DEPARTMENT OF MECHANICAL & AEROSPACE ENGINEERING

University of Strathclyde Engineering

Simulación de Sinterizado Selectivo Láser (SLS): Penetración Láser en Medio Granular

Gauld R, Lucas J and Canga P

Supervisor: *Dr. Haeri S*

Departmento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial, University of Strathclyde, Glasgow

17/03/2017

For the part-fulfillment of the degree of (MEng) Mechanical Engineering

Website URL: http://selectivelasersintering.weebly.com

REF UK TOP 20 RESEARCH-INTENSIVE UNIVERSITY

THE UK UNIVERSITY OF THE YEAR WINNER

THE UK ENTREPRENEURIAL UNIVERSITY OF THE YEAR WINNER

The place of useful learning

The University of Strathclyde is a charitable body, registered in Scotland, number SC015263

Conte nido

1. Abstract 3
2. Contexto ejecutivo 3
3. Página Web 3
4. Introducción 4
5. Objetivos 4
6. Dirección de Proyecto 5
6.1 Estructura 5
6.2 Gestión de plazos 6
6.3 Presupuesto 6
6.4 Riesgos 6
6.5 Comunicación interna y control de documentación 7
6.6 Entregables 7
9. Fabricación aditiva 7
9.1 Modelado de deposición por fusión 7
9.2 Material Jetting 8
9.3 Binder Jetting 8
9.4 Laminación por capas 8
9.5 Fotopolimerización 8
9.6 Deposición energética directa 9
9.7 Fusión de cama de polvos (PBF) 9
9.8 Ventajas del Sinterizado selectivo por láser (SLS) 9
10. Simulación con Método de Elementos Discretos (DEM) 9
10.1 Teoría 9
10.2 EDEM Software 10
10.3 Simulación inicial 10
10.4 Simulación final 12
11. Trazado de rayos 14
11.1 Introducción 15
11.2 Definición del modelo de trazado de rayos 15
11.3 Resultados del MATLAB 17
11.4 Futuras evoluciones del modelo 18
12. Modelo de Negocio 18
12.1 Estructura de Negocio 18
12.2 Servicios 19

12.3 Financiación 19
12.4 Localización 19
12.5 Evaluación de mercado 19
13. Reflexiones sobre el trabajo como equipo 19
13.1 Estructura 19
13.2 Comunicación 20
13.3 Gestión de tiempos 20
14. Conclusión 20

1. Abstract

La fabricación de aditivos, o la impresión 3D, es el proceso de transformar modelos digitales en estructuras físicas. SLS (Selective Laser Sintering) es una forma de fabricación aditiva en la que un láser se utiliza como la fuente de energía primaria para calentar las partículas de un material comenzando un proceso de sinterización que creará una capa de la parte final. La tecnología ofrece una amplia gama de soluciones a través de muchas industrias de ingeniería, debido a su capacidad para formar fácilmente geometrías muy complejas directamente desde modelos CAD digitales. Este proyecto tiene como objetivo comprender los principios físicos del proceso SLS, explorar la viabilidad de la simulación y discutir posibles trabajos futuros que pueden ayudar al desarrollo de la tecnología.

2. Contexto ejecutivo

Este proyecto se realizó como parte del grado de ingeniería mecánica MechEng en la Universidad de Strathclyde, Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial. Como se describe en el formulario de descripción de la asignatura o módulo ME519:

"Este módulo tiene como objetivo dar a los estudiantes una auténtica experiencia de gestión y contribución a un complejo proyecto de grupo. Esto incluirá una oportunidad para demostrar el dominio de los aspectos técnicos del proyecto, además de demostrar competencia en la gestión de proyectos, gestión de riesgos técnicos y evaluación de riesgos de seguridad ".

El proyecto fue propuesto para investigar la viabilidad de simular el proceso de Sinterización Láser Selectiva (SLS). SLS es una forma de fabricación aditiva en la que se utiliza un láser para calentar partículas de un material para realizar un proceso de sinterización. Basándose en el modelo 3D, se crea una estructura física superponiendo diferentes capas sinterizadas con los rayos láser. Antes de que pueda tener lugar la aplicación del láser, las partículas de material deben colocarse en una capa delgada en forma de un "lecho de polvo". Mediante la explotación de simulaciones de Método de Elemento Discreto (DEM), se modela la interacción del lecho de polvo y del rodillo; A continuación, mediante la conversión de los resultados en un formato compatible con MATLAB, un algoritmo de trazado de rayos se utiliza para cada haz de láser individual para calcular el punto de contacto principal con el lecho de polvo y su ángulo de reflexión.

El proyecto se inició en octubre de 2016 y terminó en marzo de 2017. El equipo del proyecto consistió en dos estudiantes de tiempo completo de ingeniería mecánica de la Universidad de Strathclyde y un estudiante de Ingeniería Mecánica en intercambio de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón en España. El proyecto fue supervisado por el Dr. Sina Haeri, profesor de la Universidad de Strathclyde especializada en tecnología de polvo.

3. Página Web

Como marcan las directrices para el ME519, uno de los resultados del proyecto era un sitio web promocional. El sitio web para este proyecto fue creado usando Weebly, un servicio gratuito de alojamiento web. El sitio web se puede encontrar a través de la siguiente URL:

http://selectivelasersing.weebly.com

El propósito de crear el sitio web fue crear una plataforma donde el grupo pudiera compartir información con el público. El sitio web tenía la intención de educar al lector sobre los

principios básicos del proceso SLS, proporcionar una descripción de los antecedentes de los miembros del grupo y discutir la motivación para el proyecto.

4. Introducción

Las oportunidades tecnológicas y económicas derivadas de la Fabricación Aditiva (Additive Manufacturing), un término utilizado para describir las tecnologías de producción de objetos 3D mediante la adición de capa de material sobre capa, son abundantes. Por ejemplo, la producción viable de piezas multifuncionales de bajo peso en las industrias aeroespacial y automotriz reduce su carga ambiental al disminuir la cantidad de materia prima requerida y aumentar la eficiencia del combustible. En el otro lado del espectro, la aceleración en la producción de protésis 3D de bajo coste, modelos de extremidades para cirugías de prueba y herramientas médicas, dará lugar a la personalización de los servicios de salud.

La técnica de la fusión del lecho del polvo (PBF) es una prometedora tecnología AM que ha sido explotada recientemente por diversas industrias como la automotriz, aeroespacial y médica. En esta técnica, se dispersan partículas poliméricas o metálicas sobre un pistón de fabricación para formar un lecho de polvo fino con un rodillo o paleta. Entonces se enfoca un haz láser (o electrón) sobre el lecho que escanea un patrón de trama de una sola capa de la pieza sinterizando los granos de polvo en su trayectoria. Este proceso se repite hasta que el producto se fabrica con éxito. Utilizando un haz láser como fuente de calor, el proceso se denomina sinterización láser selectiva (SLS).

La tecnología SLS ofrece un beneficio sustancial para la producción rápida de prototipos y, sobre todo, para piezas en las que el peso es un factor crítico. Sin embargo, la naturaleza altamente compleja del proceso está obstaculizando el desarrollo de la tecnología y la introducción de nuevos materiales. Como resultado, la selección de materiales para dispositivos SLS y su funcionamiento sigue siendo actualmente una tarea empírica que depende de la intuición y el "know-how" de ingenieros altamente cualificados.

El proceso SLS es multi-escala en el sentido de que el comportamiento y las características de las partículas de polvo, tales como la distribución del tamaño y la forma, afectan la calidad de las piezas fabricadas. DEM, un esquema numérico basado en partículas basado únicamente en los primeros principios, es capaz de simular fiablemente la etapa de preparación del lecho de polvo del proceso. Sin embargo, debe extenderse para simular con precisión las etapas de calentamiento y sinterización láser para proporcionar predicciones cuantitativas de las características mecánicas de la parte final. Esto es necesario para aprovechar todo el potencial de esta técnica para optimizar y comprender el proceso SLS.

5. Objetivos

El proyecto fue propuesto para explorar las tecnologías AM actuales, desarrollar una comprensión de SLS y realizar una evaluación de viabilidad en la simulación del proceso SLS.

- Crear una simulación detallada de DEM (Discrete Element Modeling) para un lecho de partículas que implica un rodillo y una geometría compleja. Esta actividad incluye la familiarización del software DEM junto a una revisión bibliográfica de los antecedentes teóricos, la implementación de un modelo simple de geometría de partículas (esferas perfectas) y la mejora de este modelo para incluir geometrías de partículas complejas (partículas individuales compuestas de múltiples esferas).

- Implementar una función de seguimiento de rayos en el modelo de lecho de partículas para evaluar la geometría del láser y la penetración en el lecho. Para la implementación del trazado de rayos, la primera tarea será la familiarización con el lenguaje de programación C ++ junto con una revisión bibliográfica de los antecedentes teóricos. Esto será seguido por la conversión del código C ++ a una función MATLAB para que el trazado de rayos pueda aplicarse a la simulación de DEM previamente creada.
- Análisis de la penetración del lecho incluyendo la optimización y discusión de los efectos del modelo láser.

Con respecto al segundo objetivo, la familiarización del lenguaje de codificación C ++ no era necesaria, ya que el objetivo cambió durante el proyecto para desarrollar un algoritmo único de trazado de rayos que pudiera ser usado con MATLAB e ingresar directamente los resultados EDEM. La decisión fue tomada por la Junta de Proyectos para cambiar el objetivo con el fin de proporcionar al grupo la oportunidad de escribir su propio algoritmo de trazado de rayos.

Con respecto al último objetivo contenido aquí, se evaluó el efecto de la velocidad de rotación del rodillo sobre el lecho de polvo. Esto se realizó en un esfuerzo para optimizar la relación entre la velocidad de rotación y de traslación del rodillo.

Este informe describe los resultados de estos objetivos, discute la gestión de proyectos y el trabajo futuro potencial. Además, se propone un modelo de negocio contemplado en este proyecto.

6. Dirección de Proyecto

6.1 Estructura

Para establecer una estructura de gestión, el proyecto debía desglosarse en sus partes constitutivas. Sin embargo, al comienzo del proyecto, cuando el grupo tenía poco conocimiento sobre el tema, era difícil saber cuánto tiempo duraría cada parte del proyecto. Por lo tanto, el proyecto se dividió en tres partes: simulación, investigación y gestión. Todos los miembros del grupo estaban trabajando para obtener un título de Ingeniería Mecánica. Por lo tanto, sus antecedentes eran similares. Sin embargo, Lucas J había completado un módulo sobre computación en un nivel superior avanzado en la Academia Forfar. En consecuencia, Jack tomó el papel principal en el desarrollo de la secuencia de comandos MATLAB. Gauld R tenía experiencia de trabajar en proyectos durante pasantías en la industria, y por lo tanto tomó el rol de dirigir el grupo. Canga P asumió el papel de investigar la literatura y la teoría relevantes para el proyecto.

Dirección de Proyecto (Gauld R.):	La persona responsable de garantizar que el proyecto se entregó a tiempo, al presupuesto y al estándar de calidad requerido (dentro de las especificaciones acordadas). La persona que se comunica con el supervisor y los miembros del equipo para organizar las reuniones (reuniones del grupo cada semana y reuniones de la Junta del Proyecto cada 4 a 6 semanas).
Ingeniería de Sistemas (Lucas J):	La persona responsable de asegurar que los paquetes de software funcionaron correctamente y se lograron los resultados deseados.

Investigación y planificación estratégica (Canga P):	Persona responsable de revisar toda la base teórica y matemática del proyecto, así como viabilidad y utilidad en el panorama industrial presente.
Project Board:	Este grupo consistió en Canga P, Gauld R, Lucas J y el supervisor del grupo, Haeri S.

6.2 Gestión de plazos

La línea de tiempo del proyecto se estableció utilizando Microsoft Project, que es un software de gestión de proyectos utilizado por los directores de proyectos para desarrollar planes de proyectos, gestionar presupuestos y limitaciones de tiempo y asignar tareas a los miembros del proyecto. En primer lugar, se creó un diagrama de Gantt para formar una línea de tiempo para el proyecto. Al hacer un gráfico de Gantt, el proyecto se dividió en actividades separadas, que en conjunto formaron la totalidad del proyecto. A cada actividad se le asignó una limitación de tiempo, que se basó en la carga de trabajo esperada para completar la actividad. Dentro del diagrama de Gantt, a cada miembro del equipo se le asignó la responsabilidad de completar varias actividades dentro de su respectiva asignación de tiempo ya una norma aceptada por la Junta del Proyecto. Sin embargo, se esperaba que todos los miembros aportaran esfuerzos, en diferentes grados, para completar la carga de trabajo de todas las actividades.

El Gantt chart fue revisado y enmendado por el Project Manager (PM) en varios puntos a lo largo del proyecto para dar cuenta de los problemas inesperados que surjan.

6.3 Presupuesto

Según las directrices para ME519, cada grupo tenía derecho a un presupuesto de £100 por persona para completar su proyecto. Por lo tanto, nuestro grupo - compuesto de tres miembros - tenía un presupuesto total de £ 300. El proyecto se basó exclusivamente en la simulación y no hubo materiales físicos ni bienes necesarios para completar el proyecto. El grupo tuvo acceso libre a ambos paquetes de software que fueron necesarios para el proyecto. Típicamente dentro de proyectos de la simulación, el coste de funcionar la maquinaria también necesita ser considerado. Sin embargo, para este proyecto el coste de funcionamiento de la maquinaria también fue gratuito a través de la Universidad de Strathclyde. Por lo tanto, no había otros factores fiscales a considerar y no se incurrieron en costos durante todo el proyecto. Así, al final del proyecto, el presupuesto se mantuvo en un valor de £ 300.

6.4 Riesgos

Como el proyecto estaba basado en la simulación, los riesgos involucrados eran limitados y sobre todo basados en el tiempo. Un gran riesgo asociado con el proyecto fue el tiempo de simulación a gran escala. Si hubiera habido errores recurrentes en la simulación, podría haber tenido un impacto significativo en la línea de tiempo del proyecto, ya que era requisito previo para la implementación del algoritmo de trazado de rayos. Para minimizar el riesgo, hubo una ventana de margen durante el periodo de exámenes y vacaciones con la segunda revisión de la literatura sobre la penetración de rayos como la única tarea programada, seguida de la familiarización de la teoría de trazado de rayos. Cualquier error en la simulación podría haber sido corregido durante este tiempo, ya que podría haber sido realizado junto con estas tareas. Un riesgo adicional fue la falta de experiencia del grupo en la operación del paquete de software EDEM. Sin embargo, había una abundancia de recursos disponibles en línea por lo que este riesgo no se consideró sustancial.

6.5 Comunicación interna y control de documentación

Como el plan estratégico para el proyecto implicaba asignar a los miembros del grupo la responsabilidad de completar las actividades, era vital tener una comunicación clara y fácil en todo el equipo. En consecuencia, el PM organizó reuniones semanales de grupo, en las que la Junta del Proyecto discutió el progreso del proyecto y sus sub-actividades, así como cualquier discrepancia del plan del proyecto encontrado. Además, se creó un chat privado en grupo de Facebook al que todos los miembros del equipo tenían acceso. Tener un medio en línea de comunicación demostró ser muy eficaz, ya que permitió a todos los miembros a comunicarse eficientemente entre sí en cualquier momento. Un riesgo significativo para el proyecto fue el potencial de pérdida de documentos o datos valiosos. Como medida de precaución, las instalaciones de almacenamiento físico y virtual se utilizaron con frecuencia para actualizar y almacenar datos y documentos. Se creó una cuenta de Dropbox compartida para que todos los miembros puedan acceder. Esto permitió a los miembros un lugar común para modificar el trabajo compartido y cargar documentos relevantes.

6.6 Entregables

Statement of Purpose:	14/10/2016
Interim Report/Presentation:	18/11/2016
Final Report/Presentation:	27/03/2017
Website:	27/03/2017

Toda la documentación mencionada anteriormente fue entregada en formato electrónico (documento PDF) y por copia impresa a los Servicios Centrales del Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial.

9. Fabricación aditiva

El término Fabricación Aditiva (AM) se refiere a un grupo de procesos que se basan en la superposición sucesiva de capas de material, usualmente polvos, hasta que se logra el objeto deseado. Este tipo de fabricación implica una nueva revolución industrial. Permitiendo, entre otras ventajas, dispensar mucha maquinaria y soportes, reproducir cualquier geometría que se pueda diseñar con una computadora común, ofrecer una respuesta inmediata a las cambiantes necesidades del mercado y la creciente demanda de diferenciación y personalización De los productos por los consumidores. Tales procesos de fabricación aditivos se conocen comúnmente como procesos de impresión 3D. Además, la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) clasificó los procesos AM en un rango de 7 subcategorías diferentes:

9.1 Modelado de deposición por fusión

En este proceso, el material se extrae a través de una boquilla que transfiere continuamente calor al material a una presión constante. Esta es la característica principal que distingue FDM de otros procesos AM. A continuación, el material se deposita capa por capa. La boquilla puede moverse horizontal y verticalmente para asignar correctamente la nueva capa. Con respecto a las materias primas, polímeros y plásticos se usan típicamente en este proceso. Una de las principales ventajas, es el hecho de que puede utilizarse plástico ABS - un material que tiene propiedades muy deseables. La principal desventaja es que el radio de la boquilla reduce la calidad final del producto, ya que su tamaño está limitado por el tamaño de la boquilla.

9.2 Material Jetting

El funcionamiento interno de este proceso es similar al de una impresora bidimensional de chorro de tinta. El material es inyectado contra una superficie para construir el producto capa por capa. Una boquilla conectada a una plataforma, con movimiento horizontal, se utiliza para chorro del material. Una vez extendido, el material se endurece usando luz ultravioleta. Como en el caso anterior, los plásticos y polímeros son adecuados para este proceso (HDPE, PS, PMMA, PC, ABS, HIPS y EDP). Las ventajas de este proceso son que es muy preciso y permite al usuario hacer modificaciones a partes del producto, cambiando el color, por ejemplo, ya que el chorro no es continuo. Las desventajas son que es un proceso costoso.

9.3 Binder Jetting

Este proceso tiene dos materiales: una base en polvo y un aglutinante - que actúa como un adhesivo para las capas sucesivas. Un cabezal de impresión, que tiene movimiento horizontal en los ejes x e y, deposita capas alternativas de polvo y aglutinante. Puesto que el cabezal de impresión no se mueve en el eje z, la plataforma de soporte donde se está construyendo el objeto debe bajarse después de cada capa. Debido al método de unión, no se recomienda el tipo de productos producidos para las piezas estructurales. El proceso se puede realizar en metales (acero inoxidable), cerámica (vidrio) y polímeros (ABS, PA, PC, etc.). Las ventajas de este proceso son la gama de materiales disponibles y la capacidad de cambiar las propiedades mecánicas del producto final cambiando la combinación aglutinante/polvo. La principal desventaja es que los productos necesitan comúnmente una etapa posterior al procesamiento que es costosa y que consume mucho tiempo.

9.4 Laminación por capas

Este proceso utiliza la Fabricación de Objetos Laminados (LOM) y la Fabricación de Aditivos Ultrasónicos (UAM). Requiere post-procesamiento con una máquina CNC que elimina el exceso de material. LOM utiliza un principio de funcionamiento como Binder Jetting, pero con LOM, el material es papel y se utiliza un adhesivo en lugar de un aglutinante. Se emplea un método de incubación cruzada para el proceso de impresión. Los productos laminados no son adecuados para aplicaciones estructurales y se utilizan comúnmente para modelos estéticos. UAM requiere una cantidad relativamente baja de energía ya que el metal no se funde. El proceso permite el uso de cualquier material adecuado para ser laminado. Las ventajas son la velocidad, la facilidad de manejo del material y el bajo costo. Las desventajas son que el post-procesamiento es necesario para lograr buenos resultados y hay un uso limitado con los componentes creados.

9.5 Fotopolimerización

Este proceso se lleva a cabo también capa por capa y utiliza una resina de fotopolímero, que se endurece con luz UV cuando se desea. Una plataforma mueve el objeto hacia abajo después de cada capa se agrega. A diferencia de los métodos basados en polvo, la materia prima en este proceso está en fase líquida. Por lo tanto, no hay soporte estructural para la materia prima al construir el producto. Este proceso utiliza polímeros (fotopolímero curable por UV) y resinas. Las ventajas son que es un proceso rápido, que permite la construcción de grandes áreas y la calidad de los productos finales es muy buena. Las desventajas son el coste y el enorme volumen de material de desecho.

9.6 Deposición energética directa

Este proceso es complejo y a menudo se utiliza para reparar o agregar material a componentes ya fabricados. Hay una boquilla conectada a un brazo extensible que inyecta material en la parte deseada del componente. Es como el proceso de FDM, pero en este caso el rango de movimiento de la boquilla es más alto, permitiendo que se coloque una capa intermedia. Las materias primas pueden ser de plástico o de cerámica, pero los metales son los más utilizados, como el cobalto o el titanio. Las ventajas son que es un proceso único adecuado para la reparación de componentes. Las desventajas son los materiales limitados disponibles y la etapa de post-procesamiento requerida.

9.7 Fusión de cama de polvos (PBF)

PBF se refiere al grupo de procesos -de los cuales SLS forma parte- que utilizan un lecho de polvo y energía en forma de calor para unir las partes deseadas para formar el producto final. Varios otros ejemplos de procesos PBF son Electro-Beam Melting (EBM), Sinterización por haz selectivo (SBS) o Selective Laser Melting (SLM). Existen varios mecanismos para "aplanar" el lecho de polvo, tal como un rodillo o una cuchilla. Cualquier material en polvo puede ser usado en este proceso, pero los más comunes son metales y polímeros. Las ventajas de este tipo de proceso son que es relativamente barato, adecuado para prototipos, compatible para piezas de pequeña escala y tienen una amplia gama de opciones de material. Las desventajas son la alta potencia necesaria en comparación con otras tecnologías AM y la falta de integridad estructural en la parte final.

9.8 Ventajas del Sinterizado selectivo por láser (SLS)

SLS es generalmente más barato y más rápido que los otros procesos y tiene el potencial de crear partes más complejas usando una variedad más amplia de materiales a medida que se entiende mejor. Esto es posible ya que el polvo crea su propia estructura de soporte, y el post-procesamiento para SLS es mínimo en comparación con muchos otros procesos AM ya que no hay necesidad de curado secundario4. Sin embargo, la desventaja principal es en su integridad estructural, como se mencionó anteriormente. Esto se debe a la naturaleza porosa de un polvo-cama y su distorsión térmica. La optimización del proceso para reducir el impacto de estas dos características problemáticas brinda la oportunidad de que SLS se convierta en uno de los procesos AM más deseables.D

10. Simulación con Método de Elementos Discretos (DEM)

10.1 Teoría

El Método de elementos discretos (DEM) es un método numérico que se utiliza para resolver el movimiento individual de una gran colección de pequeñas partículas. Si está presente algo de fuerza que hace que las partículas fluyan, el sistema mostrará a menudo características tanto de sólido como de líquido. Esto se conoce comúnmente como flujo granular. A esta escala, los efectos del fluido intersticial de baja viscosidad pueden ser ignorados y el sistema sólo se ve afectado por la gravedad y las fuerzas repulsivas entre partículas. Usando DEM, se puede modelar la evolución a lo largo del tiempo de una gran colección de partículas con una variedad de propiedades y geometrías. DEM trabaja resolviendo las ecuaciones de movimiento de Newton para el movimiento de traslación y rotación de cada partícula individual en el sistema. A continuación, las colisiones de partículas se modelan considerando dos fuerzas: interacción de partículas atractivas y contacto6. Existe una amplia gama de modelos de contacto en DEM que permite modelar muchos problemas de flujo granular, a partir de una diversidad de escenarios.

Con los recientes avances en el poder de cálculo, se ha hecho posible simular la dinámica de millones de partículas en un procesador individual. Esto ha permitido realizar simulaciones mucho más prácticas utilizando DEM. En consecuencia, el método ahora se explota con frecuencia para resolver muchos problemas de ingeniería que implican el flujo granular.

10.2 EDEM Software

A lo largo de la duración del proyecto, se utilizaron dos paquetes de software para simular el proceso SLS en conjunto: uno para simular la interacción rodillo / lecho de polvo y el otro para operar el algoritmo de trazado de rayos. El paquete de software utilizado para simular el primero fue EDEM por DEM Solutions Ltd. - uno de los paquetes de software líderes en el mercado de DEM para materiales a granel. DEM Solutions Ltd. es una empresa internacional con oficinas ubicadas en todo el mundo, pero tiene su sede en Edimburgo, Reino Unido. La empresa fue fundada en 2003 y el paquete de software EDEM fue publicado en 2006.

El objetivo final del uso del software EDEM fue modelar la interacción del polvo-cama con el rodillo. Sin embargo, para lograr un modelo realista, el movimiento de miles de partículas geométricamente complejas tuvo que ser simulado, lo que podría tardar varios días en completarse. Por lo tanto, antes de que se intentara la simulación final, la Junta del Proyecto decidió desarrollar varios modelos de prototipo menos complejos, lo que requeriría menos tiempo para funcionar y haría que el aprendizaje del software fuera más fácil para los miembros del grupo. La simulación final de EDEM se realizó más tarde en la duración del proyecto, en una fecha que se especificó en la línea de tiempo del proyecto. En este punto, el grupo se sintió confiado en su capacidad de operar el software.

Además, la Junta de Proyectos quería evaluar el efecto de la velocidad de rotación del rodillo sobre la disposición del lecho de polvo. Por lo tanto, utilizando la misma disposición de las partículas en el lecho de polvo para cada simulación, la velocidad de rotación del rodillo se probó a 10,67rad / s, 5,34rad / s y 0rad / s. La velocidad de traslación se mantuvo constante a 0,04 m / s para cada rotación. La realización de tales simulaciones, daría una idea del efecto del rodillo "deslizándose" sobre las partículas. Lo cual sería el caso en 0rad / s y 10.67rad / s, cuando la rotación del rodillo y la translación fueron implementadas de manera independiente.

10.3 Simulación inicial

Para la simulación inicial de DEM, sólo se consideró una geometría de partículas, consistente en una esfera simple con diámetro Dsph = 1 · 10-4m. Las propiedades de las partículas se eligen para parecerse a la éter-cetona de polietileno (PEEK), un material de uso común en el proceso SLS debido a su alta resistencia y propiedades mecánicas deseadas. Las propiedades de las partículas se definieron como sigue:

Módulo de Young	3.7 GPa
Ratio de Poisson	0.4
Density	1.3 gr/cm^3

Se creó una caja física, con dimensiones Lx, Ly, Lz = (1.23,20,15) mm, para representar el límite físico, sólido para que el lecho de partículas interactúe. Para que se creasen partículas, se tenía que definir un volumen de control para que las partículas fueran colocadas inicialmente en el sistema. En consecuencia, se creó una caja virtual con dimensiones Lx, Ly, Lz = (1,23,10,7,5) mm y colocada negativamente a lo largo del eje y forzando una mayor densidad de partícula para formar en un lado. En un paso de tiempo de t = 0s, se generaron 3000 partículas mono-dispersas

con una orientación aleatoria en la caja virtual. La velocidad de generación de partículas se fijó en 3000 por segundo y el número de partículas introducidas en el sistema aumentó linealmente con un paso de tiempo creciente. Así, las partículas se generaron durante un tiempo total de 1s. Además, como las partículas se colocaron inicialmente en el sistema, no tenían movimiento de rotación o de traslación y por lo tanto se dejaron caer a la superficie inferior de la caja física y se organizaron en una configuración natural. Este modelo numérico imita de cerca la realidad del proceso SLS y crea una disposición de partículas adecuada para evaluar el efecto que tienen varios parámetros en el proceso.

Para modelar el proceso de aplanado, se creó un cilindro, con un diámetro Droller = 2 · 10-3m, y colocado en x, y, z = - (0.615,7.8,2.8) mm. Con el fin de modelar el movimiento del rodillo, una traducción lineal y la rotación tenía que ser especificado. Por lo tanto, en un momento de t = 1,1 s, la velocidad de traslación del cilindro se fijó en 0,02 ms / en el eje y positivo, y su velocidad de rotación se estableció en 10 rad/s en el eje y positivo. El movimiento del cilindro permaneció constante hasta un tiempo de t = 1,78s. En ese momento, el movimiento del cilindro se detuvo cuando alcanzó el otro extremo de la caja física y estaba en una posición de x, y, z = (- 0.615,5.8, -2.8) · 10-3m. Para todas las interacciones en el sistema, el coeficiente de restitución se estableció en µr = 0,5.

Dentro de la parte del simulador del software, los parámetros como el paso del tiempo y el tamaño de la rejilla del modelo tenían que ser definidos. Al definir un paso de tiempo adecuado para el modelo, fue necesario considerar el tiempo de colisión entre partículas y asegurar que el paso de tiempo era lo suficientemente pequeño para capturar con precisión la dinámica de la colisión. El software EDEM calcula automáticamente un paso de tiempo de Rayleigh, dependiendo del tamaño, densidad y módulo de corte de las partículas dentro del modelo. El paso de tiempo utilizado en la simulación, Δt = 1.04622e-08s, equivale al 10% del paso de tiempo de Rayleigh. El tamaño de la rejilla se ajustó a tres veces el tamaño del radio de las partículas, por lo tanto el tamaño de cada rejilla era 3 · 10-4m. En total, había 17340 cuadrículas en todo el dominio.

Durante el primer segundo de la simulación, el rodillo permaneció inmóvil y se crearon partículas en la caja virtual. La simulación en este paso de tiempo se puede ver en la Figura 1. Debido a la complejidad reducida de la configuración en esta simulación, las partículas se pueden ver de una sola forma y ser bastante grande en relación con el sistema. Esto dio lugar a una alta formación de pilas delante del rodillo, lo que no sería el caso en una simulación a gran escala. Sin embargo, esto se consideró permisible para la simulación inicial para permitir al grupo obtener alguna experiencia de funcionamiento del software.

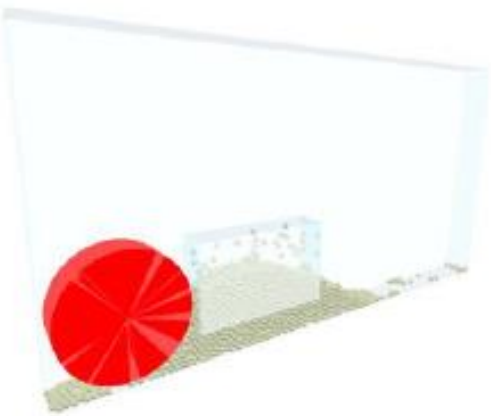

Ilustración 1. Prueba con partículas simplificadas

La segunda etapa de la simulación era girar y trasladar el rodillo a través del montón de partículas para aplanar la superficie del lecho de polvo. La etapa final de la simulación en el paso de tiempo 1.78s se puede ver en la figura 3, en la que el rodillo ha sido forzado a moverse verticalmente hacia arriba por el lecho de polvo, provocando una inclinación obvia en la superficie del lecho de polvo.

Ilustración 2. Cama post-rolling

Ilustración 3. Cama pre-rolling

10.4 Simulación final

Para crear un modelo más realista del lecho de polvo, se crearon varias partículas geométricamente diferentes, y se identificaron por su relación de aspecto. La siguiente tabla muestra el número de partículas creadas para cada relación de aspecto.

Relación de Aspecto	Número de partículas
1.0	5000
2.0	7500
2.5	7500
3.0	5000

Las geometrías de las partículas se crearon por superposición y unión de partículas (esferas) juntas. Para una relación de aspecto de 1,5, se juntaron dos partículas, como las de la Figura 4. Para relaciones de aspecto mayores de 1,5, se juntaron cuatro partículas, como las de la Figura 5. Para conseguir las relaciones de aspecto individuales (2,0,2,5,3,0), Los puntos centrales de las partículas se movieron para alargar o acortar la estructura en forma de varilla. El radio de las

partículas constituyentes fue 0,05 mm - un orden de magnitud menor que en la simulación anterior.

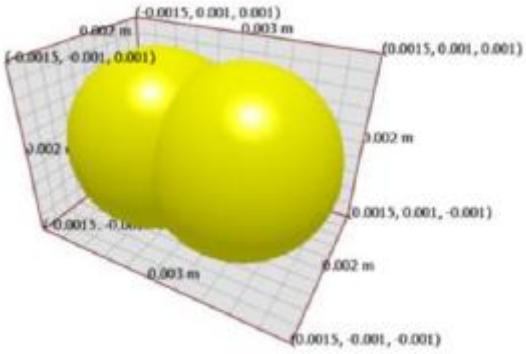

Ilustración 4. 2 Esferas unidas

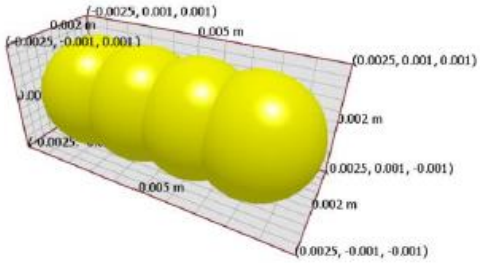

Ilustración 5. 4 esferas unidas

En esta simulación, las propiedades de las partículas se cambiaron con el fin de reducir el tiempo de simulación a escala completa. Por ejemplo, un módulo de Young más pequeño reduce significativamente el tiempo computacional requerido. En consecuencia, las propiedades de las partículas se definieron como sigue:

Modulo de Young	0.25 GPa
Coeficiente de Poisson	0.25
Densidad	2.5 gr/cm^3

La caja que representa el límite físico, sólido fue significativamente mayor que en la simulación anterior - esto se debió al total de 25.000 partículas que se simularon, un orden de magnitud mayor que antes. Por lo tanto, la caja exterior tenía dimensiones Lx, Ly, Lz = (2,5,100,30) mm y el diámetro del rodillo se ajustó a 15 mm. Las partículas fueron creadas en una caja virtual como la simulación anterior, y se les permitió caer al fondo de la caja externa. Las partículas se crearon durante un tiempo de 1s a una velocidad de 25.000 por segundo.

Debido a un aumento en la carga de trabajo computacional, derivado de la mayor complejidad de la simulación, el tiempo-paso tuvo que ser aumentado para reducir la duración de la simulación. Por lo tanto, el paso del tiempo se estableció en 1e-07s, un orden de magnitud mayor que en la simulación anterior.

Como las partículas eran significativamente más pequeñas que en la simulación anterior, una superficie mucho más nivelada se formó naturalmente a medida que las partículas caían. Esto se puede ver en la Figura 6, donde las diferentes relaciones de aspecto se muestran en diferentes colores. Una vez que todas las partículas se habían generado en el sistema, el rodillo empezó a transversalmente a lo largo de la caja. A diferencia de la simulación anterior, el rodillo mantuvo su posición vertical a medida que se desplazaba y aplanaba el lecho de partículas. La Figura 7 y la Figura 8 muestran el polvo-lecho pre y post-laminado. En la figura 9, de nuevo se puede ver una pila que se forma delante del rodillo. Sin embargo, con el tamaño de partícula más pequeño, el rodillo puede fácilmente alisar y aplanar el lecho de polvo. Como se ve en la Figura 10.

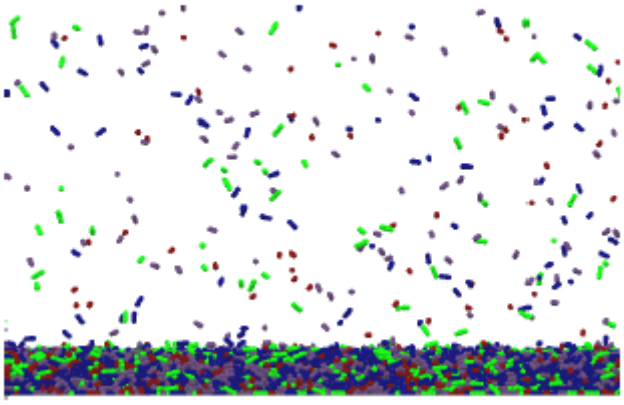

Ilustración 6. Flujo de partículas

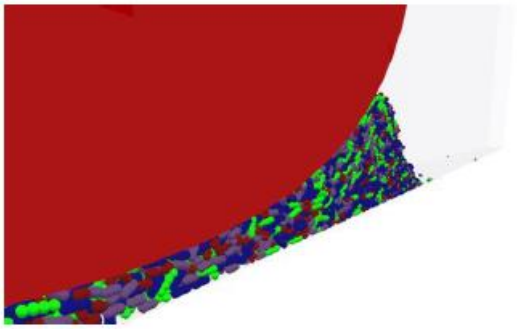

Ilustración 8. Interacción polvo/rodillo

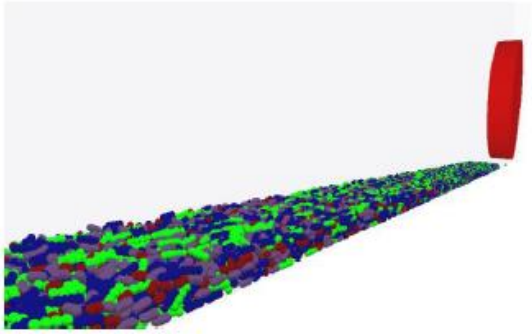

Ilustración 7. Cama post-laminado

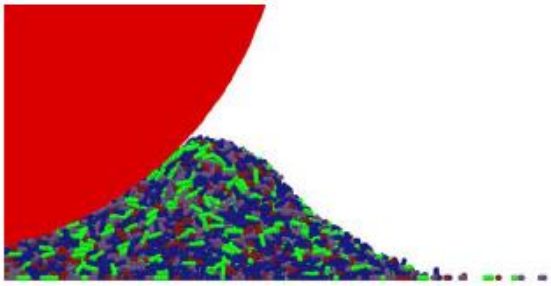

Ilustración 9. Interacción polvo/rodillo

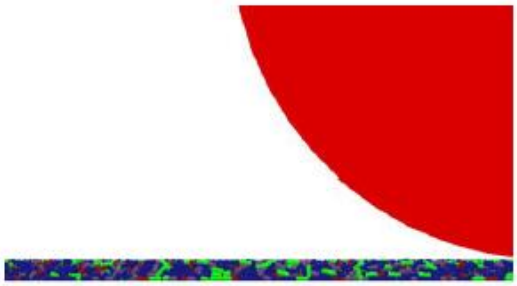

Ilustración 10. Cama post-laminado

11. Trazado de rayos

11.1 Introducción

En 1865, Maxwell unificó las teorías de Faraday, Gauss y Ampere para lograr ecuaciones globales que gobiernan la propagación de ondas electromagnéticas a través del espacio. Estas expresiones se conocen como ecuaciones de Maxwell, y son la forma más aceptada de abordar el problema del trazado de rayos. Sin embargo, cuando el entorno de estudio es grande e implica muchas partículas, la implementación directa de la ecuación de Maxwell sería casi imposible desde un punto de vista matemático. Una aproximación más simple - basada en la óptica geométrica - se utiliza comúnmente en este caso: la teoría del trazado de rayos, que considera la fase de la onda irrelevante. Por lo tanto, la longitud de onda de los rayos debe ser mucho menor que el diámetro de la partícula. En este contexto, se dice que el problema es una línea que cruza un cuerpo (ya que la longitud de onda del rayo es mucho menor que el cuerpo). Obsérvese que la longitud de onda para la luz visible, λ, es:

$$0.7 * 10\text{-}7m \leq \lambda \leq 4 * 10\text{-}7m$$

En la metodología de trazado de rayos, un haz de luz incidente se considera infinito en direcciones laterales, y se puede pensar que está hecho de rayos de luz separados, cada uno de ellos siguiendo su propio camino. Por lo tanto, la anchura de la viga, $\boldsymbol{w}$, debe ser mayor que la longitud de onda. Matemáticamente expresado, $\boldsymbol{w} \gg \lambda$.

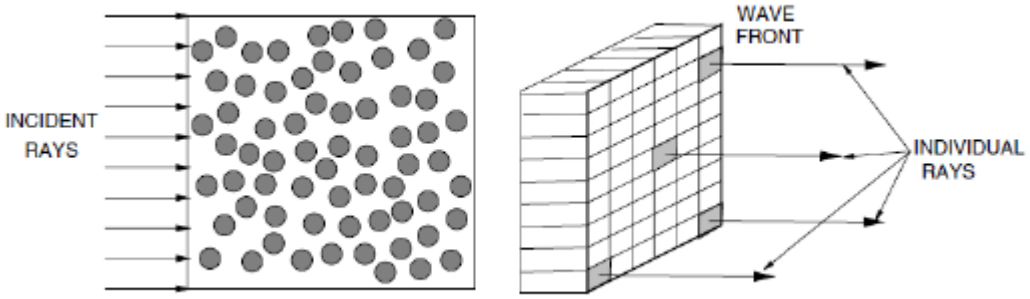

Ilustración 11. Rayos incidentes

11.2 Definición del modelo de trazado de rayos

De las especificaciones del proyecto, la teoría del trazado de rayos sólo se aplicó hasta el punto de la primera reflexión de los rayos incidentes sobre las partículas. Por lo tanto, no se consideraron otras reflexiones y otras interacciones realistas tales como el efecto térmico sobre las propiedades del material de partícula.

Existen numerosos métodos en los que se puede construir un algoritmo de trazado de rayos. El fondo de este proyecto permite utilizar un método simple ya que las partículas están compuestas de esferas y los rayos definidos como infinitos con curvatura cero. Por lo tanto, un algoritmo que encuentra las intersecciones de una línea recta y una esfera en términos geométricos se puede manipular muchas veces sobre la escala completa de la simulación para encontrar los puntos de la reflexión de rayos en partículas.

De la geometría, la ecuación de una línea recta para representar un rayo se tomó como:

$$Rayx, y, z = s0 + tD$$

Donde s0 fue la fuente inicial del rayo, s0 = (x0, y0, z0) y D fue la dirección del rayo, D = (dx, dy, dz).

La forma esférica de las partículas se definió usando el teorema de Pitágoras, resultando en:

$$(xs\text{-}xc)\ 2+\ (ys\text{-}yc)\ 2+\ (zs\text{-}zc)\ 2 = r2$$

Donde el subíndice s define un valor de superficie, el subíndice c un valor de centro yr como el radio de la esfera.

Para encontrar el punto de intersección entre el rayo y la esfera, la ecuación de los rayos para sus valores x, y y z se sustituyó como las observaciones del valor de superficie para la esfera. Estas ecuaciones de rayos se pueden definir como:

$$xR = x0 + tdx\ yR = y0 + tdy\ zR = z0 + tdz$$

Al insertar estos en la ecuación de la esfera para que xR = xs, yR = ys y zR = zs, la ecuación unificada dio como resultado:

$$(x0 + tdx\text{-}xc)\ 2+\ (y0 + tdy\text{-}yc)\ 2+\ (z0 + tdz\text{-}\ zc)\ 2 = r2$$

Reorganización de la solución:

$$(dx2 + dy2 + dz2)\ t2 + 2\ [dx\ (x0\text{-}xc) + dy\ (y0\text{-}yc) + dz\ (z0\text{-}zc)]\ t + (x0\text{-}xc)\ 2+\ (y0\text{-}yc)\ 2+\ (z0\text{-}zc)\ 2\text{-}r2 = 0$$

Como esto toma la forma cuadrática de la ecuación, puede ser resuelto usando la fórmula cuadrática:

$$t = \text{-}B\mp\sqrt{B2\text{-}4AC2A}$$

Donde A = $(dx2+dy2+dz2)$, B = $2[dx(x0-xc)+dy(y0-yc)+dz(z0-zc)]$, and C = $(x0-xc)2+(y0-yc)2+(z0-zc)2-r2$.

Esto le permite encontrar t si existe una intersección, siendo t un factor multiplicativo que se aplicará a la matriz de dirección del rayo que, además de la matriz de coordenadas de la fuente de rayos, dará lugar a la ubicación del punto de intersección. Hubo dos resultados de la fórmula cuadrática para t si el discriminante era mayor o igual a cero, lo que en el contexto de la definición del problema define la intersección superior e inferior de la esfera, ya que el rayo se dice que es una línea recta infinita. Por lo tanto, sólo la intersección superior se requiere para representar un punto de reflexión por lo que el menor valor de t se toma.

Utilizando el punto de intersección calculado, se puede encontrar la reflexión. Esto se hizo con los supuestos de que había tan transmisión y la superficie de la esfera era suave para que la reflexión fuera perfecta. Para encontrar la dirección del rayo reflejado, se requería el producto punto entre el vector normal de la superficie de la esfera y el rayo incidente. Esto se encontró usando la *intersección:*

$$Normal,\ N = (intersección - centro\ esfera) radio\ esfera$$

La dirección del rayo reflejado se calculó a partir de la Ley de Snell como:

$$Dirección\ del\ rayo\ reflejado = D\text{-}2N\,(N.D)$$

Donde D fue la dirección del rayo incidente a partir de la definición del rayo.

Una vez que este algoritmo fue definido, podría ser repetido con numerosos rayos sobre una gama de esferas pre-localizadas para representar un lecho de partículas. Esto permitió que muchas intersecciones se encontraran a través del lecho representativo. Todo este proceso fue implementado en MATLAB con el objetivo de importar los datos del EDEM y combinarlos con el algoritmo del trazado de rayos.

11.3 Resultados del MATLAB

El resultado del modelo MATLAB fue un conjunto de 25.000 esferas y todos los rayos que presentaban un punto de intersección. Utilizando los datos iniciales de la simulación EDEM como datos de entrada, se obtuvieron 789 líneas de rayos. La ilustración 12 muestra la gráfica completa.

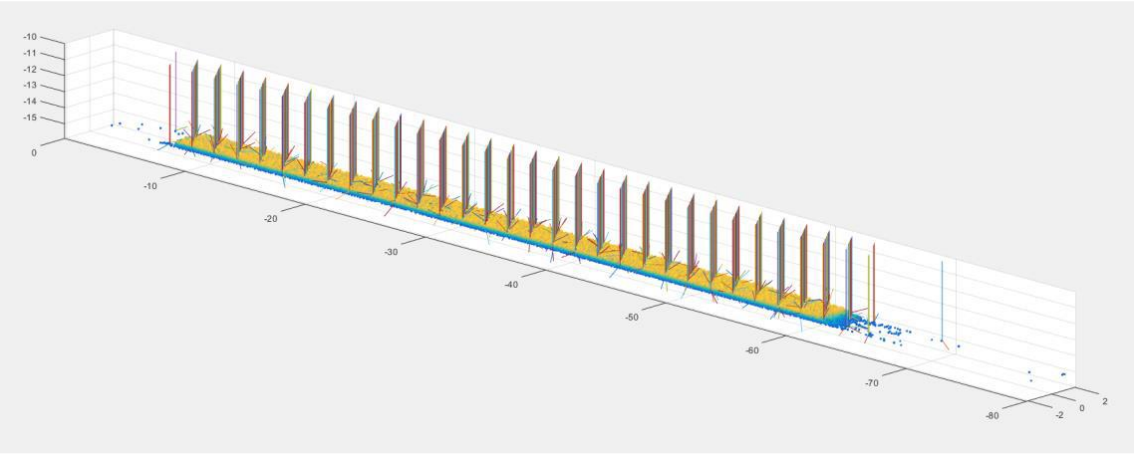

Ilustración 12. Rayos penetrando la cama de polvos

Como se ve en las figuras 13 y 14, el modelo funcionó correctamente al encontrar un máximo de un punto de intersección para cada rayo en la esfera superior. Junto con esto, se puede ver que una reflexión se traza como se define. Estos rayos de reflexión no interactúan más con otras esferas, ya que está más allá del alcance de este modelo inicial que se limitó a encontrar la primera reflexión.

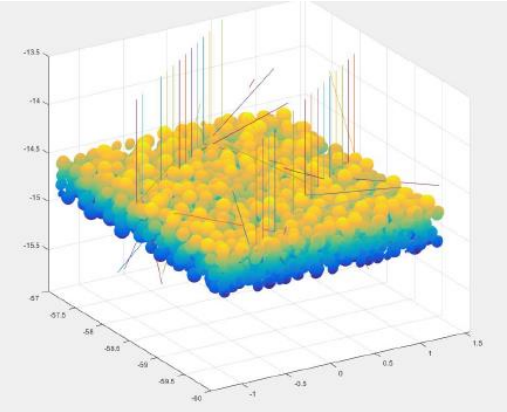

Ilustración 13. Reflxiones primarias

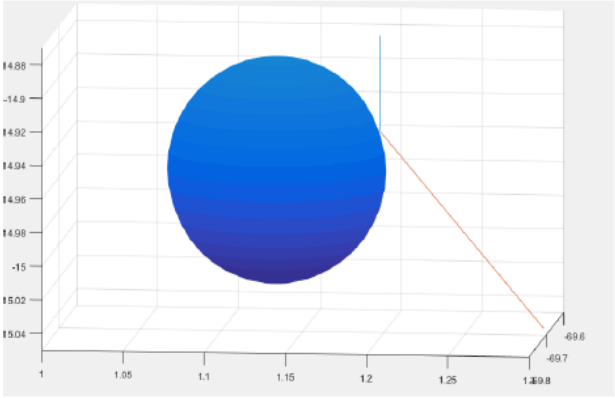

Ilustración 14. Imagen de un rayo.

11.4 Futuras evoluciones del modelo

Se requerirían numerosas adiciones para mejorar el modelo de trazado de rayos a un nivel del que tendría aplicaciones significativas.

La primera cuestión significativa con el modelo actual fue la incapacidad de obtener la orientación de las partículas de la simulación EDEM. La versión de software actual soportaba la salida de una matriz de orientación de un formato similar a una matriz de rotación estándar de 3 por 3.

Sin embargo, esta matriz describió la orientación desde el estado original de la partícula tras la generación. Esto no debería haber causado problemas, pero EDEM genera las partículas con una orientación inicial aleatoria y no permitió que se exportara. Por lo tanto, la matriz de orientación fue inútil en términos de trazar el estado final del lecho de partículas ya que no había un valor de referencia inicial para aplicarlo. Por lo tanto, los resultados representan aproximadamente las partículas reales, pero se requiere una mejora significativa. Para aplicaciones futuras de un modelo de trazado de rayos preciso por lo tanto, esto sería una prioridad para corregir. Sin embargo, como el propósito de esta iteración de este modelo de iteración era demostrar las posibilidades iniciales de la teoría del trazado de rayos, no era necesario obtener resultados muy precisos.

El siguiente paso importante en el desarrollo del modelo sería repetir el algoritmo para encontrar el primer punto de contacto para los rayos reflejados, permitiendo encontrar el segundo orden de intersecciones. Estas intersecciones podrían utilizarse para calcular reflexiones adicionales. Este algoritmo actualizado podría repetirse numerosas veces para encontrar intersecciones de orden n para detallar completamente la trayectoria geométrica de los rayos dentro del lecho de partículas. Un método para hacerlo de manera eficiente sería utilizar un algoritmo recursivo. Bajo la asunción a este punto de reflexión perfecta, esto sería capaz de ser calculado a un orden infinito de iteración. Sin embargo, las reflexiones infinitas no son realistas debido a la física de la interacción electromagnética con el material real. Suponiendo una representación más realista, el modelo incluiría características adicionales tales como transmisión y absorción. Bajo representación realista, la energía de los rayos se agotaría después de varias reflexiones a un umbral sobre el cual el trazado de rayos podría ser detenido. Para desarrollar la teoría de trazado de rayos para implementar estos, se requerirían especificar numerosas propiedades de láser y de material.

La absorción es un fenómeno crítico que debe incluirse en el modelo, ya que es necesario para que se produzca el proceso selectivo de sinterización láser.

12. Modelo de Negocio

12.1 Estructura de Negocio

Las *Soluciones Selectivas de Sinterización Láser* serán registradas como una compañía limitada con tres accionistas principales: Robert Gauld, Jack Lucas y Pablo Canga. La empresa se dividirá con participaciones iguales entre los accionistas. Esto implicará el futuro acuerdo de los accionistas sobre un memorándum y los estatutos.

12.2 Servicios

Los servicios ofrecidos por SLSS incluyen la optimización del proceso SLS para las empresas manufactureras o clientes individuales para mejorar la calidad y la cantidad de la producción. Estos servicios estarán disponibles después de un período inicial de puesta en marcha de dos años en el que se completará el modelo de optimización.

12.3 Financiación

Con el fin de financiar el período de puesta en marcha de 2 años, la inversión será necesaria. Inicialmente tomará la forma de inversión personal de los tres accionistas fundadores para llegar a un punto de registro. Después de esto, se buscaría la inversión privada de las empresas manufactureras SLS para financiar la terminación del modelo. En respuesta a una inversión, las empresas obtendrán el primer acceso al modelo y los descuentos en aplicaciones futuras.

12.4 Localización

La mayoría de la aplicación SLS se basa en el área del Greater London Como tal, sería más apropiado ubicar la oficina para SLSS en esta área también, ya que permitiría un fácil acceso a la tecnología de los inversores para aplicar las pruebas del modelo mientras se desarrolla y en la concepción de los servicios. Londres también ofrece una oportunidad fácil de acceder a oficinas rentables, ya que están en abundancia.

12.5 Evaluación de mercado

El crecimiento de la Manufactura de Aditivos ha sido rápido desde que el primer sistema de impresión 3D patentado fue creado por Chuck Hull en 1984, donde se usó un proceso conocido como estereolitografía. El crecimiento se puede ver de 1984 a 2011, donde se vendieron 45.000 impresoras 3D en todo el mundo, y este número se logró de nuevo en un solo año en 2012. Se espera que el crecimiento futuro sea tan explosivo, con un valor sectorial estimado de 12 Millones de dólares en 2017 por Hewlett-Packard, con este número estimado para llegar a un posible 100 mil millones en 2020, ya que hay partes del sector creciendo a más del 30% por año. Las razones para esto incluyen una mayor disponibilidad de materiales mejorados, la caducidad de las patentes en los últimos años permitiendo a las pequeñas empresas y universidades entrar en el mercado y la enorme inversión de las empresas líderes para mejorar el proceso. La sinterización selectiva por láser sigue la misma tendencia y presenta una gran oportunidad de aprovechar la creciente industria si fuera optimizada para hacer uso de sus muchas ventajas.

13. Reflexiones sobre el trabajo como equipo

13.1 Estructura

La estructura del grupo funcionó bien y no presentó dificultades durante toda la duración del proyecto. Aunque cada miembro del grupo se hizo responsable de actividades específicas dentro del proyecto, el grupo trabajaría muy frecuentemente juntos y se ayudaría mutuamente a encontrar soluciones a los problemas encontrados. Al hacerlo, el grupo entero fue regularmente informado de cada parte del proyecto en la que sus compañeros estaban trabajando. Esto aseguró que todos los miembros tuvieran un conocimiento profundo del proyecto en general.

Como se describió anteriormente, Gauld R asumió el papel de PM, lo cual implicó organizar reuniones grupales, comunicarse con el supervisor del grupo, revisar y modificar el cronograma del proyecto, crear un sitio web promocional y asegurar que cada actividad se completó exitosamente dentro de su tiempo. Lucas J asumió el papel de Ingeniero de Sistemas, lo que requirió la creación del algoritmo de trazado de rayos en MATLAB, la importación y conversión

de datos de las simulaciones EDEM y la generación de resultados post-procesados. Canga P asumió el papel de investigar literatura y teorías relevantes para el proceso SLS.

13.2 Comunicación

A lo largo de la duración del proyecto, el grupo permaneció constantemente en contacto entre sí. El chat de grupo realizado en Facebook resultó ser un método muy fácil y eficiente para organizar reuniones de grupo, delegar tareas, subir archivos y realizar un seguimiento de las discusiones del grupo. La cuenta de Dropbox compartida creada para este proyecto se utilizó para almacenar archivos de mayor tamaño, como artículos de entrega final, scripts de MATLAB, etc. El PM mantuvo contacto regular con el supervisor del proyecto, especialmente hacia el final de una actividad convenir.

13.3 Gestión de tiempos

El grupo consideró que el tiempo se manejaba bien a lo largo de la duración del proyecto. Teniendo en cuenta que ninguna de las personas del grupo tenía experiencia previa simulando el proceso SLS antes del proyecto, se hicieron intentos razonablemente precisos para planificar la duración de cada actividad. Además, los miembros del grupo manejaron individualmente su propia carga de trabajo y tiempo con éxito - todos los miembros completaron las tareas delegadas en un plazo razonable y con un estándar aceptable. Los miembros del grupo fueron consistentemente conscientes y profesionales durante todo el proyecto.

Sin embargo, durante el período de examen de diciembre, los progresos en el proyecto cesaron. Los tres miembros se comprometieron a realizar varios exámenes durante este período y, por lo tanto, tenían poco tiempo disponible para contribuir al proyecto. Esto había sido anticipado por el grupo desde el principio en el proyecto. En consecuencia, se hicieron esfuerzos al diseñar el diagrama de Gantt para acomodar este tiempo de intensa carga de trabajo, como se discutió anteriormente.

En las etapas iniciales del proyecto, se pensó que un algoritmo de trazado de rayos escrito en lenguaje de codificación C + + tendría que ser convertido en un formato compatible con MATLAB, con el fin de combinar el algoritmo de trazado de rayos con las simulaciones del algoritmo en polvo- cama. Sin embargo, la actividad se cambió durante el proyecto para desarrollar un algoritmo de trazado de rayos único que se podría utilizar con MATLAB e introducir directamente los resultados de EDEM. Esto resultó en el grupo tergiversando la actividad, ya que el aprendizaje del lenguaje de codificación C ++ ya no era una parte necesaria para su finalización. Sin embargo, teniendo en cuenta el tiempo adicional necesario para crear el algoritmo de seguimiento de rayos, la línea de tiempo global de la actividad se mantuvo aproximadamente como se proyecta. Las sub-partes de la actividad fueron re-administradas por el Ingeniero de Sistemas, quien tenía la responsabilidad general del cumplimiento de la actividad.

14. Conclusión

El proyecto alcanzó con éxito todos sus objetivos, como se especifica en la Sección 7. Un modelo de DEM del lecho de polvo se creó utilizando el paquete de software de EDEM Solutions Ltd. de DEM. Se estableció un modelo razonablemente preciso del lecho de polvo, que comprendía 25.000 partículas poli-dispersadas. Se demostró que alterando la velocidad de rotación del rodillo, se cambia la evolución del comportamiento de empaquetado del lecho de polvo; Sin embargo, se necesitarían más investigaciones para hacer predicciones definitivas.

Un algoritmo de trazado de rayos fue creado y operado en el paquete de software MATLAB. Los resultados del modelo DEM se exportaron y se convirtieron en un formato adecuado, lo que permitió calcular el primer punto de contacto del láser con el lecho de polvo y el ángulo de reflexión.

Las simulaciones realizadas en este proyecto han demostrado que es factible simular el proceso SLS global y explorar las configuraciones de parámetros en el esfuerzo para optimizar el proceso.