenamiento. Así, teniendo en cuenta el uso generalizado actual de herramientas didácticas para la docencia universitaria y sus eficientes resultados, en este trabajo se desarrolla una aplicación virtual interactiva (AV) para resolver los problemas de visualización de los DFT. Esta AV les permite desarrollar una mejor y más profunda comprensión de los cambios de fase de las aleaciones ternarias mediante el estudio y análisis de DFT virtuales interactivos. La interactividad es un tema clave en las herramientas virtuales por aumentar la motivación de los estudiantes.

Objetivos:

- Resolver los problemas de visualización espacial cuando se estudian los diagramas de fase ternarios en titulaciones de ingeniería.
- Comprobar que se pueden resolver con el uso de una aplicación virtual interactiva.
- Desarrollar una aplicación virtual interactiva para la docencia de diagramas de fase ternarios.
- Implementar la aplicación de DFT en las asignaturas de ciencia de materiales.
- Obtención de los resultados de su uso mediante encuestas a los estudiantes.

Metodología:

Se utilizaron dos programas comerciales para desarrollar la aplicación virtual didáctica. En primer lugar, se eligió un diagrama de fase ternario y después se realizó su modelado tridimensional mediante el software 3DStudioMax©. De esta manera, se puede ver una vista espacial 3D más realista cambiando el punto de vista o rotando el diagrama en lugar de la vista 2D isométrica común que se ve en la bibliografía. Después, se utilizó el software de programación de aplicaciones interactivas, Quest3D©, para dar un carácter intuitivo e interactividad a la AV didáctica.

Las superficies de cada fase que componen el DFT-3D fueron modeladas a partir de curvas B-spline no uniformes (NURBS) en 3DStudioMax© e importadas posteriormente en Quest3D©. A continuación, se incorporaron diferentes colores y texturas a cada una permitiendo identificar y visualizar mejor las diversas fases. Además, en Quest3D© se programó una vista explosionada animada del DTF para diferenciar las regiones de forma más clara. La principal característica de este software es el procedimiento de programación, que permite una interacción en tiempo real. Sin embargo, las ventajas de utilizar Quest3D© van más allá, ya que este software aporta dos características clave: (i) se puede modificar el código del programa mientras se ejecuta la aplicación, facilitando la corrección de errores rápidamente, y además (ii) la versión final de la aplicación se puede publicar como un único archivo ejecutable.

En el DFT elegido dos de los elementos de la aleación son completamente solubles en estado sólido y ambos son parcialmente solubles con el tercer elemento. Este es uno de los ejemplos más típicos de un DFT hipotético incluido en textos especializados, a pesar de que dicho diagrama no se corresponde con un sistema de aleación ternario real de interés industrial. Para una mejor comprensión, la fase “*liquidus*” no se incluyó en el diagrama, ya que dicha fase no tiene relevancia industrial. Las líneas o campos ocultos también son visibles usando la opción de transparencia.

La AV permite identificar cada uno de los diversos campos que componen el DFT, cada color corresponde a una solución sólida (letras del alfabeto griego) o una región de dos fases, o incluso de tres fases. La rotación es otra característica interesante de la AV desde el punto de vista didáctico ya que potencia el autoaprendizaje de los estudiantes al poder ver el diagrama desde distintos puntos vista. Los autores no consideraron útil desde un punto de vista didáctico incluir valores numéricos en la DFT virtual (composición o temperatura de una determinada aleación industrial). El análisis es completamente general y el conocimiento adquirido es un buen punto de partida para entender cualquier otra aleación industrial utilizada en la industria.

Una práctica común para analizar DFT es estudiar secciones isotérmicas (para una temperatura determinada). De esta manera, la sección transversal isotérmica (un diagrama de triángulo equilátero simple) revela las diferentes fases a esa temperatura. Dicha característica fue incluida en la AV propuesta y el alumno es capaz de visualizar

directamente las diferentes capas isotérmicas del diagrama mediante la modificación de la temperatura y la sección resultante en tiempo real. La comprensión de la explicación del profesor se ve reforzada por la visión directa de los cortes isotérmicos sobre todo en las zonas más complejas mostrando con distinto color las diversas fases que presenta la aleación a esa temperatura.

Con el fin de comprobar la opinión de los estudiantes en relación con la aplicación virtual del diagrama de fase ternario, se utilizó en las asignaturas de ciencia de materiales de dos carreras de ingeniería de la Universidad de Salamanca: (i) Ingeniería Mecánica e (ii) Ingeniería de Materiales y se realizó una encuesta a los estudiantes. Ochenta estudiantes calificaron cuantitativamente diferentes características de la AV didáctica presentada: (i) calidad didáctica, (ii) interactividad, (iii) facilidad de uso y (iv) motivación. Esta última característica se centra en animar a los alumnos a seguir utilizando la propia aplicación.

Resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos, los estudiantes valoraron muy alto la calidad didáctica y su motivación al utilizar la AV. En efecto, el bajo valor de la desviación estándar sugiere una baja dispersión de las respuestas de los estudiantes (de 9 a 10 para la primera característica –calidad didáctica– y de 7 a 9 para la segunda –motivación–). Sin embargo, la calificación de interactividad y facilidad de uso es ligeramente más baja. Aun así, la desviación estándar no alcanza un valor muy elevado. Esto se debe a que las respuestas variaron de 6 a 9 para ambos casos. En el caso de la interactividad, una posible explicación de su menor calificación podría ser la necesidad de mantener constantemente actualizados los recursos virtuales para captar la atención de los estudiantes. Los estudiantes están acostumbrados a utilizar las aplicaciones interactivas más modernas (y continuamente actualizadas) no solo con fines didácticos, como los laboratorios virtuales, sino también para el entretenimiento, como los videojuegos.

Aun así, el uso del AV DFT en el aula reveló dos cuestiones clave en el proceso de aprendizaje de los estudiantes: (i) las preguntas de los estudiantes durante la clase se redujeron notablemente, probablemente debido a la mejora de la visualización espacial del DFT que permite una mejor comprensión de Diagrama; (ii) los estudiantes asimilaban fácilmente los conceptos clave, como revelaron las respuestas a las preguntas del examen

final; y (iii) los estudiantes comprenden rápidamente los conceptos clave de DFT debido al interés despertado en este tema cuando los estudiantes usan la aplicación virtual.

Además, respondieron diferentes preguntas relacionadas con la metodología de enseñanza mediante el uso de la AV didáctica descrita. Parece que los estudiantes consideran que esta aplicación virtual es una herramienta muy útil para aprender los diagramas de fase ternarios. También, los resultados revelan que consideran que el uso de esta AV requiere de una clase magistral previa donde se cubran los conceptos clave de la teoría DFT para lograr una comprensión profunda y efectiva. Por otro lado, la opinión de los estudiantes muestra que la aplicación virtual presentada ayuda a resolver las dificultades de visualización espacial en la comprensión del DFT.

Conclusiones:

En este artículo se muestran los beneficios de utilizar una aplicación virtual innovadora para la enseñanza de diagramas de fase ternarios en titulaciones de ingeniería. Además, los problemas de visualización espacial de los estudiantes, como los que se encuentran en el aprendizaje de estos diagramas, se pueden resolver de manera eficaz mediante el uso de este tipo de aplicaciones 3D interactivas.

Según la opinión de los estudiantes, la aplicación virtual propuesta permite superar sus dificultades de visualización espacial, mejorando así la comprensión de las transformaciones de fase que se producen durante el enfriamiento en una aleación ternaria compleja. Además, el uso de diversas opciones de la herramienta virtual (por ejemplo, vista ampliada, vista rotada, transparencia, cambio de colores de cada fase, etc.) permite una comprensión más profunda a través de una interacción en tiempo real con un diagrama de fase ternario. Así, los problemas de visualización espacial asociados al análisis de formas 3D complejas se eliminan prácticamente mediante un proceso de autoaprendizaje.

Sin embargo, según la opinión de los estudiantes, el uso de herramientas virtuales (como el que aquí se presenta) no sustituye, sino que complementa la clase magistral donde se discuten los conceptos clave sobre los diagramas de fases ternarios. Teniendo en cuenta la constante actualización de los recursos virtuales, los estudiantes consideraron que una actualización de la herramienta virtual propuesta (con opciones de interactividad

actualizadas) debería ser necesaria en un futuro próximo para mantener el mismo interés y motivación en el alumnado.

4.4. The application of didactic virtual tools in the instruction of industrial radiography

Resumen:

La radiografía industrial es una técnica de ensayo no destructivo que se utiliza en la evaluación de piezas industriales ya que facilita la detección de posibles fallas o imperfecciones en su interior. Este tipo de prueba se basa en radiaciones electromagnéticas (rayos X o rayos γ), que son capaces de penetrar cualquier material por su corta de su longitud de onda. Uno de los usos más habituales de esta técnica en el sector industrial es la evaluación de piezas moldeadas y de uniones soldadas.

A pesar de la importancia profesional de la radiografía industrial, no existen libros a nivel docente universitario que aborden este tema. En concreto, faltan ejemplos / ilustraciones que muestren el aspecto radiográfico de las tipologías más comunes de defectos. La bibliografía que existe son páginas web, donde los autores explican el uso de la radiografía industrial en la evaluación de soldaduras.

Además, las máquinas necesarias para radiografiar las muestras son muy costosas y tienen que ser constantemente revisadas (debido a la regulación del uso de dispositivos radiológicos) por lo que este tema no suele impartirse en las clases prácticas de una escuela técnica, quedando restringidas a las clases teóricas. Una posible solución sería recurrir a un entorno virtual que ayude a mostrar esta parte práctica a los alumnos, pero hoy en día no existe una aplicación didáctica comercial sobre este tema y tampoco hay constancia de profesores que hayan diseñado una aplicación virtual con un propósito educativo en esta área.

Para superar esta carencia, en este artículo se describe un laboratorio virtual interactivo que se ha desarrollado por los autores, en el que se puede obtener la radiografía de una pieza soldada y resolver una colección de ejercicios virtuales para evaluar el conocimiento sobre las fallas de soldadura encontradas en las radiografías.

Objetivos:

- Diseñar y desarrollar una aplicación virtual interactiva (tipo videojuego) que simule un laboratorio de ensayo de materiales y el funcionamiento de una máquina de rayos X (RX).
- Incluir en la aplicación la posibilidad de utilizar la máquina de RX y hacer radiografías de distintas soldaduras.
- Incluir una colección de ejercicios teóricos, sobre los conceptos básicos y prácticos, visualizando y resolviendo las radiografías obtenidas de la máquina de RX virtual.
- Implementar el laboratorio virtual en las asignaturas de ciencia de materiales de titulaciones técnicas, elaborando una metodología docente de uso en las clases.
- Evaluar el uso en las clases y comprobar su utilidad.

Metodología:

Los laboratorios didácticos virtuales, que permiten interactuar libremente al usuario, aseguran una mejor comprensión del funcionamiento de las máquinas empleadas en las prácticas de diferentes asignaturas de ingeniería. Teniendo esto en cuenta, se ha diseñado una Plataforma Virtual Interactiva (PVI) que simula el funcionamiento de una máquina de radiología industrial modelo X8008 de la empresa Viscom AG Vision Technology. Esta aplicación PVI puede resultar de gran utilidad en las prácticas de titulaciones técnicas donde la detección de fallas mediante radiografía industrial, forma parte del temario.

Para desarrollarla se utilizaron los programas comerciales Quest3D® y 3DStudioMax®. El uso conjunto de ambos programas ayuda a que la PVI sea tridimensional (3D), interactiva, muy realista, fácil de usar, agradable y motivadora, con movimientos en tiempo real y además, permite la implementación de un complemento didáctico para reforzar el conocimiento del tema de estudio. Con el programa 3DStudioMax® se modeló el entorno tridimensional del laboratorio, el mobiliario y la máquina de rayos X, asignando diferentes materiales a cada uno y creando la iluminación adecuada. Todos estos aspectos se lograron buscando el mayor grado de realismo para una aplicación en tiempo real. Posteriormente, los modelos obtenidos fueron exportados a Quest3D®, que incluye un motor gráfico en tiempo de ejecución y un sistema de programación visual

orientado a objetos. En este programa se incorporaron tanto la interactividad del movimiento a través de la escena (laboratorio virtual) como la interacción con los elementos mencionados.

Es conveniente precisar que esta PVI ha ido evolucionando con el tiempo, desde la primera versión hasta la actual en la que se han incluido los aspectos de mejora que los alumnos demandaban en su uso. Así, presenta unas propiedades interesantes desde el punto de vista educativo: (i) realismo, (ii) interactividad, (iii) facilidad de uso, (iv) tiempo real, (v) motivación y (vi) calidad didáctica.

El realismo de los entornos virtuales es un aspecto que despierta un gran interés en los estudiantes, principalmente cuando son en tres dimensiones. En este sentido, la PVI de que se analiza (desarrollada en 3D) tiene en cuenta varios aspectos: La máquina de rayos X, el entorno virtual del laboratorio, los materiales de ensayo que se obtuvieron mediante el uso de un escáner 3D aplicado a una soldadura real y las radiografías virtuales que fueron digitalizadas a partir de radiografías reales.

El uso es similar al de los videojuegos conocidos como “*shooter*”, en el que el usuario visualiza el entorno en primera persona. Además, se buscó que la simulación del funcionamiento de la máquina virtual hasta la obtención de la radiografía de la soldadura pieza fuera lo más real posible, siguiendo los mismos pasos que se deben dar en la realidad e incluyendo aspectos que identificaban el mundo real, por ejemplo, el sonido de la máquina en funcionamiento, el encendido y apagado de la computadora virtual, etc. Esta tipología de entorno 3D, además de motivar al alumno al acercarlo a un mundo virtual similar al de un videojuego, consigue transmitirle los conocimientos técnicos. Por tanto, esta PVI supone un nuevo enfoque de la tecnología educativa aplicada en la docencia universitaria.

Los estudiantes que probaron las primeras versiones de la PVI pidieron una colección de ejercicios virtuales para completar y mejorar la parte educativa de la aplicación. Por eso, se incluyó un acceso a documentos virtuales con la teoría básica de la radiografía industrial. Estos documentos están disponibles en todo momento para permitir una mejor comprensión del tema de estudio. El propósito de este complemento educativo es ayudar al alumnado a reconocer las discontinuidades típicas de la soldadura. Para completarlo, se ha incluido una colección de ejercicios en la computadora virtual de la PVI que aclaran

las tipologías de discontinuidades que presentan determinadas radiografías reales de soldaduras, como: penetración excesiva, concavidad excesiva en la raíz, falta de llenado, socavación externa e interna, piezas mal alineadas, grietas, falta de fusión lateral, inclusiones, porosidad, etc. A partir de estos ejercicios con radiografías virtuales el docente puede plantear diferentes cuestiones relacionadas con la radiografía industrial para que los alumnos desarrollen los conceptos aprendidos durante las clases teóricas. Este hecho implica utilizar una metodología más activa que la clase magistral tradicional. Posteriormente el alumno podrá acceder a la solución, que también se implementa en este complemento educativo virtual.

Para evaluar la Plataforma virtual interactiva se realizaron encuestas a los estudiantes pertenecientes a dos titulaciones de ingeniería (Ingeniería Civil e Ingeniería Industrial) de la Escuela Politécnica Superior de Zamora que cursaban asignaturas de ciencia de materiales y que habían usado la plataforma en las prácticas. Se les pidió que puntuaran de 0 a 10, seis características de la aplicación: (i) realismo, (ii) interactividad, (iii) facilidad de uso, (iv) tiempo real, (v) motivación y (vi) calidad didáctica.

Resultados:

Las valoraciones de las propiedades de la PVI se obtuvieron de la media aritmética de las respuestas dadas por ochenta estudiantes. Las seis propiedades han sido muy bien valoradas para esta herramienta didáctica, lo que permite afirmar que el IVP presenta un diseño propicio para ser aplicado en el aula. Aun así, considerando las medidas de dispersión estadística, las primeras cuatro propiedades - (i) realismo, (ii) interactividad, (iii) facilidad de uso y (iv) tiempo real - tienen una desviación estándar baja que nunca supera el valor de 0,5 puntos, lo que indica que la opinión de los alumnos es muy similar respecto a estas cuatro propiedades de la PVI. De hecho, la valoración de los estudiantes oscila entre 9 y 10 en todos los casos. Por el contrario, en las dos últimas propiedades - (v) motivación y (vi) calidad didáctica - la desviación estándar se sitúa en torno a 1,0. Esto indica que, a pesar de un promedio tan alto, la opinión de los estudiantes difiere algo más en estos casos. Algunos de ellos están completamente seguros de que este PVI motiva el estudio de la radiografía industrial y otros, aunque dan una alta valoración, no están tan seguros. Aun así, el rango de valores fluctúa entre 7 y 10 puntos, es decir, la valoración general de los estudiantes es realmente alta para ambas propiedades, no solo por la calidad

didáctica sino también por el nivel de motivación de los estudiantes para continuar utilizándola.

Los estudiantes pidieron que la PVI se deje en la red para que esté disponible en cualquier momento. Ante esta demanda, los autores están trabajando en esta dirección para crear una página web para colgar el IVP de rayos X, pero su implementación en la red presenta varios inconvenientes debido a la aplicación con la que se ha creado, Quest3D®. En primer lugar, solo se crea un archivo de gran tamaño, el cual es muy útil para instalar desde un CD o pendrive pero muy difícil de manejar para usar desde Internet. De importancia secundaria es que si el archivo se deja en la red cualquier usuario podría descargarlo y hacer un uso indebido del mismo, sin tener en cuenta los derechos de autor correspondientes. La solución a estos dos problemas es utilizar otro entorno de programación (diferente a Quest3D®) enfocado a la web, que optimice tanto la transmisión de información como el tamaño de los archivos y, en particular, permita a los usuarios manejarlo solo cuando están conectados. Para ello, existen varias opciones: (i) programar todo en Java, aunque es muy complicado y hoy en día no está muy optimizado para gráficos 3D; (ii) utilizar otros entornos como Unity3D®, que gestiona muy bien estos gráficos y, además, permite su uso desde otros sistemas fijos o móviles (Android, Apple, Windows, etc.).

Conclusiones:

Según estudios previos, el uso de entornos virtuales potencia el desarrollo de habilidades profesionales. Aun así, lo importante no es realmente el uso de este tipo de tecnología educativa, sino cómo se diseñan y cómo el docente las aplica en el aula para aprovechar al máximo su potencial educativo. En este sentido es muy importante hacerlo como un proceso colaborativo entre docente y alumnos. Siguiendo este principio, la PVI presentada en este artículo ha sufrido varias actualizaciones desde su primera versión hasta el diseño actual, que además incluye un complemento didáctico para conocer las tipologías de discontinuidades y defectos que presentan las soldaduras.

Esta PVI facilita el enfoque educativo y al permitir una libre interacción con ella, los estudiantes pueden comprender mejor el funcionamiento de los equipos de rayos X industriales que en las clases magistrales tradicionales. Además, esta herramienta virtual supera el inconveniente de no poder impartir una clase práctica en esta asignatura, debido

a los problemas de radiación y la normativa legal que restringe el uso de este tipo de maquinaria.

La opinión de los estudiantes reflejada en las encuestas garantiza que se ha alcanzado un grado de diseño adecuado de esta PVI didáctica de rayos X y que su aplicación en el aula es realmente útil.

Como conclusión final, los autores quieren destacar que el proceso de diseño de este tipo de tecnología educativa virtual es un proceso evolutivo en el que las debilidades detectadas e identificadas por el alumnado se modifican y actualizan constantemente (proceso colaborativo entre profesores y alumnos). Los autores consideran que este ejemplo de aplicación de PVI en radiografía industrial puede servir de inspiración a otros profesores para aplicar herramientas didácticas virtuales en sus materias.

4.5. Active methodologies through interdisciplinary teaching links: industrial radiography and technical drawing

Resumen:

La radiografía industrial es un ensayo no destructivo (END) que permite la detección e identificación de fallas o imperfecciones internas que pueda tener una pieza mecánica. Las técnicas radiográficas convencionales se basan en rayos X o rayos γ , que son tipos de radiación electromagnética capaces de penetrar en cualquier material debido a su corta longitud de onda (λ). A pesar de la relevancia práctica del tema, existen muy pocos libros de docencia universitaria, que incluyan alguna explicación de cómo se utilizan estos ensayos en el campo de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Incluso los libros de detección de defectos en piezas por radiología industrial lo hacen de forma superficial, y rara vez proponen ejercicios o casos prácticos.

En este artículo se presentan dos tipos distintos de ejercicios para implementar en las clases de radiología industrial. Con ellos se quiere: (i) hacer más atractivo el aprendizaje de la radiología industrial y (ii) resolver los problemas de visualización tridimensional de piezas industriales que tienen muchos estudiantes, que les impide comprender los conceptos de la radiografía industrial. La visualización espacial se define como la capacidad de manipular mentalmente formas tridimensionales complejas, y es un aspecto que puede dificultar la instrucción sobre la detección de defectos si no se desarrolla adecuadamente. Por tanto, con los tipos de ejercicios planteados en este artículo, se establecen vínculos interdisciplinarios de la radiología con el dibujo técnico para intentar solucionar este problema. Para comprender una radiografía, los estudiantes deben relacionar los conceptos básicos de la radiología industrial (características y propiedades de los materiales, tipos de imperfecciones, etc.) con la geometría y dimensiones de las piezas analizadas (dibujo técnico).

La inspección radiográfica se basa en las propiedades que tienen los rayos X (o los rayos gamma en casos especiales) para atravesar materiales ópticamente opacos y mostrar el contraste de absorción de la radiación penetrante a través de partes no homogéneas del

material. En la radiografía convencional, un haz de rayos X o rayos γ entra en contacto con el objeto ensayado de manera que la radiación no absorbida por el material se recoge en una película sensible, o mediante un detector, especialmente diseñado para detectar la radiación transmitida a través del material. Las variaciones de densidad, grosor y composición química del objeto inspeccionado generan variaciones en la intensidad de la radiación transmitida, manifestándose como variaciones de densidad fotográfica (tonos de gris) en la película revelada. Los huecos se revelan en la radiografía como áreas más oscuras. Por el contrario, las inclusiones refractarias aparecen como áreas más claras porque absorben una mayor cantidad de radiación.

Objetivos:

- Elaborar un conjunto de ejercicios que permitan detectar y comprender defectos en piezas mediante la radiología industrial.
- Vincular la radiología con el dibujo técnico para resolver los problemas de visión espacial en el estudio de radiografías.
- Mejorar la capacidad de visualización espacial de una pieza industrial a partir de la comprensión de los diferentes colores que pueden aparecer en la radiografía de la pieza, considerando también la posible ubicación y morfología de defectos o fallas internas.
- Diseñar una metodología de implementación en las clases del conjunto de ejercicios elaborado y con el apoyo de otras aplicaciones de Realidad Virtual desarrolladas previamente.

Metodología:

Como se dijo anteriormente, la propuesta metodológica para facilitar la comprensión de la detección e identificación de defectos por radiología industrial se dividirá en dos tipos de ejercicios. Ambos también buscan mejorar la visión espacial del estudiante, ya que esto es fundamental para visualizar espacialmente piezas industriales tridimensionales (3D) representadas en una radiografía industrial en dos dimensiones (2D).

El primer tipo son ejercicios basados en el dibujo técnico. El temario de Dibujo Técnico que se imparte en las titulaciones técnicas, es decir, arquitectura e ingeniería, pueden

relacionarse con la radiología industrial a partir de ejercicios basados en la obtención de la planta, alzado y perfil de diferentes piezas.

Para lograr una correcta visualización espacial de los defectos internos de una pieza son necesarias las radiografías de las tres vistas ortogonales (planta, alzado y perfil), no una única radiografía como ocurre en los ensayos reales. Se ve de esta manera el vínculo interdisciplinario entre las técnicas de dibujo y la radiología industrial. Si solo se tiene una radiografía, para comprender la ubicación de los defectos se requiere un esfuerzo mental mayor relacionado con la capacidad de visualización espacial y los distintos tonos de gris de la imagen.

El proceso de aprendizaje de la radiología industrial se inicia de una manera sencilla y eficiente mediante la eliminación de "sombras". En consecuencia, los gradientes de gris que se encuentran en una radiografía real no se consideran al inicio de la metodología de enseñanza y, por lo tanto, se puede mejorar la comprensión tanto de (i) la forma de la pieza como (ii) de la ubicación de los defectos.

En este enfoque metodológico, el alumno debe obtener las vistas de una pieza industrial con defectos o imperfecciones en ella, pero no desde la visión tradicional del dibujo técnico, sino desde un punto de vista asociado a la radiología industrial. Cabe destacar varios aspectos al utilizar los defectos para mejorar la capacidad de visión espacial: (i) la clara implicación de la visualización espacial desde un punto de vista gráfico (ii) la relación entre ésta y la base matemática de la radiología, que implica deducir la distribución del gradiente de grises de una radiografía, desarrollar el hábito de pensar, razonar y relacionar o explicar la información recibida (aprendizaje productivo), y (iii) el acercamiento de los estudiantes a casos prácticos reales de aplicaciones industriales, ayudándoles a obtener una mayor motivación.

El segundo tipo son ejercicios con simulaciones de radiografías de piezas ficticias, y se consideran dos niveles de dificultad para este tipo de ejercicios. El de menor dificultad consiste en obtener una pieza industrial a partir de una simulación simplificada de su radiografía. Las radiografías ficticias solo muestran la geometría, la forma y la disposición de los defectos más comunes y no el gradiente de gris que dificulta la comprensión de una radiografía real. Para realizar estas simulaciones se utilizó la herramienta de dibujo en Microsoft Word®. Con estos ejercicios se comprenden los

distintos colores que puede tomar la radiografía de una pieza, según el espesor que tenga en una zona u otra. Se considera que la pieza de trabajo es completamente homogénea por lo que los límites entre zonas con diferentes espesores están bien definidos. Lo que se pide al alumno es dibujar en tres dimensiones (3D) la geometría de la parte radiografiada, de manera que tiene que decidir en qué posición se colocarían las imperfecciones, el espesor de las diferentes áreas, si las imperfecciones son todas del mismo material o no, etc.

En el segundo nivel de dificultad la metodología es la misma, pero a partir de modelos de simulación más sofisticados. Lo que se pretende crear con estos nuevos modelos es una apariencia de radiografías industriales más cercana a la realidad. Estos nuevos modelos parten también de simulaciones simplificadas que se modifican para tener una apariencia final más realista con los programas Photoshop® y Digital Fusion®.

La metodología aplicada en el aula ha sido desarrollada en varias fases:

Fase 1: Los alumnos reciben una clase teórica de 2 horas relacionada con el temario de radiología industrial, en la que se explican los conceptos teóricos de aplicación en las radiografías de piezas no homogéneas con defectos de fabricación, justificando así las diferentes coloraciones, que habitualmente una radiografía industrial muestra.

Fase 2: Se ha diseñado una plataforma virtual interactiva (PVI) para mostrar el funcionamiento de una máquina de radiografía industrial real (modelo X8008, Viscom AG Vision Technology). Los estudiantes pueden interactuar y ejecutar radiografías virtuales de soldaduras con defectos internos. Luego cada alumno analiza cualitativamente las radiografías obtenidas con la PVI, de acuerdo con los conocimientos matemáticos adquiridos en la fase anterior, Estas radiografías son de gran utilidad en el proceso de aprendizaje de la radiología industrial ya que muestran la apariencia de radiografías reales. Esta fase es una lección práctica de una hora en el aula.

Fase 3: Se presentan y explican los dos tipos de ejercicios descritos al comienzo de este apartado (30 minutos) y luego se entrega una colección de ejercicios a los estudiantes para que apliquen sus conocimientos y los resuelvan no solo a nivel de dibujo técnico sino también explicando matemáticamente el motivo de los colores de las radiografías (de forma cualitativa).

Fase 4: Una vez asimilados los conceptos fundamentales, la enseñanza se puede centrar en un entorno más cercano a la realidad. Se imparten lecciones prácticas (30 minutos) con radiografías reales que se pueden observar bajo una luz halógena. Esto implica que el número de alumnos que se pueden agrupar en cada explicación en torno a la luz es pequeño y, dependiendo del número total de alumnos, puede ser o no una práctica factible.

Se ha verificado que, para aplicar esta metodología, la mejor opción es mediante el aprendizaje cooperativo en grupos de 3-4 personas. Así, los autores han visto cómo los estudiantes se ayudaban entre sí para comprender espacialmente las piezas a los que tenían dificultades para visualizarlas.

Por último, se realizan encuestas en relación a la metodología seguida en este tema de radiología industrial.

Resultados:

Realizaron las prácticas de radiografía industrial un total de 36 estudiantes y se obtuvo la media aritmética de las respuestas en las encuestas.

Los estudiantes consideraron que (i) la experiencia educativa fue gratificante para ellos y (ii) que habían aprendido lo suficiente del tema en cuestión y también de forma amena y entretenida. Además, la califican como una metodología que (iii) ayuda claramente a comprender la base matemática de la radiografía industrial y (iv) ayuda a percibir la radiología industrial como más práctica que otros temas de la ciencia de los materiales. También se ha desarrollado la capacidad de visualización espacial, por lo que se puede asegurar que este artículo presenta una metodología activa innovadora que crea vínculos interdisciplinarios entre dos áreas de la ingeniería: Ciencia de Materiales y Dibujo Técnico.

Conclusiones:

Este enfoque metodológico resuelve la falta de ejercicios en los libros relacionados con la docencia universitaria de la radiología industrial.

Se han desarrollado una serie de recursos didácticos virtuales que les han ayudado a presentar una metodología activa en la enseñanza de la radiología industrial.

Esta metodología establece un vínculo educativo interdisciplinario entre el área de Ciencia de Materiales y Dibujo Técnico, haciendo que el alumno desarrolle la capacidad de visualización espacial.

Este enfoque didáctico desarrolla un tipo de aprendizaje productivo, ya que ayuda al alumno a relacionar la base matemática de la Radiología industrial con la geometría espacial de piezas industriales con defectos internos de fabricación.