

# **ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO EN PROBETAS PARA ENSAYOS DE IMPACTO ELABORADOS CON MANUFACTURA ADITIVA: CASO DE ESTUDIO**

*FINITE ELEMENT ANALYSIS OF IMPACT TEST SPECIMENS PRODUCED WITH ADDITIVE MANUFACTURING: CASE STUDY*

**Jesús Vicente González Sosa**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México  
*jvgs@azc.uam.mx*

**Yadira Zavala Osorio**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México  
*yo@azc.uam.mx*

**José Ángel Hernández Rodríguez**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México  
*hrja@azc.uam.mx*

**Recepción:** 28/noviembre/2022

**Aceptación:** 22/diciembre/2022

## **Resumen**

En ciencia e ingeniería se analizan materiales para determinar condiciones físicas de éstos, relacionados con resistencia, energía, deformación y calidad, por lo que es importante el análisis de materiales con simuladores de elemento finito como una herramienta de apoyo para estudiarlos. En este trabajo se analiza la probeta utilizada en ensayos de impacto para materiales plásticos, ABS, con diferentes arreglos y densidad de relleno. La finalidad radica en obtener una base de datos con resultados de simulaciones correspondientes y definir los rangos de propiedades físicas por cada probeta con densidad de relleno seleccionada. Por otro lado, se tienen áreas de oportunidad con manufactura aditiva en impresión 3D, para análisis de probetas en otros ensayos como lo son, tracción, flexión y compresión. Los resultados de este trabajo permiten tomar decisiones para seleccionar el arreglo y densidad para aplicaciones en específico que requieren de un porcentaje de relleno para su elaboración.

**Palabras Claves:** Simulación, probetas, manufactura, impresión 3D, FEM.

## Abstract

*In science and engineering, materials are analyzed to determine their physical conditions, related to resistance, energy, deformation and quality, so it is important to analyze materials with finite element simulators as a support tool to study them. This work analyzes the specimen used in impact tests for plastic materials, ABS, with different arrangements and filling density. The purpose is to obtain a database with results of corresponding simulations and to define the ranges of physical properties for each specimen with selected filler density. On the other hand, there are areas of opportunity with additive manufacturing in 3D printing, for the analysis of specimens in other tests such as tensile, flexural and compression. The results of this work allow making decisions to select the arrangement and density for specific applications that require a percentage of filler for its elaboration.*

**Keywords:** *Simulation, specimens, manufacturing, 3D printing, FEM.*

## 1. Introducción

El análisis o evaluación por medio de elemento finito con simuladores permite visualizar de manera general el entorno de trabajo, bajo condiciones ideales y reales, que a su vez se pueden modificar para lograr un proceso de mejora.

El uso de la impresión 3D para el desarrollo de este trabajo tiene un gran potencial en sus aplicaciones, es un proceso que permite obtener objetos precisos y en condiciones óptimas para su uso, considerando la parte económica como un parámetro para el desarrollo de un objeto o producto [Gardan, 2019].

Es importante resaltar que el uso de elemento finito en objetos elaborados con impresión 3D, permite analizar diversos factores para generar las mejoras en el análisis del producto, ya sea por medio de FEM o ensayos dentro de los laboratorios y los resultados muestran tendencias tanto de la impresión como del método de elemento finito [Zouaoui, 2019].

Uno de los aspectos sobresalientes del análisis de elementos impresos en 3D mediante FEM permite realizar la selección de los materiales y la ejecución de procesos en la deposición del material para la elaboración de productos [Briseño,

2019], lo cual conlleva a utilizar como base las evaluaciones mecánicas por medio de ensayos para recabar datos como lo es la tensión, esfuerzos y desplazamientos. Con el apoyo de la herramienta, para evaluar elemento finito, se identifican parámetros que modifican o retroalimentan el diseño de un producto, por ejemplo, densidad, espesor, velocidad de impresión, tiempo en la deposición de material [Olaya, 2019], con ello evaluar nuevamente las especificaciones del espécimen para validar las propiedades físicas.

En la mayoría del análisis por medio de elemento finito, es necesario contar con un criterio, basado en la experiencia, para determinar la aplicación de los parámetros en las simulaciones [Esqueda, 2005]. En este trabajo se identifican los elementos necesarios para la impresión en 3D, como las especificaciones dimensionales de los especímenes para el desarrollo de las pruebas a las cuales se somete, logrando con ello resultados satisfactorios, con las propiedades físicas del material.

La simulación es una herramienta que permite un acercamiento a la realidad en la evaluación de los productos o especímenes, sin embargo, se debe tener en cuenta que existen errores dentro de un diseño en CAD, con lo cual se debe plantear una pequeña predicción de los resultados de acuerdo con los parámetros que difieren de lo real con lo virtual [Carraturo, 2021], ajustándose con las propiedades físicas del material para compensar los defectos de la geometría.

El trabajo que se presenta tiene la característica de hacer uso de dos tecnologías de innovación, la impresión 3D y la simulación de elemento finito, realizando la evaluación de especímenes que se someten a cargas determinando las propiedades óptimas, que están en función de las especificaciones de cada material. Además, la impresión 3D tiene ventajas sobre los procesos tradicionales para la obtención de objetos en evaluación [Reza, 2022], logrando satisfacer los requerimientos de mejora.

## **2. Métodos**

Para el desarrollo de este trabajo se hace uso de una metodología basada en un caso de estudio, que se define como un método de aplicación en el entendimiento comprensivo de la situación a través de descripción y análisis del fenómeno

actual. Además, para el desarrollo de la investigación, se hace uso de equipos de manufactura aditiva, impresoras 3D, para fabricar el producto que se analiza con el software de elemento finito. La metodología del caso de estudio se describe en figura 1. Se identifican las etapas a seguir para el desarrollo de este trabajo, mostrando una secuencia paso a paso, lo cual permite englobar de manera general un estudio y análisis de ingeniería.



Figura 1 Metodología de trabajo en el análisis para el caso de estudio.

### Etapa 1. Caso de estudio

Para realizar el análisis por medio del método de elemento finito, se ha seleccionado la probeta utilizada en los ensayos de impacto para materiales plásticos, considerado el material ABS para la fabricación de especímenes, los cuales se elaboran con manufactura aditiva en impresión 3D.

En la figura 2, se muestran los especímenes utilizados en el análisis correspondiente con el software de elemento finito.



Figura 2 Probetas de impacto elaboradas en manufactura aditiva.

Las medidas de la probeta son: 55x10x10 mm con un ángulo 45° en la muesca, dichas medidas son extraídas de la norma ASTM D256.

Con respecto al equipo de impresión 3D, se hace uso de la impresora Zortrax M200 Plus, la figura 3 muestra el equipo. Se observa la impresora utilizada, la cual tiene las siguientes características; cama de impresión de 200x200x180 mm, 90-400 micrometros de espesor de capa, impresión por deposición fundida, diámetro de filamento 1.75 mm, máxima temperatura de extrusor 290 °C y máxima temperatura de placa 105 °C.



Figura 3 Máquina Zortrax M200 Plus para la impresión de probetas.

## Etapa 2. Propiedades

Las propiedades que se evalúan en el análisis de este trabajo son conocidas como propiedades físicas, que permiten hacer uso de los materiales en función de los límites de las propiedades del ABS. Se ha planteado analizar el esfuerzo Von Mises, deformación y esfuerzos en la zona de impacto del plano XY, lo cual está definido por el modelo 3D y la simulación correspondiente. En la tabla 1, se tienen los valores teóricos del material que se analiza, ABS.

Tabla 1 Propiedades físicas del material ABS.

Propiedad	Valor
Elongación	4.52-11.08 %
Flexión	46.33 [MPa]
Esfuerzo	30.46 [MPa]
Tensión	25.89 [MPa]
Energía Absorbida	8.93 [kJ/m <sup>2</sup> ]

Los datos mostrados en la tabla 1, son extraídos de experimentación y ubicados en la base de datos incluidos en <https://www.matweb.com/>, localizándose la mayor cantidad de propiedades para la aplicación de los materiales que se utilizan en específico para equipos Zortrax. Los datos mostrados sirven como referencia para el análisis que se realiza a través del método de elemento finito con simulador.

### **Etapa 3. Modelado**

Para el modelado se utiliza un software de CAD, elaborando en primer lugar el bosquejo de la probeta y posteriormente se realiza el sólido con los parámetros dimensionales considerados para el análisis, realizando modelos para 2 arreglos (lineal y hexagonal) y 4 densidades de relleno, en la figura 4 se tienen las imágenes de las probetas.

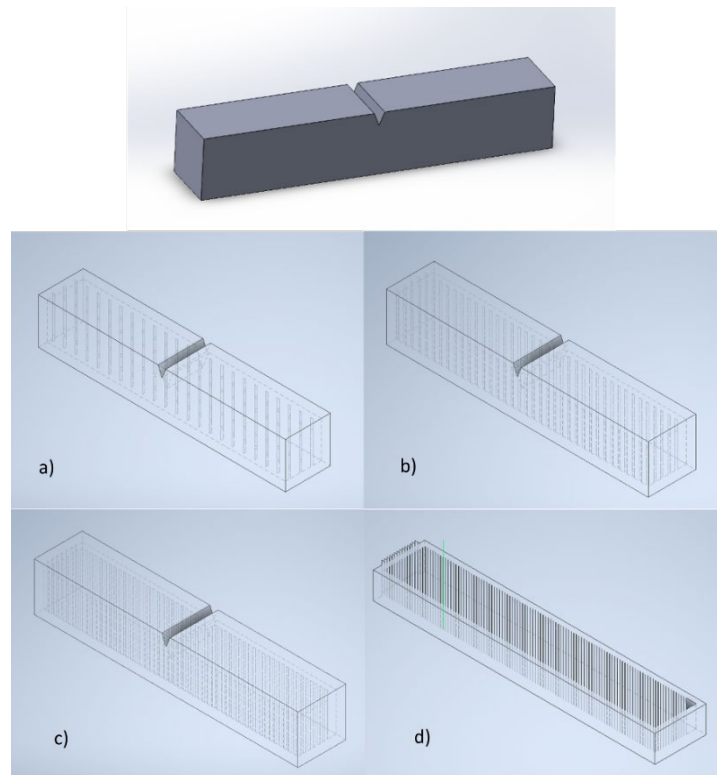


Figura 4 Probeta con 20%, 40%, 60% y 80% de relleno.

Los porcentajes correspondientes a cada una de las probetas, que se observan en la figura 4, son a) 20% de relleno, b) 40% de relleno, c) 60% de relleno y d) 80% de

relleno; esta figura corresponde al arreglo lineal, el mismo porcentaje de relleno se utilizará para el arreglo 2, hexagonal.

#### Etapa 4. Simulación

La sección de simulación se lleva a cabo utilizando análisis estático con elemento finito aplicando, para este caso 3 cargas puntuales sobre la probeta; con lo que se obtiene el desplazamiento, esfuerzo en el plano xy, máximo esfuerzo Von Mises el mismo plano. Las cargas aplicadas y parámetros de impresión se presentan en la tabla 2. La información que se tiene en la tabla 2, se utiliza para realizar las simulaciones con el método de elemento finito en software, manteniendo parámetros constantes para los 2 tipos de relleno, utilizando 4 porcentajes en densidad y 3 cargas aplicadas a cada uno de ellos, teniendo un total de 24 simulaciones, para determinar la viabilidad de la probeta en la medición de desplazamiento y esfuerzos. La figura 5 muestra un ejemplo de la simulación para la probeta de impacto, aplicando la carga designada en el ensayo y los resultados se mostraran en la sección de la etapa 5.

Tabla 2 Parámetros de relleno y cargas aplicadas al espécimen.

	Relleno	Carga aplicada
<b>Lineal</b>	20%	5, 10 y 15 [kN]
	40%	5, 10 y 15 [kN]
	60%	5, 10 y 15 [kN]
	80%	5, 10 y 15 [kN]
<b>Hexagonal</b>	20%	5, 10 y 15 [kN]
	40%	5, 10 y 15 [kN]
	60%	5, 10 y 15 [kN]
	80%	5, 10 y 15 [kN]

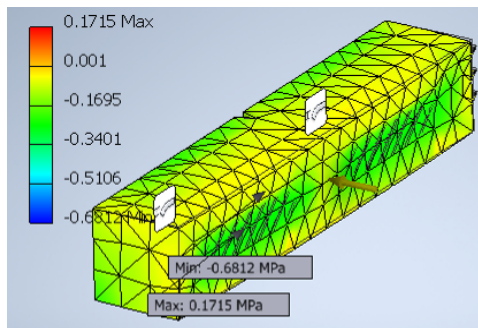


Figura 5 Ejemplo de modelo de elemento finito en probeta de impacto.

Algunos de los elementos que se logran identificar en la figura 5 son la gama de colores, que permite visualizar los valores máximos y mínimos del resultado al aplicar una carga específica al espécimen. Además, se tiene la cantidad de nodos y elementos que se calculan en el análisis, los cuales experimentan una variación para lograr datos particulares optimizando o mejorando el proceso en la simulación.

### **Etapas 5. Resultados e interpretación**

Como parte de los resultados en la metodología a seguir en el presente trabajo, se logran analizar probetas para el ensayo de impacto en material plástico, ABS, y los parámetros específicos de la impresora Zortrax M200 Plus.

Para la elaboración de los especímenes, se consideraron dos criterios; cantidad de relleno y el arreglo en la deposición del material fundido.

Con respecto a las propiedades de impresión del material que permanecen constantes para el análisis de elemento finito son: temperatura de fusión, diámetro de boquilla y diámetro del filamento.

En los siguientes párrafos se describen los casos relacionados con simulaciones de elemento finito, tomando en cuenta los parámetros y condiciones mencionadas, con la finalidad de obtener datos representativos que permiten visualizar la tendencia en las simulaciones, con software especializado, respecto a la fabricación de especímenes en manufactura aditiva, impresión 3D.

El primer caso de análisis es para el arreglo lineal con rellenos de 20, 40, 60 y 80%, con cargas de 5, 10 y 15 kN; dichas cargas se han tomado en cuenta de acuerdo con las propiedades del material y ensayos que se han realizado a este mismo. En la figura 6 se tienen las imágenes del análisis mencionado.

En el primer análisis se han generado resultados aplicando cargas, validando con gráficos de convergencia los componentes del resultado.

En la figura 6, se tiene que el valor máximo del esfuerzo Von Mises es de 0.38 MPa, 0.00026 mm en desplazamiento y esfuerzo máximo de 0.088 MPa. Como se mencionó anteriormente en cada caso se aplica FEM, para que al final se realice un contraste y comparativa de resultados; en la figura 7 se aplican las mismas cargas (5, 10 y 15 kN), para el 40% de relleno. Los datos que se observan en la figura 7,



valores máximos en este caso, son Von Mises 0.42 MPa,  $5.76 \times 10^{-4}$  mm en desplazamiento y 0.081 MPa en el esfuerzo aplicado en el plano XY.

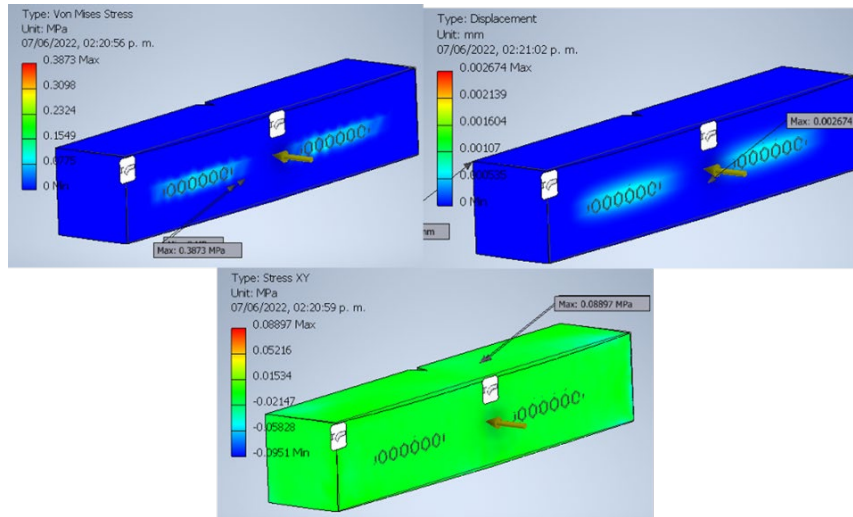


Figura 6 FEM arreglo lineal 20% de relleno.

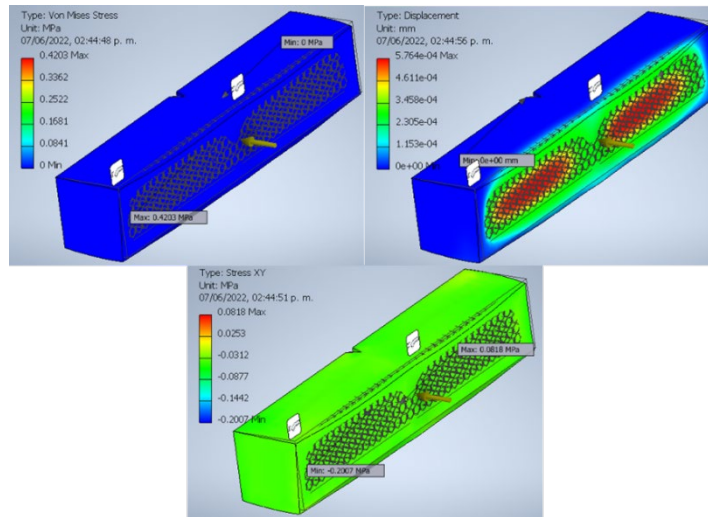


Figura 7 FEM arreglo lineal 40% de relleno.

Con lo observado hasta el momento se logra identificar el impacto que se tiene cuando la cantidad de relleno aumenta o disminuye según sea el caso de análisis. En la figura 8 se utiliza en relleno de 60% con arreglo lineal. Para este caso, va aumentando la resistencia de la probeta, lo cual se observa en el análisis de FEM, Von Mises 1.18 MPa,  $3.21 \times 10^{-4}$  mm en desplazamiento y esfuerzo de 0.62 MPa.

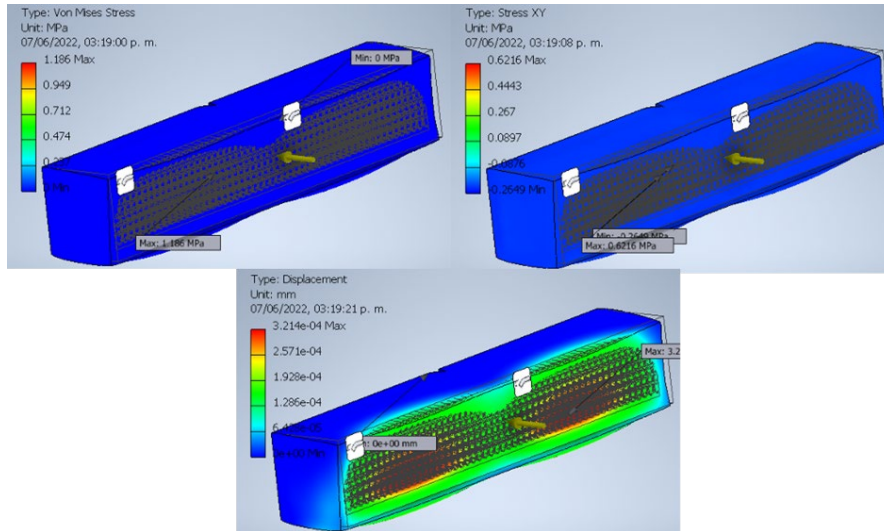


Figura 8 FEM arreglo lineal 60% de relleno.

En el análisis para el 80% de relleno, los resultados se observan en la figura 9, manteniendo los mismos parámetros como en los casos anteriores.

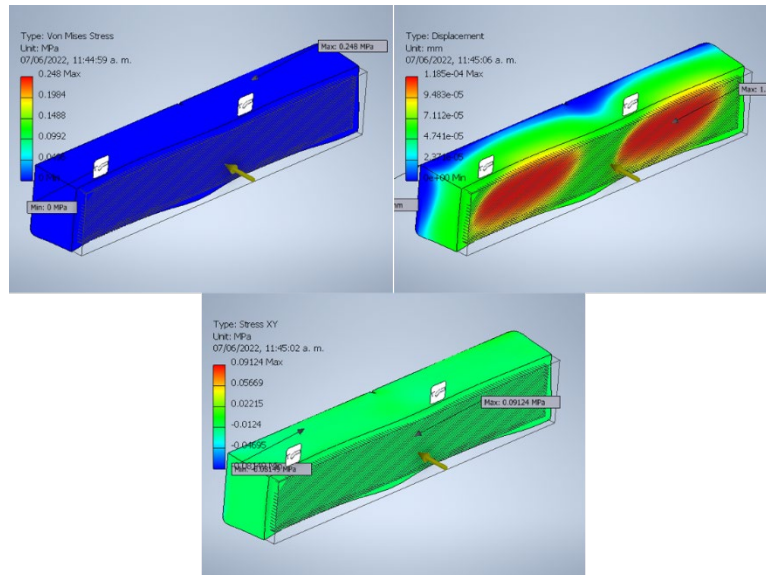


Figura 9 FEM arreglo lineal 80% de relleno.

Como parte de los resultados se tiene 0.21 MPa en Von Mises,  $1.18 \times 10^{-4}$  mm para el desplazamiento y 0.091 MPa para el esfuerzo considerado. Se logra observar, que el arreglo lineal es mayor conforme aumenta la cantidad de relleno y la resistencia aumenta.

Las propiedades físicas del material ABS, evaluado en el software de simulación, se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Propiedades físicas del ABS en el software.

Propiedad	Valor
Densidad	1.06 g/cm <sup>3</sup>
Límite elástico	20 MPa
Resistencia a la tracción	29.6 MPa
Módulo de Young	2.24 GPa

La información de la tabla 3, tiene coincidencia en el valor de la resistencia a la tracción con respecto a lo que se presentó en la tabla 1, mostrando un porcentaje de error del 2.9% para esa propiedad física.

A continuación se tiene la tabla 4, con todos los datos obtenidos en la simulación del análisis de elemento finito en las probetas de material ABS, impresas en 3D.

Una de las observaciones que se mencionan para este estudio, FEM, radica en establecer la cantidad de elementos en el modelo para la simulación, que fue de 4284 elementos con 8700 nodos para el caso de 5 [kN], 10876 elementos y 20717 nodos para 10 [kN] y 15895 elementos con 30327 nodos en el caso de 15 [kN], para el mallado del sólido y la realización del elemento finito.

Tabla 4 Datos de simulaciones en probeta para ensayo de impacto, 3D.

Arreglo	Relleno [%]	Von Mises [MPa]			Desplazamiento [mm]			Esfuerzo Plano XY [MPa]		
		Carga kN			Carga kN			Carga kN		
		5	10	15	5	10	15	5	10	15
Lineal	20	0.55	1.1	1.65	0.0018	0.0034	0.0056	0.11	0.22	0.33
	40	0.23	0.47	0.69	0.0002	0.0004	0.0006	0.034	0.069	0.10
	60	0.18	0.37	0.56	0.0001	0.0003	0.0004	0.027	0.055	0.08
	80	0.24	0.49	0.74	0.0001	0.0002	0.0004	0.091	0.18	0.27
Hexagonal	20	0.38	0.77	1.16	0.0026	0.0053	0.0082	0.088	0.17	0.26
	40	0.42	0.84	1.26	0.0005	0.0011	0.0017	0.082	0.16	0.24
	60	1.18	2.37	3.55	0.0003	0.0006	0.0009	0.62	1.24	1.86
	80	0.32	0.65	0.98	0.0001	0.0006	0.0003	0.13	0.12	0.38

En la tabla 5, se plasman más datos que se lograron obtener después del proceso de simulación.

Tabla 5 Datos de simulación.

Arreglo	Relleno [%]	Convergencia	Tiempo de ejecución
Lineal	20	34.4%	5.62 seg
	40	42.4%	4.72 seg
	60	55.5%	4.93 seg
	80	33.2%	9.01 seg
Hexagonal	20	34.4%	5.43 seg
	40	50.4%	3.91 seg
	60	55.5%	4.95 seg
	80	27.2%	13.2 seg

De la tabla 5, se tiene el dato de la convergencia, que hace referencia a la aproximación del método de elemento finito como un modelo de optimización, lo ideal es un aumento en su valor conforme se actualizan las simulaciones con las cargas asignadas.

Se observa que los datos tienen la tendencia para mejorar los tiempos de fabricación, sin embargo, se tendrán que realizar un análisis llevando a cabo variaciones en algunos de los parámetros de simulación para mejorar la condición del proceso como parte del elemento finito.

Por último, de esta etapa, se rescatan las nuevas tendencias que ofrece el análisis de elemento finito, en este tipo de especímenes para su aplicación en ensayos de pruebas mecánicas. Parte de ello es reestructurar la aplicación de cargas en el modelo, la modificación del mallado con el propósito de generar nuevos resultados y comparar lo obtenido, con otros investigadores que integren información para enriquecer los datos estadísticos de materiales con aplicaciones específicas y mejorar las condiciones de impresión en cada caso de estudio.

### 3. Resultados

En esta sección se tienen diferentes gráficos que permiten comprender el uso del método de elemento finito para la aplicación en probetas elaboradas por manufactura aditiva, impresión 3D, y su evaluación con ensayos mecánicos, lo cual permite tener un acercamiento a las herramientas computacionales en el análisis de materiales procesados. Como parte de los resultados se tienen diferentes gráficos, figura 10, que permiten identificar cuál de los arreglos tiene una mayor precisión de acuerdo con los datos obtenidos en las simulaciones.

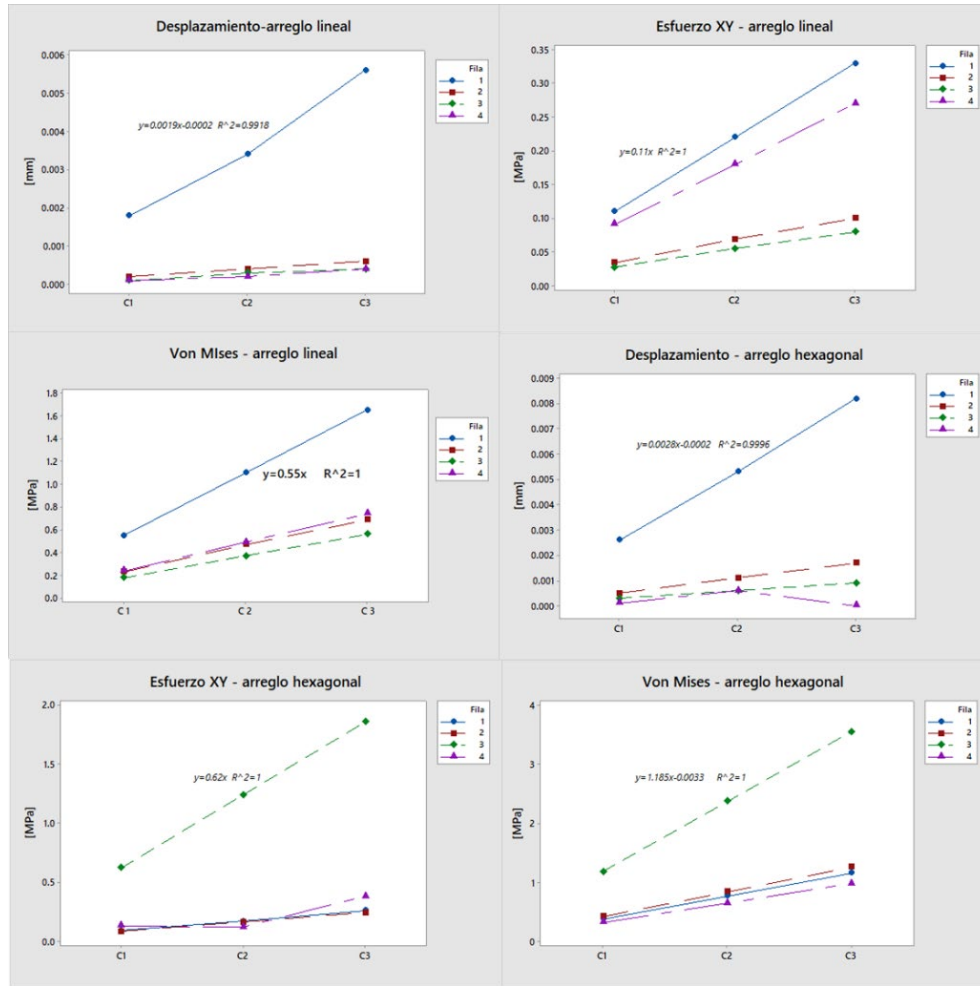


Figura 10 Gráficas del coeficiente de correlación para arreglo lineal y hexagonal.

De las imágenes se muestran los siguientes resultados, que determinan el arreglo que optimiza la elaboración de la probeta y su evaluación en cada uno de los elementos de validación dentro de la simulación, Von Mises, desplazamiento y esfuerzo en el plano XY, representados en la tabla 6.

En la tabla 6, se muestran los resultados complementarios de la simulación y la información contenida en la tabla 4, donde se aprecian dos casos, arreglo lineal y hexagonal, para el segundo caso con el 80% de relleno el coeficiente de correlación indica que se deben analizar con una mayor cantidad de experimentos, debido a que su valor es bajo y no está dentro del rango para ser considerado como un método óptimo en la evaluación que se llevó a cabo con el método de elemento finito en la probeta de impacto elaborada en impresión 3D.

Tabla 6 Resultados del coeficiente de correlación.

Arreglo	Relleno [%]	Ecuación Von Mises	Coeficiente de correlación	
Lineal	20	0.55x	1	
	40	0.25x-0.01	1	
	60	0.23x+0.0033	0.9994	
	80	0.19x-0.01	1	
	Relleno [%]	Ecuación Desplazamiento	Coeficiente de correlación	
	20	0.0019x-0.0002	0.9918	
	40	0.0002x+6x10 <sup>-19</sup>	1	
	60	0.0002x-3x10 <sup>-5</sup>	0.9643	
	80	0.0002x-7x10 <sup>-5</sup>	0.9643	
	Relleno [%]	Ecuación Esfuerzo XY	Coeficiente de correlación	
	20	0.11x	1	
	40	0.0895x+0.0013	1	
	60	0.033x+0.0017	0.9988	
	80	0.0265x+0.001	0.9989	
	Hexagonal	Relleno [%]	Ecuación Von Mises	Coeficiente de correlación
		20	1.185x-0.0033	1
40		0.42x	1	
60		0.39x-0.01	1	
80		0.33x-0.01	1	
Relleno [%]		Ecuación Desplazamiento	Coeficiente de correlación	
20		0.0028x-0.0002	0.9996	
40		0.0006x-1x10 <sup>-4</sup>	1	
60		0.0003x	1	
80		-5x10 <sup>-5</sup> +0.0003	0.0242	
Relleno [%]		Ecuación de Esfuerzo XY	Coeficiente de correlación	
20		0.086x+0.0007	0.9993	
40		0.079x+0.0027	0.9999	
60		0.62x	1	
80		0.125x-0.004	0.72	

## 4. Discusión

El uso del método de elemento finito en la evaluación de probetas de impacto, como caso de estudio, tiene la finalidad de obtener datos que determinan la aplicación del material, aprovechando las condiciones de procesamiento para la fabricación de productos con la manufactura aditiva, a través de la impresión 3D. De acuerdo con diversos investigadores involucrados en el tema de elemento finito [Jaramillo, 2003], consideran que esta herramienta forma parte de un apoyo para el desarrollo de nuevas estrategias para la evaluación de productos y sistemas utilizando especificaciones y parámetros de éstos.

Una de las características que hace viable este trabajo de investigación, se identifica en aprovechar la tecnología de impresión 3D para evaluar las diferentes condiciones en las que se puede fabricar un producto y realizar de manera rápida la simulación para modificar parámetros de mejora.

En relación con las simulaciones de elemento finito, se identifican las condiciones físicas a las cuales se someten los especímenes de prueba realizando cambios sustanciales en el proceso, por ejemplo, mallado y su efecto al aplicar diferentes cargas a los casos de estudio, ofreciendo con ello elementos visuales en donde se puntualiza el análisis, tomando en cuenta que la técnica de FEM es aplicable a otras áreas de análisis [Zárate, 2018].

Los resultados que se obtienen en este trabajo dan pauta a nuevas tendencias de análisis tanto en el espécimen como en el proceso de impresión, obteniendo una sinergia para el desarrollo en productos de prueba y mejorar las simulaciones en forma de retroalimentación.

Es de resaltar que las herramientas de apoyo en evaluaciones de esta índole tienen aplicaciones diversas, lo cual favorece al estudio de materiales y productos con especificaciones y requerimientos puntuales que se evalúan como parte de investigaciones en la ingeniería.

## **5. Conclusiones**

De acuerdo con el desarrollo de este trabajo se logra describir lo siguiente.

El estado del arte para esta temática tiene grandes ventajas, ofrecer tendencias con información veraz y enfoques de investigación tangibles; por otra parte, permite direccionar lo que se desea obtener con las simulaciones de elemento finito en productos elaborados por medio de la impresión 3D, contemplando los parámetros en equipos de impresión. La aplicación de la metodología utilizada en este trabajo tiene por objetivo establecer un proceso controlado para llevar a cabo secuencialmente una aplicación de herramientas en la obtención de datos y resultados que buscan mostrar la importancia de la ingeniería aplicada.

La selección del método de elemento finito como apoyo en la evaluación de materiales en probetas, permite conocer los rangos de valores que se obtienen para

aplicaciones de la industria e ingeniería. El uso de la tecnología de impresión 3D tiene la ventaja de obtener en menor tiempo los objetos o especímenes de prueba para las simulaciones a utilizar en el caso de estudio, a diferencia de los procesos de manufactura convencional en la generación de prototipos.

Las simulaciones permiten visualizar los efectos mecánicos o físicos de objetos sometidos a cargas para obtener los resultados máximos en la optimización. Con respecto a los resultados, el arreglo lineal con relleno del 20% es el más eficiente en el esfuerzo de Von Mises, para el arreglo hexagonal corresponde al 60%, para desplazamiento el relleno de 80% tiene el valor mínimo en ambos arreglos, que hace eficiente esta característica y con relación al esfuerzo en XY en el primer arreglo, lineal, el 20% y para el segundo arreglo el 60% de relleno. Comparando estos datos con la convergencia de los modelos se tiene una coincidencia con el relleno del 60% para los dos arreglos correspondientes.

Un punto importante por mencionar es mantener constantes parámetros de evaluación en las simulaciones de elemento finito, mejorando condiciones de procesamiento y retroalimentar constantemente las simulaciones para optimizar el proceso evaluado. Una característica relevante de este trabajo es mantener latente la generación de líneas de desarrollo e investigación que involucren el uso de herramientas como métodos de elemento finito, simulaciones y manufactura aditiva, con tendencias a la implementar áreas de oportunidad.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Briseño, B., Llanes, E., Rocha, J., Chamba, E., Cuasapud, D., Cárdenas, A. Tecnologías de impresión 3D: evaluación de FDM y Polyjet en la fabricación de autopartes de automóviles. *Enfoque UTE*, Vol. 10, no. 3, pp. 13-29. 2019.
- [2] Esqueda, H., Botello, S., Leal, J. Aplicación del Método de los Elementos Finitos en la Simulación de Cimentaciones Superficiales. *Acta Universitaria*. Vol. 15, no. 2, pp. 29-41. 2005.
- [3] Olaya, N., Zapata, L., Volkmar, D., Morales, J., Vivas, A., Quinceno, A. Consideraciones para la fabricación de pantallas de protección facial por impresión 3D-Covid19. *Tecnológicas*. Vol. 23, no. 49, pp. 1-9. 2020.



- [4] Carraturo, M., Alaimo, G., Marconi, S., Negrello, E., Sgambitterra, E., Maletta, C., Reali, A., Auricchio, F. Experimental and Numerical Evaluation of Mechanical Properties of 3D-Printed Stainless Steel 316L Lattice Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 30, no. 7, pp. 5247-5251. 2021.
- [5] Gardan, J. Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends, *Virtual and Physical Prototyping.*, Vol. 4, no. 1, pp 1-18, 2019.
- [6] Jaramillo, H., Ruiz, A. Análisis y simulación de la prueba de impacto tipo Charpy mediante elementos finitos. *Scientia at Technica*, No. 21, 2003.
- [7] Reza, M., Berto, F., Ayatollahi, M., Reinicke, T. Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds. *Scientific Reports*. no. 12, 2022.
- [8] Zarate, F., Oñate, E. Predicción de fracturas en estructuras de hormigón combinando los métodos de elementos finitos y elementos discretos. *Hormigón y Acero*, 69(s1), p.p. 53-69. 2018.
- [9] Zouaoui, M., Labergere, C., Gardan, J., Makke, A., Recho, N., Alexandre, Q., Lafon, P. Numerical Prediction of 3D Printed Specimens Based on a Strengthening Method of Fracture Toughness. *Procedia CIRP* 81, pp. 40-44. 2019.