

Influencia del ángulo de ataque de partículas abrasivas en biopolímeros Influence of the angle of attack of abrasive particles on biopolymers

L. Cruz-Marcelo ^a, J. Guadalupe-Ramírez ^a, S. Hernández-González ^a, C. R. Torres-San Miguel ^b, T. de la Mora-Ramírez ^{c,*}

^a Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Ingeniería Industrial, Jocotitlán Edo. De México.

^b Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Zacatenco, México

^c Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Jocotitlán Edo. De México.

Resumen

El desgaste constituye un fenómeno crítico que afecta directamente la eficiencia, durabilidad y seguridad tanto de equipos industriales como de componentes en el ámbito biomédico. En sistemas industriales, conduce a fallas prematuras, aumento en los costos de mantenimiento y paros no programados. En aplicaciones biomédicas, como implantes o prótesis, el desgaste genera liberación de partículas y pérdida funcional, comprometiendo la biocompatibilidad y la integridad estructural. El objetivo de este proyecto fue calcular el daño provocado por partículas abrasivas con ángulos de incidencia de 0°, 30°, 60° y 90°, mediante simulaciones numéricas dinámicas explícitas en Abaqus®, utilizando el modelo constitutivo de Johnson–Cook. Se emplearon geometrías tridimensionales de partículas obtenidas por escaneo digital y escaladas a dimensiones micrométricas, aplicadas sobre superficies modelo durante un tiempo de 0.3 segundos de contacto. Estas simulaciones permiten identificar zonas críticas de desgaste, optimizar diseños de materiales y predecir el desgaste en maquinaria para aplicaciones industriales.

Palabras Clave: Desgaste abrasivo, partículas, Johnson-Cook, UHMWPE.

Abstract

Wear is a critical phenomenon that directly affects the efficiency, durability, and safety of both industrial equipment and biomedical components. In industrial systems, it leads to premature failure, increased maintenance costs, and unscheduled downtime. In biomedical applications, such as implants or prostheses, wear causes particle release and functional loss, compromising biocompatibility and structural integrity. The objective of this project was to calculate the damage caused by abrasive particles with angles of incidence of 0°, 30°, 60°, and 90° using explicit dynamic numerical simulations in Abaqus®, employing the Johnson–Cook constitutive model. Three-dimensional particle geometries obtained by digital scanning and scaled to micrometric dimensions were applied to model surfaces for a contact time of 0.3 seconds. These simulations allow critical wear areas to be identified, material designs to be optimized, and correlations with Archard's law to be established for industrial and biomedical applications.

Keywords: Abrasive wear, particles, Johnson-Cook, UHMWPE.

1. Introducción

El desgaste abrasivo es uno de los principales mecanismos de falla en componentes industriales y biomédicos. El estudio de la influencia del ángulo de ataque permite comprender mejor la relación entre la geometría de partícula, presión de contacto y deformación plástica.

El desgaste de componentes industriales tiene un gran impacto debido a la ausencia de programas de mantenimiento

preventivo, lo que genera fallas prematuras y fallos no programados de maquinaria industrial. Lo cual tiene como consecuencia los paros no programados debido al reemplazo de piezas mecánicas en la maquinaria, así como de sus componentes a corto plazo, lo cual, a su vez implica la reducción de eficiencia de la operación, incremento en el consumo de lubricantes, mayor costo de mantenimiento y reemplazo, el aumento en el tiempo de inactividad del proceso y los gastos de fabricación, a su vez aumenta la huella de

*Autor para la correspondencia: tomas.delamora@tesjo.edu.mx

Correo electrónico: 2020150480226@tesjo.edu.mx (Lilian Cruz-Marcelo), 2020150480467@tesjo.edu.mx (Jimena Guadalupe-Ramírez), saulhgm1@gmail.mx (Saúl Hernández-González), ctorres.@ipn.mx (Christopher Rene Torres-San Miguel), tomas.delamora@tesjo.edu.mx (Tomas de la Mora Ramírez)

Historial del manuscrito: recibido el 21/11/2025, última versión-revisada recibida el 23/02/2026, aceptado el 06/03/2026, publicado el 06/04/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial2.16652>



carbono y se generan mayores desperdicios, causa principal de la baja productividad y/o rentabilidad del negocio (Díaz, Caballero y Corzo, 2018).

Durante los diferentes procesos de erosión de partículas sólidas se pueden generar fracturas bajo diversas condiciones de impacto y tamaño donde la velocidad y el ángulo de impacto son las condiciones más críticas que afectan significativamente la probabilidad y la extensión de fractura de las partículas (Hadavi, 2016).

Las partículas abrasivas impactan a la superficie con distintos ángulos, generando daños variables difícilmente de predecir experimentalmente. El reto es cuantificar este daño mediante simulaciones numéricas que reproduzcan las condiciones reales por contacto.

En función del ángulo de ataque a la de la partícula abrasiva, los parámetros de régimen y las propiedades físicas y mecánicas del material procesado los granos abrasivos pueden penetrar hasta una cierta profundidad gracias a la reserva de energía cinética y al efecto posterior elástico donde las zonas de contacto pueden formar micro cortes en el proceso de deslizamiento a lo largo de la superficie formada (Nargiza, Karimbayeb y Ortikov, 2023).

Es decir, la profundidad de fractura de corte de las partículas y el ángulo abrasivo tienen efectos significativos en el daño de mecanizado, la fuerza de corte y el esfuerzo residual. Mientras que la velocidad de corte y el tamaño del grano abrasivo tienen efectos menores, el daño subsuperficial influenciado por la profundidad de rectificado y el tamaño del abrasivo provoca la formación de grietas por la temperatura y la tensión, siendo la temperatura y la fuerza los factores más críticos (Xiao, Zhan, Jiang y Li, 2025).

Los estudios tradicionales sobre desgaste abrasivo aplicado al UHMWPE están enfocados principalmente en ensayos experimentales en laboratorio, con variables muy idealizadas. Dentro de las simulaciones utilizando métodos numéricos, se utilizan principalmente geometrías simplificadas de partículas “esferas, piramidal, cuadrática, etc.”.

La evaluación del daño y del desgaste se realizan en niveles macroscópicos y posterior a las pruebas experimentales, nunca en tiempo real. En general el presente trabajo integra geometrías reales de partículas, simulación explícita dinámica, modelo Johnson-Cook y análisis de campos internos (CPRESS/PEEQ) para describir el mecanismo físico de abrasión en UHMWPE en función del ángulo de ataque.

El objetivo de este estudio es calcular el daño provocado por partículas abrasivas con diferentes ángulos de incidencia mediante simulaciones numéricas dinámica explícita en Abaqus®, utilizando el modelo de Johnson-Cook.

Para representar de manera realista la interacción entre partículas abrasivas y la superficie de UHMWPE a niveles de micro-abrasión, se utilizó una escala geométrica inversa de 1×10^{-3} sobre las geometrías obtenidas mediante el escaneo tridimensional de partículas de grava. Esta decisión metodológica se realizó en un principio debido a la semejanza morfológica, las partículas abrasivas reales (por ejemplo, alúmina empleada en micro-abrasión) presentan geometrías altamente irregulares, con bordes agudos, múltiples aristas y radios de curvatura variables en el rango micrométrico. La grava de construcción macroscópica constituye un análogo geométrico adecuado debido a su morfología angular y naturaleza amorfa. Al escalar las geometrías escaneadas por un factor de 10^{-3} , se conservan las relaciones geométricas

adimensionales que gobiernan el contacto abrasivo, tales como la relación entre radios de arista y tamaño de partícula, los ángulos sólidos y la proporción área-volumen (Tabla 4). En consecuencia, se mantiene la fidelidad de la forma, que es el parámetro que controla el mecanismo de micro corte y deformación localizada.

2. Metodología.

El material empleado fue una barra de UHMWPE de 30 mm de diámetro, modelo GUR 1020, suministrada por una compañía productora de prótesis en México. Las propiedades mecánicas características (Kurtz, 2004) del material fueron obtenidas por pruebas de nano-indentación, los resultados de las principales propiedades fueron utilizadas en la simulación. Para conseguir la geometría amorfa de la alúmina, se estableció una comparación con la piedra de grava. Tal como se muestra en la Figura 1 presenta una micrografía de 750 X de alúmina de 5 μm , Figura 1a) fotografía a escala real de un montículo de grava, la Figura 1b) las distintas geometrías anisótropas de la grava se asemejan considerablemente a las de la alúmina, por lo que se tomó como patrón geométrico.

La comparación entre la piedra de grava y las partículas de



Figura 1: Comparación de geometría y similitud de alúmina y grava. a) muestra una micrografía de alúmina con un aumento de 750 \times ; b) muestra una fotografía a tamaño real de la piedra de grava; ambas partes presentan similitud en su geometría amorfa (De la Mora, 2023).

alúmina se origina por su similitud en su estructura. Una particularidad clave de las partículas abrasivas es su geometría amorfa con variados ángulos de borde, lo que hace imposible hallar dos partículas idénticas. Esta analogía puede extenderse a varios materiales que emiten partículas con la misma disposición, causando el efecto de desgaste abrasivo de 4 cuerpos.

Estas piezas se escanearon y digitalizaron mediante un escáner 3D para adquirir un archivo en formato STL, que se importaron a un programa informático donde se alineó y renderizó para almacenar como objeto sólido que se emplearía

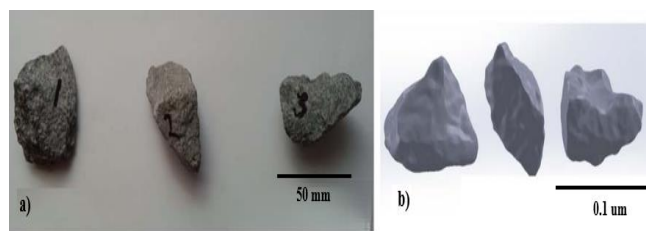


Figura 2: Modelos de piedras de grava. a) Grava seleccionada, b) Grava escaneada y convertida a modelos de cuerpos rígidos (De la Mora, 2023).

en la simulación del ensayo de micro abrasión, la Figura 2 a) muestra el fragmento de grava seleccionada para su escaneo, la Figura 2 b) muestra las piezas de grava escaneadas en STL.

Los modelos que imitan las partículas abrasivas fueron incorporados en el software de análisis numéricos como rígidos discretos, como se muestran en la Figura 3, lo que implica que las partículas adquieren las propiedades de ser más rígidas que el resto de los componentes del modelo y se considera que su deformación es insignificante.

La parte que simula la probeta de ensayo tiene propiedades mecánico-plásticas de UHMWPE añadidas. Las muestras de UHMWPE están situadas en el régimen elástico, actuando de manera lineal de acuerdo con los datos obtenidos en los ensayos de tracción.

El modelo de plasticidad de Johnson-Cook (JC), que es un modelo isotrópico de endurecimiento que abarca los efectos de aflojamiento, endurecimiento por velocidad de deformación y ablandamiento por temperatura, fue empleado para determinar la deformación dinámica del material bajo velocidades de deformaciones elevadas.

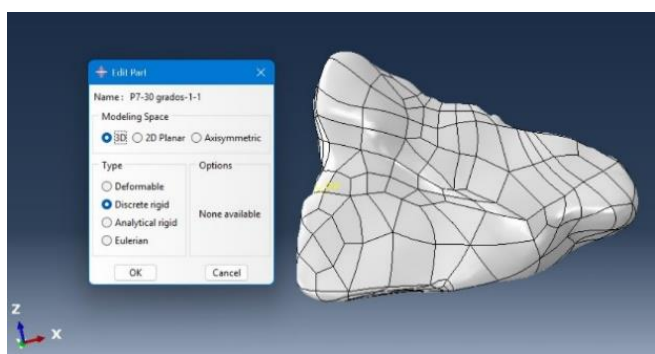


Figura 3: Modelo 3D con características de cuerpos rígidos discretos.

En la Tabla 1 presenta la información empleada en la simulación del régimen elástico del UHMWPE, basándose en el modelo de plasticidad de Johnson Cook incorporado en el programa.

Tabla 1: Constantes calibradas de Johnson Cook (Kurtz, 2004).

Modelo constitutivo	Parámetros
Modelo Johnson-Cook	$A = 16,7\text{MPa}, B = 69,6\text{MPa},$ $n = 0.551, m = 0.859$
Modelo de fractura Johnson-Cook	$D1 = 0.0261, D2 = 0.0263,$ $D3 = 0.349, D4 = 0.247$ $D5 = 16.8$

Basándonos en los datos arrojados por las simulaciones, el estudio nos permitirá observar y comprender mejor la relación entre geometría de las partículas, presión de contacto y su deformación plástica.

En la Figura 4 se presenta la simulación de cada partícula en un perfil isométrico, lo que permite visualizar claramente la posición inicial en la que se encuentra situada antes del contacto con la probeta de material UHMWPE. La Figura 4 a) muestra un ángulo de 0° , la Figura 4 b) un ángulo de 30° , la Figura 4 c) un ángulo de 60° y, finalmente, la Figura 4 d) un ángulo de 90° . En todos los casos, cada partícula fue previamente escaneada y representada en un perfil isométrico

para identificar con precisión su orientación y posición inicial respecto a la superficie de la probeta.

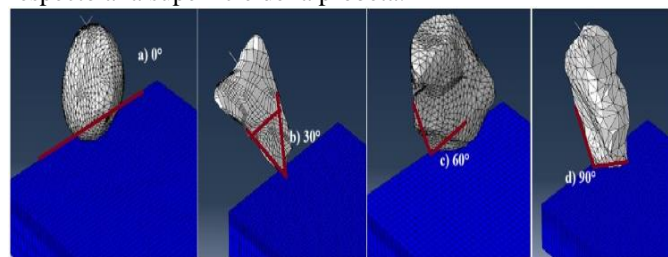


Figura 4: Simulación de vista isométrica de las partículas al contacto con la probeta UHMWPE, mostrando diferentes ángulos de incidencia: a) 0° , b) 30° , c) 60° y d) 90° . (La línea roja indica el ángulo de impacto respecto a la probeta).

Para cada uno de nuestros ángulos se analizaron las ranuras (surcos transversales) que obtiene cada una de nuestras partículas posicionadas desde un mismo punto de origen, posterior a ello también se analizó su desplazamiento longitudinal (distancia) que recorre nuestra partícula sobre nuestra placa de material UHMWPE finalmente su indentación profundidad (H) que esta tendrá para nuestro análisis.

2.1. Condiciones frontera.

El modelo numérico fue resuelto mediante un análisis Abaqus/Explicit con control por desplazamiento aplicado a un cuerpo rígido de referencia. Las condiciones frontera se definieron para reproducir un sistema mecánico con un sólido restringido y un elemento rígido con movimiento prescrito.

2.1.1 Soporte estructural (BC-1-Encastre).

Se aplicó una condición de empotramiento total al conjunto nodal Set-6, correspondiente a la región de soporte del sólido deformable. Esta condición restringe todos los grados de libertad traslacionales:

$$U_1 = U_2 = U_3 = 0 \quad (1)$$

Donde U_i representan los componentes del vector de desplazamiento en los nodos de un modelo numérico para las direcciones X, Y y Z respectivamente.

2.1.2 Reference Point del cuerpo rígido (BC-2) Las restricciones se establecieron en dos etapas

a) Estado inicial (antes del step).

$$U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0 \quad (2)$$

Donde UR_i representan las componentes de rotación de desplazamiento de los nodos en un análisis de elementos finitos.

El RP parte completamente restringido para asegurar condiciones iniciales estáticas.

b) Durante el step dinámico explícito (Step-1, tiempo total 0.3 s).

Se prescriben desplazamientos controlados mediante una amplitud temporal Amp-1:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 0.0015 \cdot Amp-I(t) \\
 U_2 &= -2 \times 10^{-5} \cdot Amp-I(t) \\
 U_3 &= 0, UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Esto implica un movimiento plano controlado en X–Y del cuerpo rígido, sin rotaciones ni desplazamiento vertical, típico de simulaciones de contacto deslizante.

2.1.3 Tipo de elemento.

La amplitud temporal se definió como:

$$Amp-I = \{(0,1), (1,2)\}
 \tag{4}$$

Lo que produce una variación lineal del factor de escala entre 1 y 2, incrementando progresivamente la magnitud del desplazamiento aplicado.

2.2 Tipo de elemento.

El sólido deformable fue discretizado con elementos tridimensionales continuos de tipo C3D8R lo que significa que es:

- Elemento hexaédrico lineal de 8 nodos.
- Integración reducida.
- Control de hourglass activado automáticamente.
- Adecuado para análisis dinámicos explícitos con contacto.

Este tipo de elemento es apropiado para simulaciones con no linealidades geométricas, contacto y grandes deformaciones, manteniendo eficiencia computacional.

2.3 Tamaño de malla.

La malla es estructurada/no estructurada y está compuesta por elementos sólidos C3D8R.

A partir del modelo:

- La discretización corresponde a una malla refinada en la zona de contacto/interacción.
- El tamaño característico del elemento se mantiene uniforme en el cuerpo principal, con refinamiento local en regiones críticas para capturar gradientes de tensión y presión de contacto.
- El número elevado de nodos en Set-6 confirma que se trata de una región extensa de soporte, lo cual indica un mallado volumétrico completo del sólido.

En resumen, se presentan los parámetros fundamentales del modelo de elementos finitos, tales como el esquema de análisis dinámico explícito, las condiciones de contorno, el tipo de elemento y el refinamiento de la malla en la región de contacto, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen de descripción de condiciones frontera.

Parámetro.	Descripción.
Tipo de análisis.	Dinámico explícito.
Elemento sólido.	C3D8R (hexaédrico lineal, integración reducida).
Soporte.	Encastre total en Set-6.
Control de movimiento.	Desplazamiento prescrito en RP (Set-9).
Movimiento aplicado.	Traslación en X y Y, sin rotaciones.
Amplitud.	Lineal creciente (Amp-1).
Zona crítica de malla.	Región de contacto con refinamiento.

3. Resultados.

El análisis de desgaste de este proyecto se llevó a cabo para observar la mecánica del desgaste del material utilizado en equipos industriales como de componentes en el ámbito biomédico, afectando la eficiencia, durabilidad y seguridad.

Los resultados de las simulaciones y pruebas se basan directamente en la comparación de los ángulos de ataque que son 0°, 30°, 60° y 90° grados, así como en las tensiones de von Mises, su deformación plástica e indentación (profundidad) de cada una de ellas, tal como se muestra en la Figura 5.

En la Figura 5a se presenta el surco transversal, donde se aprecian los pliegues generados por el desplazamiento de cada uno de los ángulos. La Figura 5b muestra el desplazamiento individual de los ángulos, así como la evolución del daño producido a lo largo de su trayectoria. La Figura 5c ilustra la profundidad de la ranura generada, la cual constituye un indicador cuantitativo del nivel de daño ocasionado en la superficie analizada.

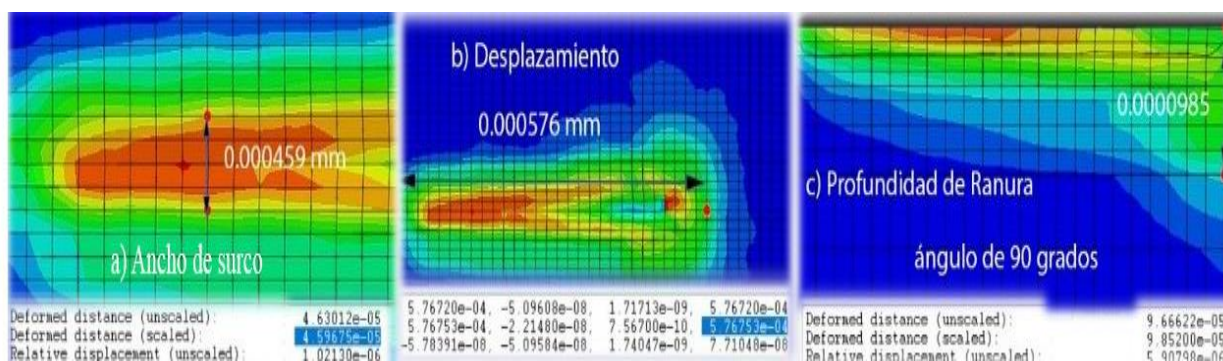


Figura 5: Simulación del proceso de mecanizado con ángulo de filo de 90°, a) ancho de surco, b) desplazamiento y c) profundidad de ranura.

Tabla 3: Comparación de datos arrojados por las simulaciones.

Ángulo	H (mm)	W (mm)	Desplazamiento (mm)
0°	0.000008 3	0.000103	0.00148
30°	0.000061	0.000164	0.000033
60°	0.0001	0.000022 8	0.000103
90°	0.0000	0.000068 5	0.000576

La Tabla 3 muestra los valores de ángulos medidos, estos valores están calculados en (mm) se obtuvo la sección transversal perpendicular al movimiento de las partículas, la distancia de desplazamiento utilizada en la simulación, que interactúan con el material desgastado. H representa la profundidad de ranura en milímetros y W el espesor de surco.

La Figura 6 presenta un análisis de distribución de presión de contacto (CPRESS), por sus siglas en inglés presión de contacto normal la cual es generada por la partícula al contacto con el material UHMWPE, la Figura 6a) presenta la interacción del ángulo de 30°, la partícula muestra un comportamiento no uniforme a lo largo de la interfaz. Se identifican concentraciones localizadas de presión, principalmente en sectores específicos del dominio de contacto, evidenciadas por zonas de mayor intensidad en la escala cromática; la Figura 6b) muestra el ángulo de 60°, en este caso se observa un incremento significativo en la magnitud de la presión máxima, alcanzando valores del orden de 10⁹ MPa. La distribución es más homogénea en comparación con el caso de 30°, con una mayor extensión del

área sometida a presión efectiva; la Figura 6c) muestra el ángulo de 90° el cual muestra una distribución de presión considerablemente más uniforme y extendida a lo largo de toda la interfaz. La ausencia significativa de regiones sin contacto indica una condición de interacción estable y completamente desarrollada. Este escenario representa la condición más crítica en términos de presión normal de contacto, finalmente la Figura 6d) muestra el ángulo de 0° la carga aplicada es predominantemente tangencial, minimizando la componente normal responsable de la presión de contacto.

La Figura 7 presenta un análisis hacia la deformación plástica equivalente (PEEQ, por sus siglas en inglés *Equivalent Plastic Strain*).

La Figura 7a) presenta un ángulo de 30° su distribución muestra niveles bajos de deformación plástica equivalente, la plasticidad se localiza principalmente en una franja superficial cercana a la zona de aplicación de carga, el campo de deformación plástica presenta una extensión limitada tanto en profundidad como longitudinalmente, lo que indica que el estado tensional inducido apenas supera el límite elástico en regiones puntuales; la Figura 7b) asociada a un ángulo de 60° muestra la deformación plástica la cual concentra en la región superficial próxima al punto de contacto inicial, mostrando una distribución más definida y con mayor gradiente en dirección normal a la superficie; la Figura 7c) correspondiente a un ángulo de 90°, alcanza valores más elevados de deformación plástica equivalente, los cuales se distribuyen de manera más continua en la región superior del modelo, finalmente la Figura 7d) asociada a un ángulo de 0°, muestra una distribución de valores máximos más elevados entre los casos analizados, la plasticidad se desarrolla de forma intensa y extensa a lo largo de la superficie de contacto, con una propagación significativa hacia el interior del material.

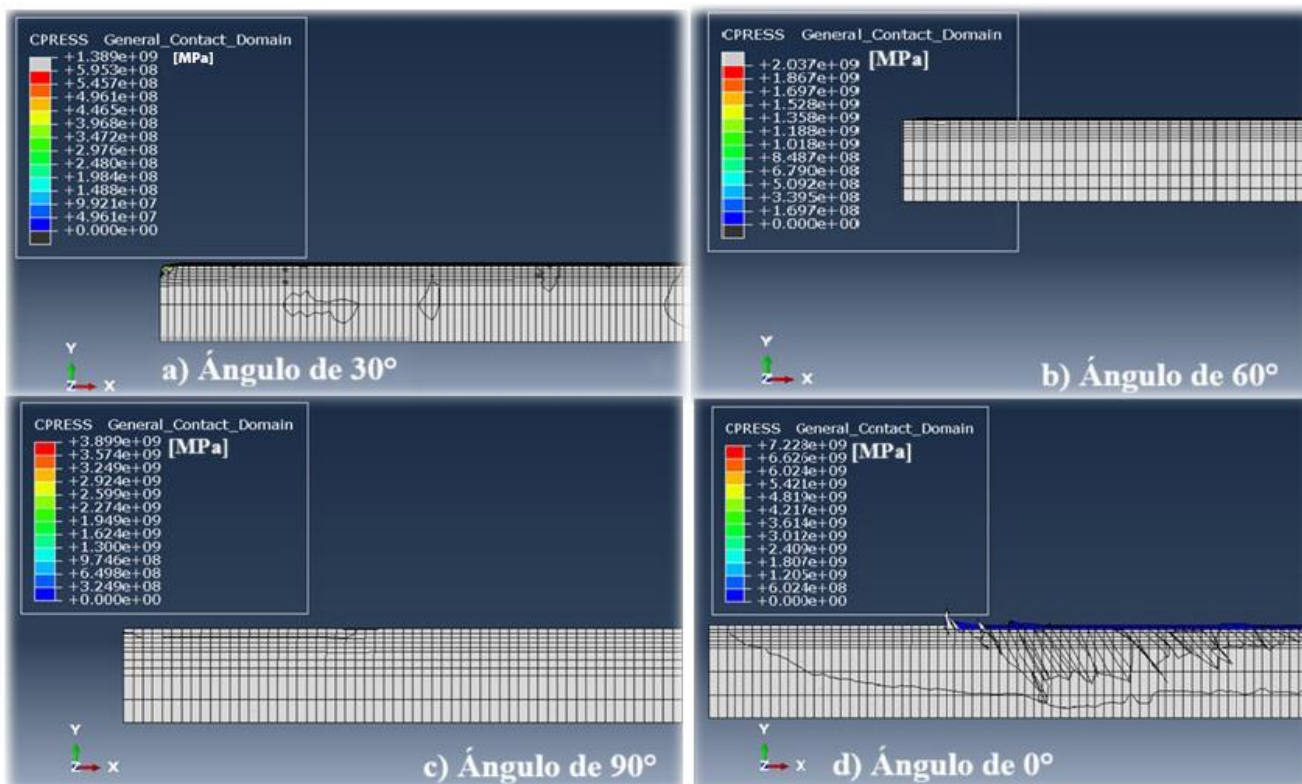


Figura 6: Valor de distribución de la presión de contacto (CPRESS), a) filo de partícula de 30°, b) filo de partícula de 60°, c) filo de partícula de 90°, d) filo de partícula de 0°.

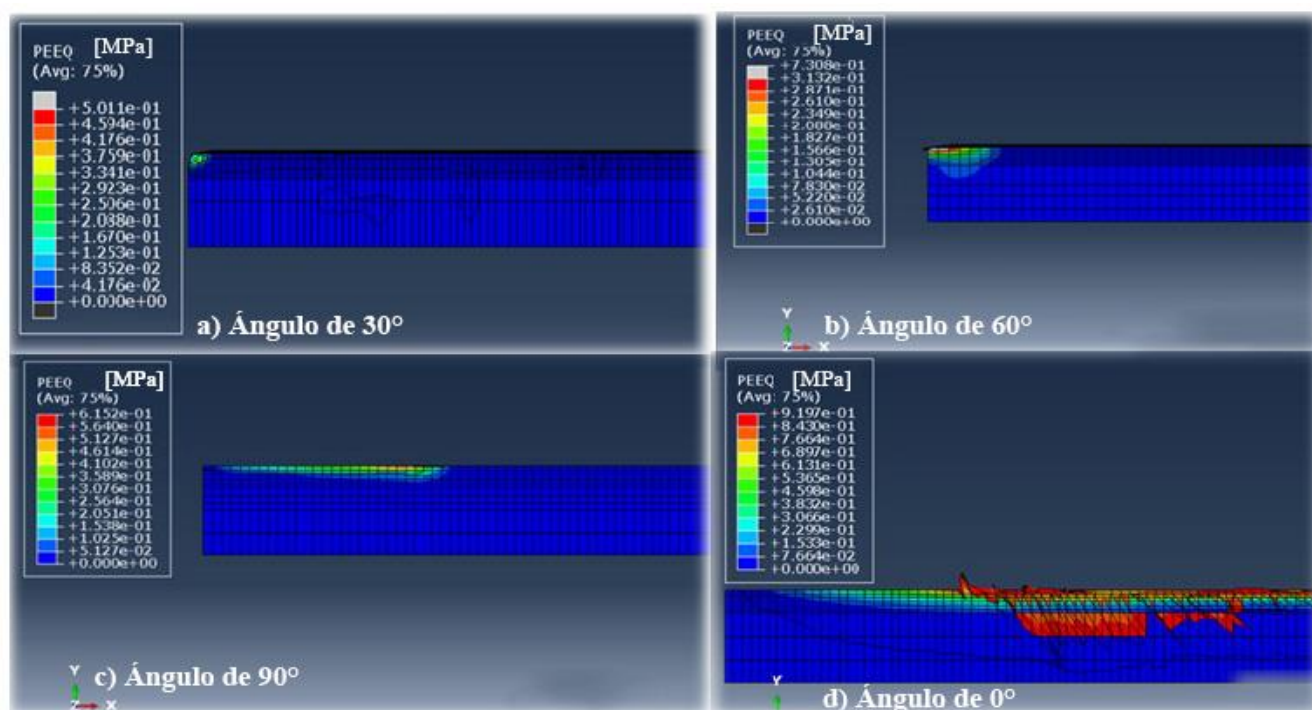


Figura 7: Distribución de deformación plástica equivalente (PEEQ)[Mpa]; a) filo de partícula de 30°, b) filo de partícula de 60°, c) filo de partícula de 90°, d) filo de partícula de 0°.

Tabla 4: Resumen de PEEQ y CPRESS según ángulo de incidencia.

Ángulo de incidencia	PEEQ Máx. observado (deformación plástica equivalente)	Patrón del daño	CPRESS Máx. observado (presión de contacto) MPa	Características de contacto
0°	0.40 – 0.50 (alto)	Amplia zona de arrastre, plasticidad severa.	1.8E-9 – 2.0E-9 Pa (muy alto)	Contacto totalmente deslizante con penetración profunda.
30°	0.05 – 0.10 (bajo-medio)	Daño moderado, transición abrasivo-adhesivo.	1.0E-8 – 3.0E-8 Pa (medio)	Contacto parcialmente deslizante, menor penetración.
60°	0.15 – 0.25 (medio)	Mayor indentación puntual, menor arrastre.	.0E-8 – 1.3E-9 Pa (alto)	Contacto más normal, indentación concentrada.
90°	0.02 – 0.05 (Muy bajo)	Indentación superficial casi elástica.	8.0E-8 – 1.0E-9 Pa (medio-alto)	Golpe normal, mínima deformación plástica.

Tal como lo muestra en la Tabla 4, los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones muestran que para la partícula sin ángulo (0°) genera un mayor daño por contacto prolongado, con PEEQ teniendo un desplazamiento total, en este caso con mayor deformación plástica acumulada, alcanzando valores cercanos a 0.40-0.50, la huella muestra arrastre continuo, micro corte y formación de grandes zonas de material deformado, para valores en CPRESS el contacto alcanza presiones máximas entre 1.8E-9 – 2.0E-9 Pa, el arrastre produce altos picos de presión y fricción, responsables del daño severo.

Para un ángulo de (30°) el cual genera un daño mínimo, La deformación es mucho menor, obteniendo valores entre 0.05–0.10, se observa una zona plástica estable y menos profunda, esto predomina un mecanismo mixto abrasivo–adhesivo, para valores de contacto con CPRESS se tienen presiones entre 1e8 – 3e8 Pa. El contacto es menos agresivo y la carga se distribuye mejor.

En un ángulo de (60°) tiende a incrementar la deformación localizada: 0.15–0.25, la partícula penetra más, pero el deslizamiento es menor comparado con un ángulo de (0°), La plastificación se concentra en una zona más pequeña; para

valores en CPRESS tiene un aumento notable: $6E-8 - 1.3E-9$ Pa, la presión es elevada debido al componente normal del impacto. Finalmente, en un ángulo de 90° , la deformación plástica casi desaparece con valores entre 0.02–0.05 la cual predomina un comportamiento cuasi-elástico, la partícula solo genera una pequeña indentación puntual; teniendo una presión en el rango $8E-8 - 1E-9$ Pa, aunque la presión es alta, el tiempo de contacto es breve, evitando plastificación severa.

4. Discusión.

Diversos autores reportan resultados similares obtenidos para el estudio de partículas abrasivas impactados sobre polímeros. El ángulo de incidencia controla el mecanismo de daño, la distribución de esfuerzo de contacto y acumulación de deformación plástica (Shipway, 2017; Zhang, G., Sun, Y., Gao, H., Zuo, D., Liu, X., 2021)

Un ángulo de 0° produce un mayor daño abrasivo debido al contacto deslizante prolongado, favoreciendo el micro corte, el arrastre de material y la acumulación de deformación plástica. En este régimen, la plasticidad crece porque el desplazamiento tangencial domina sobre el componente normal de la carga.

Los polímeros como el UHMWPE presentan un comportamiento fuertemente dependiente del ángulo de ataque. El máximo desgaste ocurre a ángulos bajos (0° a 20°), donde predomina el mecanismo de abrasión por deslizamiento. A medida que el ángulo aumenta, el componente normal de la carga se incrementa, favoreciendo la indentación sobre el arrastre.

Las partículas abrasivas causan mayor desgaste bajo contacto deslizante, como se observó en el ángulo de 0° . En contraste, el impacto a 90° genera principalmente indentación localizada y deformación superficial, con menor remoción de material, ya que el tiempo efectivo de deslizamiento es reducido.

5. Conclusiones.

El escaneo y digitalización de partículas de grava, seguido de su escalamiento a dimensiones micrométricas, constituye una alternativa válida para reproducir la geometría real de partículas abrasivas y estudiar su interacción con superficies poliméricas.

El ángulo de ataque influye directamente en la magnitud y el tipo de daño generado:

- 0° : daño severo por deslizamiento, con alta deformación plástica y arrastre de material.
- 30° : daño moderado, con transición entre mecanismos de abrasión y compresión.

- 60° y 90° : contacto más localizado, predominando la indentación sobre el micro corte.

El modelo constitutivo Johnson-Cook permitió predecir adecuadamente la respuesta mecánica del UHMWPE bajo condiciones de abrasión dinámica, capturando la distribución de deformación plástica y presión de contacto. Los resultados obtenidos son aplicables al diseño de superficies resistentes al desgaste y a la optimización de materiales poliméricos para aplicaciones industriales y biomédicas.

Agradecimientos.

Agradecemos al Tecnológico de estudios superiores de Jocotitlán, así como Dr. Tomas de la Mora Ramírez por su apoyo, asesoría y tiempo empleado en la elaboración de este proyecto de investigación.

Referencias

- De la Mora, T. (2023). Numerical simulation of the rheology of alumina. *Materials Research*, 10. doi:10.1088/2053-1591/ad058d
- Díaz, Caballero y Corzo. (2018). CIC-Erosión: herramienta computacional para la predicción del desgaste erosivo en líneas de producción y transporte de hidrocarburos. *Revista Ion*, 20. doi:http://dx.doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018001
- Hadavi, V. M. (2016). Numerical and experimental analysis of particle fracture during solid particle erosion, Part II: Effect of incident angle, velocity and abrasive size. *Science*. doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.009.
- Kurtz, M. (2004). *The UHMWPE Handbook, Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement*. Academic Press, 379. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/291958813
- Nargiza, M., Karimbayeb, D. & Ortikov, O. (2023). Simulation of a single interaction of an abrasive particle with the surface of a part during blasting. *EDP Sciences*, vol.83. doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304026
- Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Butterworth-Heinemann. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780081009109/tribology
- Wang, A. E. (2001). Wear mechanisms and wear testing of UHMWPE in total joint replacements. 63–71. doi: https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90030-6
- Xiao, X., Zhan, J., Jiang, S., Li, X. (2025). Study of machining damage in single abrasive grain cutting alumina ceramics by DEM simulation, *SCIENCE DIRECT, Recista de procesos de fabricación*, Vol.143, 19-233. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.04.027
- Zhang, G., Sun, Y., Gao, H., Zuo, D., Liu, X. (2021). A theoretical and experimental investigation of particle embedding and erosion behaviour of PDMS in micro-abrasive air-jet machining. *Wear*, 486-487. doi:https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204118