

**IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN MODEROS 1.0 PARA SIMULAR EL
FENÓMENO DE EROSIÓN EN UN RECUBRIMIENTO MULTICAPA USADO EN
LAS INDUSTRIAS GENERADORAS DE ENERGÍA**

CARLOS EUSEBIO LAGUADO FERNÁNDEZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA**

2010

**IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN MODEROS 1.0 PARA SIMULAR EL
FENÓMENO DE EROSIÓN EN UN RECUBRIMIENTO MULTICAPA USADO EN
LAS INDUSTRIAS GENERADORAS DE ENERGÍA**

CARLOS EUSEBIO LAGUADO FERNÁNDEZ

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero de Sistemas**

Director:

MPE. HENRY ARGUELLO FUENTES

Profesor Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática

Codirector:

Ph.D DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS

**Profesor Escuela de Ingeniería Metalúrgica y
Ciencia de Materiales**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA**

2010

Dedicado a.....

A Dios por ser mi Amigo Fiel y a la Virgen del Perpetuo Socorro por ser mi intercesora.

*A mi madre **María Nayibe Fernández**, fuente de mi inspiración y ejemplo de vida.*

*A mi padre **Reinaldo Suarez**, y mis hermanos **Karol S. Fernández, Reinaldo S. Fernández y Wilmer Fernández**, quienes completan mi bella familia.*

*A mi **Mileyni Paola Ardila P.**, por su apoyo y amor incondicional.*

*A mis tías **Leo Fernández, Martha Fernández y Pola Fernández**, por su apoyo en mis últimos momentos de mi carrera.*

A mis jefes de diferentes áreas laborales que durante el transcurso de mi carrera me dieron la oportunidad de aprender nuevas actividades.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Henry Arguello Fuentes director en la investigación de este proyecto, quien con su gestión y respaldo se pudo llevar a cabo este proyecto de grado abriendo espacios de investigación en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Al profesor Darío Yesid Peña Ballesteros director en la investigación de este proyecto quien con su colaboración, apoyo, respaldo y orientación estuvo siempre atento a momentos críticos de mi trabajo de investigación.

Al Semillero de Investigación en crudos pesados convenio 006 UIS-ICP del 2006 por su valiosa participación en diferentes defensas de avances que tuve en el transcurso del proyecto y el apoyo brindado.

Al docente Custodio Vázquez Quintero, a los Magister Oscar Rey, Carlos Mejía, Carlos Ordoñez, Eddy Ruidiaz, a los Ingenieros Fabián Oviedo, Jose Calderón, Nelson Rodríguez, Cesar Antelíz por sus asesorías metalúrgicas en diferentes actividades del proyecto.

A los líderes del semillero UIS – ICP por sus recomendaciones, aclaraciones y el conocimiento que me han brindado durante estos años de pertenecer al semillero.

A Darío Delgado, Fabián Cardozo, Cesar Vargas, Hoover Rueda, Sergio Rico y los estudiantes de Maestría del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica por su orientación, aclaración de ideas para optimizar ciertos procesos en el transcurso del desarrollo del proyecto.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en su realización.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. RESUMEN DEL PLAN DE PROYECTO DE GRADO	22
1.1 ESPECÍFICACIONES DEL PROYECTO	22
1.1.1 Título. Implementación de la Aplicación MODEROS 1.0 para Simular el Fenómeno de Erosión en un Recubrimiento Multicapa usado en las industrias generadoras de energía.	22
1.1.2 Director.	22
1.1.3 Codirector.	22
1.1.4 Autor.	22
1.1.5 Entidad Interesada en el Proyecto	23
1.1.6 Costo del Proyecto. El costo del proyecto calculado es de \$19.604.000	23
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	23
1.2.1 Objetivo general.	23
1.2.2 Objetivos Específicos.	23
1.2.3 Características fuera de alcance.	24
1.2.4 Herramientas de Desarrollo.	24
1.2.5 Metodología.	25
1.2.6 Justificación	25
1.2.6.1 Definición del problema.	25
1.2.7 Impacto esperado y viabilidad.	26
2. MARCO TEÓRICO	28
2.1 GENERALIDADES	28
2.1.1 Fundamentos de la erosión.	28
2.2 EROSIÓN DÚCTIL	30
2.2.1 Modelos de Erosión Dúctil.	31
2.2.1.1 Finnie.	31

2.2.1.2 Hutchings.	31
2.3 EROSIÓN FRÁGIL	33
2.3.1 Modelos de Erosión Frágil.	34
2.3.1.1 Hutchings I.M.	34
2.4 MECANISMOS DE EROSIÓN PARA MATERIALES DÚCTILES Y FRÁGILES	35
2.4.1 Fractura Hertziana.	35
2.4.2 Fractura lateral.	36
2.4.3 Fractura radial.	36
2.4.4 Fractura de labios.	37
2.5 APROXIMACIÓN ESTEREOLÓGICA [1]	37
2.5.1 Fundamentos de la Estereología.	38
2.5.1.1 Contigüidad.	38
2.5.1.2 Intercepto de líneas promedio.	39
2.5.1.3 Trayectoria media libre de la matriz.	39
2.5.1.4 Continuidad y contacto de partículas.	40
2.6 RECUBRIMIENTOS MULTICAPAS	40
2.6.1 Características del recubrimiento NiCrB-WC [3].	40
2.6.2 Erosión de Materiales Multifases.	41
2.6.3 Modelos de Erosión de Materiales Multifases [1]	42
2.6.3.1 Leyes Promedio.	42
2.6.3.2 Teoría de la Estructura.	43
2.6.3.3 Lee y Gurland.	44
2.6.3.3.2 Dureza in situ del carburo tungsteno.	45
2.6.3.4 Anad K, Morrison C, Scattergood R.	45
2.7 LECHO FLUIDIZADO	47
3. MARCO METODOLÓGICO	48
3.1 MODELO DE DESARROLLO	48
3.1.1 Fases del Modelo de Proceso.	49
3.1.2 Flujos Administrativos	50

3.1.3	Flujos de Ingeniería.	51
3.2	PLAN DE TRABAJO	51
3.2.1	Inicio.	52
3.2.2	Elaboración.	52
3.2.3	Construcción.	53
3.2.4	Transición.	53
3.3	MODELO DE EROSIÓN	54
3.3.1	Modelo Base MB [3].	54
3.3.2	Función Matricial de Ajuste ϵD .	55
3.3.3	Modelo Base Ajustado (MBA).	55
3.3.4	Factor de Proporcionalidad de Modelos de Erosión.	56
3.3.5	Utilización de un modelo específico y del factor de proporcionalidad.	58
3.3.6	Utilización de un modelo promedio, un modelo de influencia de erosión y el factor de proporcionalidad.	59
3.3.7	Región de Contacto.	60
3.3.7.1	P.J. Woytowitz, R.H. Richman [29].	60
3.3.7.2	Modelo de Región de contacto Implementado.	60
4.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	65
4.1	DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS DE LA ANIMACIÓN	65
4.1.1	Descripción del recubrimiento y la partícula erosiva.	65
4.1.2	Descripción del efecto micro-estructural.	67
4.2	DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN Ω	67
4.2.1	Evento de impacto de una sola fase	67
4.2.2	Evento de impacto de varias fases.	
4.3	EVENTOS DE IMPACTO POSIBLES	69
4.3.1	Evento A.	69
4.3.1.1	Impacto en material dúctil.	69
4.3.1.2	Impacto en material frágil.	70
4.3.2	Evento B.	70
4.3.2.1	Impacto de dos fases.	70

4.3.2.2 Impacto de múltiples fases.	71
4.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA	71
4.4.1 Características de los elementos de la simulación.	71
4.4.2 Estructura de la matriz del Recubrimiento.	74
4.4.3 Modelado del sistema usando UML.	76
4.4.3.1 Diagramas de casos de uso. Caso de uso funcionalidad de la aplicación	77
4.4.3.2 Diagramas de Actividades.	83
5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	87
5.1 INFLUENCIA DE UTILIZAR EL MODELO BASE MB [3]	88
5.2 INFLUENCIA DE UTILIZAR LA FUNCIÓN MATRICIAL DE AJUSTE EN MBA	89
5.3 EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE EROSIÓN PARA VALORES SIMULADOS Y VALORES EXPERIMENTALES	90
5.3.1 Uso del coeficiente de linealidad.	90
5.3.2 Uso de la Distribución T-Student.	91
5.4 COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES VS. MODELO BASE (MB) Y VALORES EXPERIMENTALES VS. MODELO BASE AJUSTADO (MBA)	94
5.4.1 Valores Experimentales Vs. Modelo Base (MB).	94
5.4.2 Valores Experimentales Vs. Modelo Base Ajustado (MBA).	95
5.4.3 Eficiencia de Implementar MBA en el Simulador MODEROS 1.0.	95
5.5 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA DIÁMETRO DE PARTÍCULA DE 150 μ M Y VELOCIDADES DE 1 M/S, 3 M/S Y 5 M/S	96
5.6 TIEMPO REAL DE EJECUCIÓN DE LA ANIMACIÓN	98
6. CONCLUSIONES	101
7. RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXOS	108

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. dependencia de erosión angular para materiales (a) dúctiles y (b) frágiles 1.	29
Figura 2. el comportamiento de fractura erosiva para materiales dúctiles.	30
Figura 3. indentación de una superficie deformada plásticamente por un grano de forma irregular	32
Figura 4. el comportamiento de fractura erosiva para materiales frágiles.	33
figura 5. desarrollo de una grieta hertziana en forma de cono en un material frágil.	36
figura 6. vista superior del crecimiento de grietas laterales producidas por un penetrador agudo.	36
figura 7. crecimiento de una grieta hertziana en un material frágil.	37
Figura 8. mecanismo de arado por el impacto de partículas esféricas a incidencia oblicua.	37
Figura 9. representación esquemática de la trayectoria libre en un material compuesto.	40
Figura 10. Evento (a) con un tamaño relativamente pequeño con respecto a la micro-estructura	42
Figura 11. Evento (b) con un tamaño mucho mayor con respecto a la micro-estructura	42
Figura 12. Dependencia de la velocidad de impacto con la velocidad de erosión para un material multicapas al variar el tamaño de las partículas erosivas	46
Figura 13. Sistema de combustión de un lecho fluidizado.	47
Figura 14. Fases y flujos de trabajo del rup.	50

Figura 15. Efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión para el modelo anterior mb	54
Figura 16. Región de valores para la función matricial del tiempo de ejecución del modelo respecto al diámetro de la partícula	55
Figura 17. Efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión para el nuevo modelo mba, utilizando patrones de comparación (desgaste-diámetro-iteración por milisegundos).	56
Figura 18. Relación entre ángulo de impacto y pérdida de erosión.	57
Figura 19. Relación entre ángulo de impacto y pérdida de erosión.	57
Figura 20. Vista sectorial en primer plano para dos impactos no coincidentes	60
Figura 21. Vista en el plano xy de una posición aleatoria la partícula 1 en una simulación al azar.	61
Figura 22. Vista en el plano xy del evento de impacto, la asignación de intensidad de erosión asignada para cada región de color, de la partícula 1 en una simulación al azar.	63
Figura 23. Vista en el plano xy del evento de impacto, la asignación de intensidad de erosión asignada para cada región de color, de la partícula 1 en una simulación al azar.	64
Figura 24. Representación del recubrimiento por capas y subcapas, y de la partícula erosiva.	66
Figura 25. Evento de impacto en una fase dúctil o fase frágil.	68
Figura 26. Evento de impacto de varias fases.	68
Figura 27. Representación de posibles escenarios de impacto dúctil.	69
Figura 28. Representación de posibles escenarios de impacto frágil.	70
Figura 29. Representación de posibles escenarios de impacto de dos fases.	70
Figura 30. Representación de posible escenario de impacto multicapas (a).	71
Figura 31. Representación de posible escenario de impacto multicapas (b).	71

Figura 32. Simulación (a) con características diferentes del recubrimiento y de la partícula erosiva.	73
Figura 33. Simulación (b) con características diferentes del recubrimiento y de la partícula erosiva.	74
Figura 34. Matriz copia $[i][j][k]$ que representa el evento de impacto entre la partícula y el recubrimiento.	75
Figura 35. Matriz matriz $[i][j][k]$ que almacena que tipo de material es cada punto (pixel de la pantalla) y en cada punto almacena la información de erosión que es comparada con el umbral de borrado.	75
Figura 36. Diagrama de el caso de uso para determinar cuál será el funcionamiento de la aplicación.	77
Figura 37. Diagrama de el caso de uso para generar la partícula erosiva.	79
Figura 38. Diagrama de el caso de uso para crear el recubrimiento.	80
Figura 39. Diagrama de el caso de uso para generar el fenómeno de erosión en el recubrimiento.	82
Figura 40. Diagrama de actividades para la funcionalidad de la aplicación.	84
Figura 41. Diagrama de actividades para la creación de la partícula.	85
Figura 42. Diagrama de actividades para creación del recubrimiento.	86
Figura 43. Diagrama de actividades de la erosión en el recubrimiento [autor].	87
Figura 44. Valores de la región base (a). (a) el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión. (b) el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión.	88
Figura 45. Valores de la región base ajustada (b). (a) el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión. (b) el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión.	89
Figura 46. Efecto de la velocidad de la partícula para un diámetro de 150 μM .	90
Figura 47. Valores t-student calculados y ubicados fuera de la región crítica o de rechazo para intervalos de confianza del 95%, 99% Y 99,9%.	92

Figura 48. Erosión dúctil, frágil y multicapas con características constantes de la partícula durante la simulación, diámetro de 150 μM y velocidad de 1 m/s usando MBA en la simulación 97

Figura 49. Erosión dúctil, frágil y multicapas con características constantes de la partícula durante la simulación, diámetro de 150 μM y velocidad de 3 m/s usando mba en la simulación. 97

Figura 50. Erosión dúctil, frágil y multicapas con características constantes de la partícula durante la simulación, diámetro de 150 μM y velocidad de 5 M/S usando MBA en la simulación 98

LISTA DE TABLAS

	pag.
Tabla 1. Datos de composición química y dureza de las capas que componen el recubrimiento [3].	65
Tabla 2. Gama de colores utilizados para representar el recubrimiento en la animación en tiempo real [autor].	76
Tabla 3. Tipo de material para caracterizar el recubrimiento en la animación en tiempo real [autor].	76
Tabla 4. Funciones lineales de pérdida de espesor (erosión) en función de la velocidad de la partícula	91
Tabla 5. Diferencias de t-student y los niveles de significancia (calculados, vs, teórico)	93
Tabla 6. Comparación de valores experimentales, vs, valores simulados usando el modelo base (MB)	95
Tabla 7. Comparación de valores experimentales, modelo base ajustado (MBA) (MODEROS 1.0) para una velocidad de la partícula de 3 M/S	95
Tabla 8. Eficiencia de implementar mba en el simulador moderos 1. 0	96
Tabla 9. Tiempo real de ejecución de la animación simulando 20 horas de tiempo de exposición, aproximación en minutos, error relativo de +/- 4 minutos	100

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. plantillas del caso de uso funcionalidad de la aplicación	109
Anexo B. plantillas del caso de uso generar la partícula erosiva.	112
Anexo C. plantillas del caso de uso crear el recubrimiento.	114
Anexo D. Plantillas del caso de uso para generar el fenómeno de erosión en el recubrimiento.	117
Anexo E. Plantillas de listas de riesgos	121
Anexo F. Evento de impacto dúctil sobre la superficie del recubrimiento.	128
Anexo G. Evento de impacto multicapa sobre varios granos de wc en la superficie del recubrimiento.	129
Anexo H. Evento de impacto multicapa sobre un grano de wc y parte de la matriz dúctil en la superficie del recubrimiento.	130
Anexo I. Evento de impacto frágil sobre la superficie del recubrimiento.	131
Anexo J. Información utilizada para cada partícula erosiva a medida que el tiempo de exposición incrementa.	132
Anexo K. Valores de erosión medidos en pérdida de espesor (μM) en un recubrimiento multicapas con un tiempo de exposición de 20 horas.	133
Anexo L. Efecto de un diámetro de partícula de $50 \mu\text{M}$ a velocidades de 1 M/S, 3 M/S Y 5 M/S en la erosión total acumulada después de 20 horas de exposición.	134
Anexo M. Efecto de un diámetro de partícula de $280 \mu\text{M}$ A velocidades de 1 M/S, 3 M/S Y 5 M/S EN LA Erosión total acumulada después de 20 horas de exposición	136

Anexo N. Efecto de un diámetro de partícula de 600 μM a velocidades de 1 M/S, 3 M/S Y 5 M/S en la erosión total acumulada después de 20 horas de exposición.	138
Anexo O. Encuesta para levantar requerimientos	140
Anexo P. Artículo sobre modelo matemático implementado en el trabajo de investigación del simulador.	144

RESUMEN

TITULO

IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN MODEROS 1.0 PARA SIMULAR EL FENÓMENO DE EROSIÓN EN UN RECUBRIMIENTO MULTICAPA USADO EN LAS INDUSTRIAS GENERADORAS DE ENERGÍA*

AUTOR

CARLOS EUSEBIO LAGUADO FERNANDEZ**

PALABRAS CLAVES

Simulación, Tecnología, Fenómeno de Erosión, Modelo, Recubrimiento Multicapa.

DESCRIPCION

Este documento describe la representación del fenómeno de la erosión en un recubrimiento multicapas de fase dúctil y fase frágil, expuesto a impactos sucesivos de partículas solidas.

En la simulación se muestran los resultados por medio de tablas, gráficas y en la animación se visualiza en tiempo real los diferentes perfiles de espesor que se van formando en el recubrimiento. Además se puede crear un escenario de simulación en el que se genera un nuevo recubrimiento con distribución de granos de refuerzo WC (Carburo Wolframio ó Carburo Tungsteno) con características diferentes para cada simulación. La aplicación permite al ingeniero metalúrgico encargado de crear el recubrimiento obtener información del mismo y dar una idea de qué tipo de distribución inicial debe tener el recubrimiento con las concentraciones de %WC previamente establecidas en el trabajo doctoral que ha servido de guía y que estudia este tipo de tecnología, y a su vez observar cómo será la tendencia de deterioro de este material multicapas a medida que el tiempo de exposición se incrementa; esto con el objetivo de anticipar en dar inicio a la creación del recubrimiento en el laboratorio, evitando costos innecesarios en la fabricación.

Este proyecto se desarrolló utilizando el lenguaje de programación JAVA, se uso el editor Netbeans para codificar los programas, las funciones Swing para el diseño de los módulos, y técnicas de desarrollo de Ingeniería del Software.

* Modalidad Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico mecánicas, Ingeniería de Sistemas e Informática, MPE. Henry Arguello Fuentes.
Facultad de Ciencias Físicoquímicas, Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros.

SUMMARY

TITLE

IMPLEMENTATION OF THE APPLICATION OF MODELS 1.0 TO SIMULATE THE PHENOMENON OF EROSION IN A MULTI-LAYER COVERING USED IN THE ENERGY INDUSTRY*

AUTOR

CARLOS EUSEBIO LAGUADO FERNANDEZ**

KEYWORDS

Simulation, technology, phenomenon of erosion, model, multi-layer covering.

ABSTRACT

This document describes the phenomenon of erosion in a multi-layer covering of ductile and fragile phase when exposed to successive impacts of solid particles.

In the simulation the results are shown by means of tables and graphics and in the animation the different profile of thickness that get formed in the covering are visualized in real time. Moreover, a scene of simulation can be created in which a new covering with distribution of reinforcement grains WC (Wolframio Carbide or Tungsten Carbide) with different characteristics for each simulation is generated. The application allows the metallurgical engineer, in charge of creating the covering, to obtain information about it and give an idea of what kind of initial distribution the covering must have with the concentrations of %WC previously established in the doctoral study that has served as a guide and that has studied this type of technology. At the same time it allows the metallurgical engineer to observe the deterioration tendency this multi-layer material will have as the time of exposure increases. The objective of the above-mentioned is to anticipate the start of the creation of the covering in the laboratory in order to avoid unnecessary costs of production.

This project was developed utilizing the (JAVA programming language), the (Netbeans editor) was used to codify the programs and the Swing functions were used for designing the modules and development techniques of software engineering.

* Investigation

** Faculty of Physics Mechanical Engineering, Systems Engineering and Informatics, MPE. Henry Arguello Fuentes.
Faculty of Physical-chemical Sciences, Metallurgical Engineering and Science of Materials, PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros.

INTRODUCCIÓN

Las empresas que realizan actividades industriales como las generadoras de energía, presentan serios problemas en su infraestructura, siendo la erosión de materiales uno de los más significativos. Esto se presenta comúnmente en procesos donde las partículas sólidas son transportadas en un flujo de aire (turbinas de vapor, secciones de acumulación de crudo, lechos fluidizados, etc..) los cuales golpean la superficie de algún componente del metal, generando la remoción de material; para protegerlos de la erosión y aislarlos térmicamente de reacciones a altas temperaturas, es necesario contar con un sistema de recubrimientos, siendo en su naturaleza materiales duros con alta resistencia a la erosión.

El uso de recubrimientos convencionales suaves o duros en la superficie del material base (material a proteger) presenta discontinuidades en sus propiedades físicas tales como dureza, capacidad de calor y adhesión. Debido a las nuevas tecnologías, se ha diseñado una solución alternativa, un nuevo tipo de material compuesto con una micro-estructura donde su porcentaje de fracción de refuerzo varía ascendentemente desde el metal base hasta el contacto con el medio erosivo, lo cual suministra una combinación óptima entre sus propiedades físicas y mecánicas.

Caracterizar estos materiales depende de varios factores, como las características de la materia prima inicial y los procesos de fabricación, siendo este último muy influyente debido a que la elaboración de materiales en pruebas realizadas en el laboratorio genera grandes pérdidas de dinero y tiempo, si no se cuenta con una información específica sobre la composición y distribución que debe tener el material multicapas para suministrar una mayor resistencia a la erosión, para que el tiempo de vida de operación del metal se prolongue.

Por este motivo es necesario contar con un software que simule el comportamiento a la erosión de un recubrimiento multicapas y se obtenga una serie de resultados que cuantifiquen la respuesta a la erosión, y permita tener una tendencia del recubrimiento antes de realizar la parte experimental.

El contenido del libro se estructuró de la siguiente forma:

Se coloca en contexto al lector sobre el proyecto que se va a desarrollar.

Se presenta los diferentes mecanismos y modelos de erosión presentes en materiales dúctiles, frágiles y multicapas, consultados en la literatura.

Se muestran las especificaciones de la metodología de desarrollo de Ingeniería del Software utilizada en el trabajo de investigación. Se analiza el modelo base tenido en cuenta para realizar la simulación, aunque se crea una función matricial de ajuste que para calcular la velocidad de erosión se amplían el intervalo de diámetro de partícula de 29 opciones ([10-280] y 600 μm) a 60 opciones ([10-600] μm).

Se analiza el sistema utilizando técnicas de UML, se muestra el diseño y caracterización de cada componentes de la aplicación y los diferentes eventos de impacto. Además, se caracteriza el recubrimiento y se estudian todas sus especificaciones.

Se estudia la influencia de utilizar el Modelo Base (MB), el Modelo Base Ajustado (MBA), se evalúa la proximidad de los datos simulados con respecto a los valores experimentales, se comparan los resultados obtenidos y se establece la eficiencia de utilizar el MBA. Se establece un manual de tiempos de ejecución para facilitar al usuario el uso del simulador.

1. RESUMEN DEL PLAN DE PROYECTO DE GRADO

A continuación se describe brevemente el contenido del documento del plan de proyecto de grado presentado a la escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Industrial de Santander con el fin de guiar al lector en lo relacionado a objetivos y metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.

1.1 ESPECÍFICACIONES DEL PROYECTO

1.1.1 Título. Implementación de la Aplicación MODEROS 1.0 para Simular el Fenómeno de Erosión en un Recubrimiento Multicapa usado en las industrias generadoras de energía.

1.1.2 Director.

Profesor: MPE Henry Arguello Fuentes
Facultad de Ciencias Físico Mecánicas
Universidad Industrial de Santander

1.1.3 Codirector.

Profesor: Ph.D Darío Yesid Peña Ballesteros
Facultad de Ciencias Físico Químicas
Universidad Industrial de Santander

1.1.4 Autor.

Carlos Eusebio Laguado Fernández
1991958
Ingeniería de Sistemas e Informática
11

1.1.5 Entidad Interesada en el Proyecto

- Semillero de investigación en corrosión por fluidos pesados e integridad estructural, convenio de cooperación tecnológica 006 de 2006 UIS – ICP, el cual realiza investigación aplicada sobre los fenómenos de corrosión que ocurren en la industria de generación de energía y su efecto en la integridad estructural de activos.
- El Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander, Grupo A - Colciencias.
- El Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB) de la Universidad Industrial de Santander – Grupo A - Colciencias.

1.1.6 Costo del Proyecto. El costo del proyecto calculado es de \$19.604.000

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo general. Desarrollar e implementar una aplicación que permita simular el fenómeno de erosión en un recubrimiento multicapa bajo condiciones reales de trabajo con datos experimentales a nivel de laboratorio.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Implementar los algoritmos que representen el comportamiento erosivo de un recubrimiento multicapa de NiCrB-WC.
- Desarrollar un prototipo de Interfaz Gráfica de Usuario que muestre por medio de tablas, graficas e imágenes los resultados que cuantifican el desgaste del recubrimiento expuesto a un entorno erosivo específico en la simulación, y permita dar un análisis visual del fenómeno en estudio.
- Evaluar y comparar los resultados obtenidos en la simulación con los resultados experimentales llevados a cabo en el laboratorio.

1.2.3 Características fuera de alcance. La aplicación ha sido desarrollada bajo condiciones específicas de laboratorio, donde las pruebas realizadas y los resultados obtenidos permitieron crear modelos de erosión que permiten describir como se desgasta un material multicapas. Por tanto el alcance de este proyecto no llegará a cumplir los siguientes puntos.

- La aplicación no genera reportes de resultados automáticamente debido al uso condicionado del software por parte del Ingeniero Metalúrgico o ingeniero Químico.
- Esta herramienta no tiene el alcance para generar gráficas en 3D.
- No genera animación en 3D debido a la complejidad de la caracterización del recubrimiento.
- No se realizaron pruebas con ángulos de impacto oblicuos, por lo que en la simulación y la animación se consideraron escenarios de impacto con incidencia normal (90°).
- No se manejan concentraciones diferentes a las empleadas en la experimentación, debido a que en el estudio realizado en la tesis doctoral [6] se utilizaron concentraciones específicas por ser una investigación inicial y novedosa.
- No almacenará información de registro de valores para cada simulación

1.2.4 Herramientas de Desarrollo. Como herramienta de desarrollo se utilizará JAVA SE Development.

La aplicación se desarrollará utilizando el editor de JAVA, Netbeans 6.1, para diseñar y crear los diferentes interfaces gráficas de usuario.

La herramienta de desarrollo permite la creación de una aplicación de escritorio que facilite el uso del simulador a implementar.

La programación orientada a objetos que caracteriza a JAVA facilita la organización y disminución de código y evitando el uso excesivo de datos redundantes.

1.2.5 Metodología. Al considerar los diferentes modelos de procesos con sus respectivas ventajas y funcionalidades, se planteó en la elaboración de este proyecto de investigación utilizar la metodología del *rational unified process (RUP)* debido a que es un proceso comprobado y confiable en la industria de desarrollo de software, basado en el riesgo e iteraciones y procesos incrementales.

Partiendo de la necesidad de tener a disposición por parte de los interesados en el desarrollo de esta aplicación, una herramienta que les permita tener una tendencia de desgaste del recubrimiento y obtener un perfil de su espesor, que represente el fenómeno de erosión en el recubrimiento multicapas (NiCrB/WC), estableciendo criterios de análisis y mostrando que su eficiencia puede proteger el material expuesto. Se ha escogido esta metodología que se caracteriza en realizar pruebas y prototipos incrementales a medida que se profundice en la simulación del fenómeno de erosión.

1.2.6 Justificación

1.2.6.1 Definición del problema. En muchas aplicaciones industriales, en particular, las empresas de generación de energía y las petroleras exponen parte de su infraestructura a entornos erosivos siendo este un mecanismo de daño muy serio que desencadena fallas estructurales de los materiales y perjuicios financieros, al recurso humano y al ambiente.

El fenómeno de erosión por impacto de partículas ha sido ampliamente estudiado, debido a que ocasiona grandes pérdidas de dinero en empresas que manejan en sus procesos productivos partículas sólidas.

Los recubrimientos compuestos por materiales dúctiles (suaves) ó frágiles (duros) tienen diferentes velocidades de erosión bajo las mismas condiciones, convirtiéndose en un inconveniente para la protección de los materiales y la prolongación del tiempo de vida útil del material base (metal recubierto).

Una solución alternativa a este problema es contar con un recubrimiento multicapas compuesto por un material dúctil (Ni-Cr-B) reforzado con un material compuesto WC (*Carburo Wolframio ó Carburo Tungsteno*) dispersado en la matriz dúctil con concentraciones que varían ascendentemente desde el material base hasta la superficie de recubrimiento que va a estar expuesto al entorno erosivo, y además el recubrimiento debe tener un equilibrio óptimo en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas.

De esta manera, usar un modelo de erosión adecuado para un recubrimiento multicapas puede ser una nueva alternativa de prolongar el tiempo de vida útil del material y disminuir daños en su estructura.

La simulación permite reflejar el comportamiento de erosión en un recubrimiento multicapas y se obtiene un perfil de espesor del recubrimiento en función del tiempo de exposición para impactos únicos y sucesivos, ofreciendo información específica de su composición que permita tener una idea del mismo antes de realizar la experimentación y consecuente fabricación.

La aplicación propone una solución al problema, determinar la resistencia a la erosión de un recubrimiento multicapas específico (NiCrB/WC) que proporcione una mayor protección al material y aumente la vida útil del metal recubierto.

1.2.7 Impacto esperado y viabilidad. El Modelado del fenómeno de erosión es un área de la investigación en las industrias petroleras y generadoras de energía, con un importante aporte no solo para estimar que tan eficiente podría ser la utilización de recubrimiento específico, sino también por la creación de una

alternativa de predicción que determine la concentración del recubrimiento más adecuada en el momento de fabricación para evitar costos indirectos usados en experimentos, pruebas de laboratorio y procedimientos industriales; y así reducir perjuicios económicos, al recurso humano, a la infraestructura de la planta y al ambiente.

Como proyecto de investigación se pretende proporcionar un prototipo software para apoyar este proceso, debido a que en el mercado no existe una herramienta que proporcione esta funcionalidad; y además es uno de los primeros trabajos de investigación de simulación en el desarrollo del área de Tribología en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES

La erosión de materiales dúctiles y frágiles ha sido estudiada durante décadas por autores tales como Finnie, Hutchings y Sundararajan; pero han sido pocos los estudios de simulación sobre erosión en materiales de dos fases (Multicapas).

Hacer una revisión de estos estudios para la erosión de estos materiales ayuda a entender los diferentes mecanismos de daño que se presentan y permite tener una idea clara de cómo influyen en el deterioro y desgaste de la superficie que está expuesta a estos ambientes de agresión.

Para simular el comportamiento del fenómeno de erosión en el recubrimiento (NiCrB-WC) se dispone de unos modelos matemáticos que describen las velocidades de erosión para materiales dúctiles, frágiles y multicapas, este último tiene la complejidad de combinar materiales frágiles y dúctiles, que presentan diferentes velocidades de erosión bajo las mismas condiciones erosivas.

Algunos de los factores que afectan la velocidad de erosión son:

- Propiedades del objeto (matriz): densidad, dureza.
- Propiedades de la partícula (impactante): densidad, dureza, forma, velocidad de impacto, ángulo de impacto.
- Ambiente: temperatura, pH.

2.1.1 Fundamentos de la erosión. La erosión de partículas sólidas ocurre cuando partículas sólidas discretas que chocan una superficie. La degradación depende del número y masa de partículas individuales impactantes, y sus vectores

de velocidad de impacto. La erosión depende notablemente del ángulo de impacto, con una dependencia variable para materiales dúctiles y frágiles.

Estudios realizados por Ian Finnie [7] en la universidad de California han servido de base para modelar la erosión de materiales frágiles y dúctiles, este estudio consistió en la obtención de una fórmula que relaciona la pérdida de material (pérdida de peso) y el ángulo con que impactan las partículas solidas al material metálico.

Una expresión para la velocidad de erosión bidimensional es:

$$E = Kv^n f(\phi) \quad (1)$$

K: constante

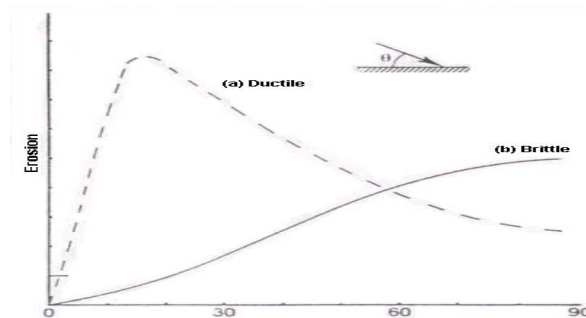
V: velocidad

N: exponente de velocidad (2 a 3 para dúctiles, 3 a 5 para frágiles)

ϕ : ángulo de impacto (relativo a la superficie)

La erosión de materiales dúctiles (la mayoría de los metales) muestra un máximo de ángulo de impacto de 20° – 30°, mientras que la erosión de materiales frágiles es muy alta a una incidencia normal (ángulo de 90°) como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Dependencia de erosión angular para materiales (a) dúctiles y (b) frágiles 1.



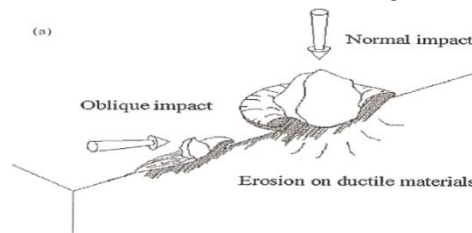
Fuente: A. Levy y I. M. Hutchings [7][10]

2.2 EROSIÓN DÚCTIL

En una erosión dúctil ideal se experimenta una tensión plástica grande antes de que ocurra la fractura, se da por la formación y remoción subsecuente de pequeñas placas (labios en la superficie) de material extruido por impactos adicionales.

La velocidad de erosión máxima tiene una incidencia oblicua (ángulos de impacto menores de 30°) y depende del número y masa de partículas erosivas y de los vectores de velocidad de impacto, como se observa en la Figura 2.

Figura 2. El comportamiento de fractura erosiva para materiales dúctiles.



Fuente. Elsevier [8]

Para las ecuaciones matemáticas que se utilicen en la simulación del fenómeno de erosión existe un evento común para el mecanismo de daño que se llegue a presentar. Este evento de impacto relaciona el tamaño de la partícula impactante (erosiva) y el tamaño de la fase impactada, para este caso será la matriz NiCrB (fase dúctil).

Para partículas pequeñas que impactan la fase dúctil se tendrá una erosión aleatoria debido a que el evento de impacto inicialmente puede erosionar la fase dúctil o frágil.

Existen varios tipos de modelos para este tipo de erosión, entre sus autores más influyentes están:

2.2.1 Modelos de Erosión Dúctil.

2.2.1.1 Finnie. Sus modelos se derivaron de considerar las ecuaciones de movimiento de una sola partícula abrasiva que golpea una superficie [17]. El volumen del material removido es estimado por la trayectoria de la partícula, debido a la acción cortante de la partícula abrasiva (erosiva), cuando se presenta una deformación plástica. Este modelo es apropiado para ángulos bajos, donde se asume simplemente la cara principal de la partícula en contacto con la superficie durante la erosión.

Las ecuaciones finales del modelo son:

$$W = \frac{Mv^2}{p} f(\phi) \quad (2)$$

W: ancho removido

M: masa total de partícula erosiva.

V: velocidad

P: constante de componente horizontal de fuerza-tensión de contacto

F: función del ángulo

ϕ : ángulo de incidencia

Ψ : radio de longitud de contacto para el fondo de corte

P: densidad del objeto

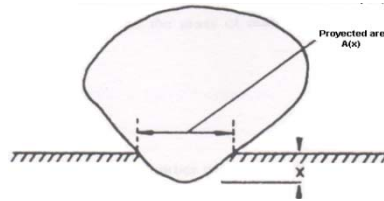
El concluyó que su trabajo se ajusta para ángulos menores de 45°, pero es incapaz de predecir erosión para ángulos mayores para este tipo de material. Este modelo matemático es útil utilizarlo cuando la erosión se presenta por impactos sucesivos de partículas solidas en superficies dúctiles del recubrimiento (NiCrB-WC).

2.2.1.2 Hutchings. Trabajó en la erosión de materiales dúctiles a incidencia normal (90°). En 1979 el propuso un mecanismo para la erosión causada por fatiga de bajo ciclo [9]. El desarrolló una ecuación sencilla, dada en el libro

“TRIBOLOGY” [10], donde asumió que la deformación de la superficie es perfectamente plástica, con una presión de indentación constante (dureza H).

A un tiempo t, la profundidad de indentación es x, y el área seccional transversal de indentación es A(x), determinada por la forma de la partícula, como se observa en la Figura 3.

Figura 3. Indentación de una superficie deformada plásticamente por un grano de forma irregular.



Fuente: I. M. Hutchings [9]

La fuerza adyacente que desacelera a la partícula se debe a la presión que actúa sobre el área

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -HA(x) \quad (3)$$

La partícula llega a reposar en el fondo d, cuando el volumen final de indentación es V., en ese punto el trabajo hecho por la fuerza restauradora es equivalente a la energía cinética inicial de la partícula.

$$\int_0^d HA(x)dx = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

$$V = \int_0^d A(x)dx = \frac{mv^2}{2H} \quad (5)$$

Pero solo alguna fracción de material desplazado es removido como un escombros, por lo tanto la masa de material removido es:

$$m = \frac{\rho V}{2H} \quad (6)$$

ρ : densidad del objeto.

La pérdida de masa de una superficie es proporcional a la masa total de la partícula erosiva. La erosión es definida como la masa de material removido por la masa de la partícula erosiva que golpea la superficie.

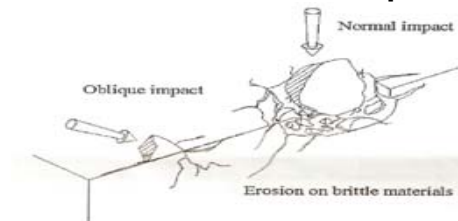
$$E = \frac{K\rho v^2}{2HN} \quad (7)$$

N: número de partículas que golpean la superficie.

2.3 EROSIÓN FRÁGIL

En la erosión frágil ideal se experimenta una tensión elástica antes de que ocurra fractura, diferentes tipos de grietas se interceptan y se forma una red de grietas que hace posible que pequeños trozos de metal sean removidos del material base. La velocidad de erosión máxima se obtiene a un ángulo normal (ángulos de impacto de 90°) y depende del número y masa de partículas erosivas y de los vectores velocidad de impacto, como se observa en la Figura 4.

Figura 4. El comportamiento de fractura erosiva para materiales frágiles.



Fuente: Elsevier [8]

Para las ecuaciones matemáticas que se utilizan en la simulación del fenómeno de erosión existe un evento común para el mecanismo de daño. Este evento de impacto relaciona el tamaño de la partícula impactante (erosiva) y el tamaño de la fase impactada, para este caso serán los granos de carburo Tungsteno WC (fase frágil). Para partículas pequeñas que impactan la fase frágil se tendrá una erosión aleatoria debido a que el evento de impacto inicialmente puede erosionar la fase frágil o dúctil del material.

Los modelos que se han propuesto para este tipo de erosión, son los siguientes:

- Aquellos en los cuales la pérdida de material primeramente ocurre por el enlace y desarrollo de grietas de cono Hertziana (penetrador despuntado). Ocurre una respuesta elástica con fractura iniciando defectos en las superficies pre-existentes.
- Aquellos donde la pérdida de material ocurre principalmente por el enlace de grietas laterales (penetrador agudo). Ocurre una respuesta elástico – plástico con fractura iniciando un defecto en la sub superficie pre-existente bajo el penetrador (partícula erosiva).

2.3.1 Modelos de Erosión Frágil.

2.3.1.1 Hutchings I.M. El modelo de Hutchings I.M. [18] para la fractura elástico-plástica, donde la remoción de material se da por medio de intersecciones de grietas laterales, asume que la resistencia a la penetración es la dureza cuasi-estática H.

$$E = \frac{r^{0.7} * v^{2.4} * \rho_t^{0.2} * \rho_p * H^{0.1}}{K_{IC}^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

E: Velocidad de erosión expresada como la masa de material perdido sobre la masa de las partículas erosivas que causaron esta pérdida.

r: Radio de la partícula erosiva.

v: Velocidad de las partículas erosivas.

ρ_t : Densidad del sustrato metálico.

ρ_p : Densidad de las partículas erosivas.

H: Dureza del sustrato metálico.

K_{IC} : Tenacidad a la fractura del sustrato metálico.

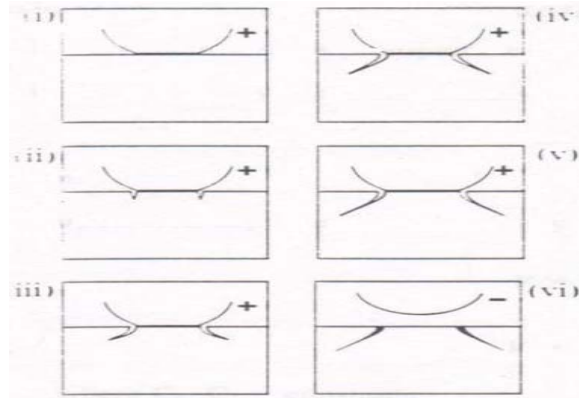
2.4 MECANISMOS DE EROSIÓN PARA MATERIALES DÚCTILES Y FRÁGILES

2.4.1 Fractura Hertziana. La fractura Hertziana ocurre en el régimen donde el contacto entre la partícula erosiva y la superficie es exclusivamente elástica [14]. Ocurre cuando un penetrador esférico duro encargado normalmente sobre un plano, produce la fractura elástica en forma de cono; esto se muestra esquemáticamente en la Figura 5.

Las etapas en el desarrollo de la grieta Hertziana son las siguientes:

- (i) Los defectos existentes en la superficie se someten a esfuerzos de tensión fuera de la zona de contacto.
- (ii) Un defecto se ubica alrededor del contacto circular para formar una grieta superficial.
- (iii) La aplicación de una carga adicional de la grieta superficial crece hacia el interior del material.
- (iv) Para una carga crítica, la grieta llega a ser inestable y se propaga descendiendo en forma de cono Hertziano.
- (v) La grieta continua su crecimiento en estado estable, a cargas adicionales.
- (vi) Cuando se retira la carga, la grieta se cierra.

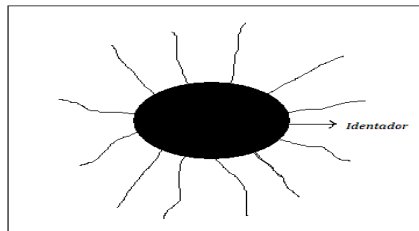
Figura 5. Desarrollo de una grieta Hertziana en forma de cono en un material frágil.



Fuente: Lawn B. [14]

2.4.2 Fractura lateral. La fractura lateral ocurre en el régimen donde el contacto entre la partícula erosiva y la superficie es elástico-plástico. Se produce en una superficie donde las tensiones máximas son aproximadamente paralelas a la superficie [10].

Figura 6. Vista superior del crecimiento de grietas laterales producidas por un penetrador agudo.

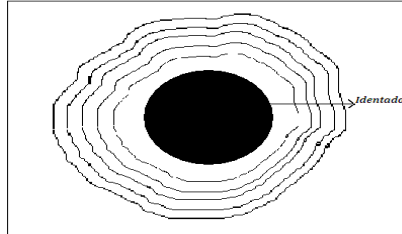


Fuente: I. M. Hutchings [10]

2.4.3 Fractura radial. La fractura radial ocurre en el régimen elástico-plástico donde las tensiones máximas son tangenciales y producen grietas radiales que se propagan a lo largo de la superficie [15].

Tanto la fractura lateral como la radial son generadas por penetradores agudos. La fractura elástico-plástica depende del radio del penetrador, dureza y tenacidad a la fractura del material de blanco.

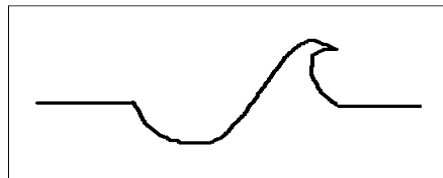
Figura 7. Crecimiento de una grieta hertziana en un material frágil.



Fuente: H. Conrad, D. McCabe y G.A. Sargent [15]

2.4.4 Fractura de labios. En este mecanismo se presenta principalmente a impactos normales. El impacto de la partícula erosiva sobre un material dúctil genera la formación de un labio alrededor del sitio de impacto y su posterior remoción durante los impactos siguientes.

Figura 8. Mecanismo de arado por el impacto de partículas esféricas a incidencia oblicua.



Fuente: Finnie I. [16]

2.5 APROXIMACIÓN ESTEREOOLÓGICA [1]

La investigación del carburo de la aleación de tungsteno cementado (WC-Co) realizada por Conrad [15] se centró en la influencia de la microestructura sobre la velocidad de erosión. A fin de escribir la microestructura de una manera precisa y reproducible, se necesita considerar los parámetros medibles por estereología cuantitativa.

La estereología cuantitativa intenta caracterizar numéricamente los aspectos geométricos de la microestructura que interesan en un estudio. Las expresiones que se utilizan relacionan las medidas en secciones bidimensionales con respecto a la estructura tridimensional, sin considerar si los aspectos microestructurales ocurren accidentalmente o en algún arreglo preferencial. En términos simples, los valores promedio pueden obtenerse a partir de estructuras aleatorias u orientadas, y estos valores promedio caracterizan la microestructura. Underwood [20] realizó una investigación exhaustiva sobre el estudio de la estereología cuantitativa, donde se establecieron las bases para el estudio del espacio tridimensional.

2.5.1 Fundamentos de la Estereología. Considere un agregado que consiste en dos constituyentes, una fase de partícula (α) y la matriz (β) homogénea.

2.5.1.1 Contigüidad. Es una medida del grado de contacto de las partículas α dentro de la matriz β .

Gurland [21] definió la contigüidad (C) como la fracción de la superficie total interna de una fase que es compartida por partículas de la misma fase.

$$C = \frac{2 \cdot S_{\alpha\alpha}}{2 \cdot S_{\alpha\alpha} + 2 \cdot S_{\alpha\beta}} \quad (9)$$

C : Contigüidad de la fase α

$S_{\alpha\alpha}$: Área de la interface entre partículas α por unidad de volumen de mezcla

$S_{\alpha\beta}$: Área de la interface entre partículas α y la matriz β por unidad de volumen de mezcla.

Las áreas interfaciales pueden ser obtenidas por simples modificaciones de los interceptos en un plano al azar. N_l que se define como el número de interceptos de características de la microestructura por unidad de longitud de la línea de ensayo.

La ecuación (9) puede revisarse usando símbolos alternativos como:

$$C_\alpha = \frac{2 \cdot N_{\alpha\alpha}}{2 \cdot N_{\alpha\alpha} + 2 \cdot N_{\alpha\beta}} \quad (10)$$

$N_{\alpha\alpha}$: el número de interceptos entre una línea aleatoria de longitud unitaria y las

interfaces entre partículas (α/β).

$N_{\alpha\beta}$: el número de interceptos entre una línea aleatoria de longitud unitaria y la interface (α/β).

Esta ecuación es válida para cualquier distribución de tamaños y formas de partícula.

2.5.1.2 Intercepto de líneas promedio. La longitud del intercepto de la línea promedio es la distancia a través de aquellas partículas de fase α orientadas aleatoriamente.

$$L_{\alpha} = \frac{2 \cdot V_{\alpha}}{2 \cdot N_{\alpha\alpha} + 2 \cdot N_{\alpha\beta}} \quad (11)$$

L_{α} : Intercepto de las líneas promedio

V_{α} : Fracción en volumen de partículas α

2.5.1.3 Trayectoria media libre de la matriz. En un agregado, la fase matriz aglutinante está presente predominantemente como una capa delgada entre las partículas α . El espesor de la capa de aglutinate es la trayectoria media libre, así como se muestra en la Figura 9.

Como $V_{\alpha} + V_{\beta} = 1$

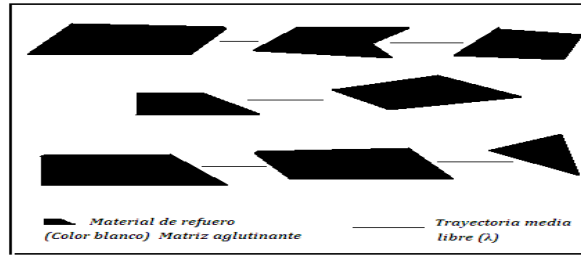
$$\lambda = L_{\alpha} * \frac{V_{\beta}}{(1-V_{\beta})(1-C)} \quad (12)$$

: Trayectoria media libre de la matriz

V_{β} : Fracción en volumen de matriz

C : Contigüidad

Figura 9. Representación esquemática de la trayectoria libre en un material compuesto.



Fuente: El Autor

2.5.1.4 Continuidad y contacto de partículas. Teóricamente el alcance y el número de las áreas de contacto en una mezcla de fases dependen de las áreas de las fases presentes, si se alcanza el equilibrio. Comúnmente, es más dependiente del proceso de fabricación y la historia de la muestra. Se puede considerar la ocurrencia de contactos de partículas como un fenómeno aleatorio. El grado de continuidad se define como la probabilidad de cadenas de longitud infinitamente larga de partículas conectadas, y bajo ciertas condiciones, puede estar relacionada con la contigüidad (C) y el número promedio de contactos de partícula.

2.6 RECUBRIMIENTOS MULTICAPAS

2.6.1 Características del recubrimiento NiCrB-WC [3]. Aleaciones en Ni-Cr han sido usadas durante muchos años como recubrimientos debido a que suministran resistencia a la corrosión y al desgaste. Sin embargo, estos recubrimientos en algunas ocasiones no suministran una protección satisfactoria en ambientes agresivos, especialmente a elevadas temperaturas. Para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas bajo las anteriores condiciones se han adicionado carburos refractarios tales como WC, NiC y NbC que son dispersados en la matriz Ni-Cr [6].

Las adiciones de cromo mejoran la resistencia a la erosión debido a dos efectos. Primero, la formación de micro estructurales favorable que dan tenacidad a la

matriz y aumentan la adhesión con las partículas de carburo. Segundo, su presencia aumenta la fracción en volumen de la fase matriz para obtener una relación óptima carburo-matriz, que resulta en una distribución más eficiente de los carburos para aumentar la resistencia al daño por erosión.

La adición de Níquel produce un mejoramiento en las propiedades físicas y químicas durante su manejo en operaciones que requieran de fusión tales como el rociado térmico.

2.6.2 Erosión de Materiales Multifases. Los investigadores Hovis, Talia y Scattergood[11], investigaron varias “leyes promedio” las cuales podrían ser aplicadas a la erosión de partículas sólidas de materiales multicapas. Estas leyes promedio deben describir como un material de dos componentes se erosiona como un conjunto, teniendo en cuenta que el factor de fases dúctiles y duras tiene completamente diferentes resistencia a la erosión, y mecanismos de erosión. Los materiales dúctiles se erosionan por una combinación de micro mecanismos, y los materiales frágiles se erosionan por la generación y propagación de grietas laterales de sub superficie.

Cuando se consideran efectos sobre la micro estructura, el factor más importante es el tamaño de daño del impacto de erosión relativo a escala de la micro-estructura. El tamaño de la grieta se incrementa con el tamaño de partículas impactantes, velocidad y contenido de fase dúctil del objeto.

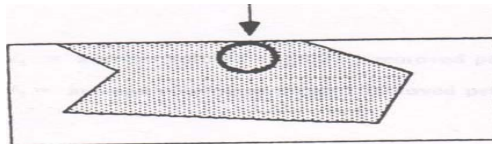
En las imágenes se tienen tres tipos de consideraciones.

1. La sección blanca de la figura es la fase dúctil.
2. La sección oscurecida de la figura es la fase frágil.
3. El círculo negro con borde grueso es el tamaño de daño de impacto.

Se puede observar dos tipos de eventos impacto.

Evento (a): Cuando el tamaño de la partícula impactante es relativamente pequeña con respecto a la micro-estructura. La erosión procede en cada fase completamente independiente del resto de la microestructura.

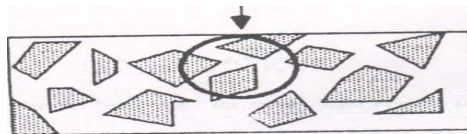
Figura 10. Evento (a) con un tamaño relativamente pequeño con respecto a la micro-estructura.



Fuente: Rebecca Stubbs [1]

Evento (b): de impacto recubre ambas fases, así la velocidad de erosión será descrita por una ley promedio, teniendo en cuenta la velocidad de erosión modificada de cada fase de la estructura.

Figura 11. Evento (b) con un tamaño mucho mayor con respecto a la micro-estructura [1].



Fuente: Rebecca Stubbs [1]

2.6.3 Modelos de Erosión de Materiales Multifases [1]

2.6.3.1 Leyes Promedio. Los problemas de modelado de la erosión de los recubrimientos son mucho más notorios para materiales multicapas.

Si el tamaño del evento impacto es grande con respecto a la microestructura, entonces se debe utilizar la ley promedio [11]:

Conversión de velocidad de erosión a unidades de pérdida de masa del objeto por unidad de masa de partícula erosiva (gg^{-1})

$$w_1 = \frac{V_1 \cdot \rho_1}{Q} \quad (13)$$

$$w_2 = \frac{V_2 \cdot \rho_2}{Q} \quad (14)$$

$V_1 = k_1 * Q$: Volumen promedio de fase dúctil removido por unidad de tiempo.

$V_2 = k_2 * Q$: Volumen promedio de fase frágil removido por unidad de tiempo.

ρ_1 : Densidad de la fase dúctil.

ρ_2 : Densidad de la fase frágil.

Q: Flujo de la partícula erosiva para la muestra.

k_1 y k_2 son constantes.

La tasa de erosión general está dada por:

$$\frac{1}{W} = \frac{m_1}{w_1} + \frac{m_2}{w_2} \quad (15)$$

w_1 : velocidad de erosión de la fase dúctil (matriz de color blanco en la anterior figura 8)

w_2 : velocidad de erosión de la fase frágil (forma geométrica de puntos negros en la anterior figura 8)

$m_1 = f_1 * \rho_1 / \rho$: Fracción de la masa de fase dúctil.

$m_2 = f_2 * \rho_2 / \rho$: Fracción de la masa de fase frágil.

f_1 : Fracción volumen de la fase dúctil.

f_2 : Fracción volumen de la fase frágil.

Esta derivación aplica para cualquier microestructura de tres-dimensiones con una distribución aleatoria de la fase frágil, a cualquier ángulo de incidencia.

2.6.3.2 Teoría de la Estructura. La posibilidad de una estructura de carburos es un tema muy complicado. La cantidad medida de la formación del esqueleto es

contigua, definida como el radio del grano limitando con el área de superficie (WC/WC) hasta el área total de la superficie (WC/WC + WC/Co) por Exner y Gurland [22]. Un nuevo parámetro, fracción de volumen continua (V_c) es definida como la fracción de volumen del esqueleto de carburo.

$$V_c = C * V_{WC} \quad (16)$$

V_c : Fracción de volumen continuo de WC

C : Contigüidad de carburo.

V_{WC} : Fracción volumen de carburo tungsteno WC

2.6.3.3 Lee y Gurland. Su suposición principal es la presencia de un esqueleto de carburos [23]. Porque la deformación plástica de la aleación requiere que el esqueleto de carburos se deforme plásticamente en línea con la fase aglutinante. También asume que las cargas aplicadas son transmitidas a través del esqueleto de carburos y la fase aglutinante contigua, con la deformación plástica ocurriendo con el contacto de carburo-carburo. Usando el concepto de análisis de límite plástico, ellos derivan

$$H_c = V_c * H_{WC} + (1 - V_c) * H_m \quad (17)$$

H_c : Dureza del compuesto (kg mm^{-2}).

H_{WC} : Dureza in situ de carburo tungsteno (kg mm^{-2}).

H_m : Dureza in situ de la matriz aglutinante Co (kg mm^{-2}).

2.6.3.3.1 Dureza in situ de la matriz aglutinante Co. La dureza del cobalto puro es alrededor de 340 kg mm^{-2} , como lo registrado por Dawihl and Frisch [24]. Ellos también observaron que la dureza de la fase cobalto en aleaciones WC-Co no queda contante, pero se incrementa con el contenido WC. La tensión entre las dos fases surge como un resultado de los diferentes coeficientes de expansión termal, y tensión interfacial, y la dureza de la fase aglutinante de cobalto que alcanza 825 kg mm^{-2} a 6% Co. Lee y Gurland usaron los resultados

experimentales de Dawihl y Frisch para relacionar la dureza a la microestructura, en términos de el grosor de la matriz o trayectoria media libre. La siguiente relación fue obtenida por el método de mínimo cuadrado.

$$H_m = 304 + 12.7 * \lambda^{-1/2} \quad (18)$$

H_m : Dureza in situ de la matriz aglutinante Co (kg mm⁻²).

λ : Trayectoria media libre de la matriz

2.6.3.3.2 Dureza in situ del carburo tungsteno. La relación de dureza de carburo tungsteno está dada como una función del tamaño partícula sobre un rango limitado, fue evaluado de una forma similar.

$$H_{WC} = 1382 + 23.1 * \bar{d}^{-1/2} \quad (19)$$

H_{WC} : Dureza in situ de carburo tungsteno (kg mm⁻²).

\bar{d} : Tamaño de la partícula.

La intercepción del valor dureza de 1382 kg mm⁻² es en el rango de valores de la microdureza reportada para el carburo tungsteno.

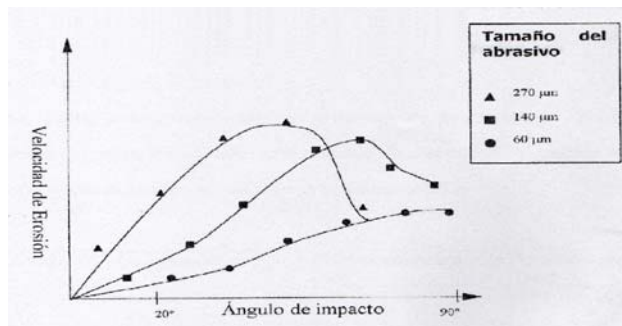
De esta manera, si el tamaño del evento es grande con respecto a la microestructura, entonces ocurre la erosión del compuesto como un conjunto, y por consiguiente se puede usar la ecuación Lee y Gurland para la dureza de compuestos, para predecir la velocidad de erosión. Es decir, para partículas erosivas grandes que golpean la superficie de contacto que cubre las dos fases, se tendrá una erosión homogénea que presenta resistencia a la erosión en función de la dureza de cada constituyente del recubrimiento, independientemente de que el evento de impacto inicialmente sea aleatorio.

2.6.3.4 Anad K, Morrison C, Scattergood R. El primer sistema usado para esta investigación fue una serie de aleaciones WC-Co con variación en el tamaño del grano de carburo tungsteno y el porcentaje de cobalto constante [25].

Se utilizaron partículas erosivas de diámetro promedio en el rango de 20 a 270 micrones. En cuanto a las aleaciones WC-Co se trabajaron tres tipos de aleaciones que contienen 6% en peso de cobalto y los tamaños máximos de cobalto fueron: 2 μ m (fino), 6 μ m (medio) y 16 μ m (grueso) para cada tipo de aleación.

Los resultados finales se pueden resumir en la Figura 12, y a continuación se muestran los principales análisis a los que llegaron Annad, Morrison y Scattergood después de los ensayos en el laboratorio.

Figura 12. Dependencia de la velocidad de impacto con la velocidad de erosión para un material multicapas al variar el tamaño de las partículas erosivas.



Fuente: K. Annad, C. Morrison, R. Scattergood y R. Warren [25]

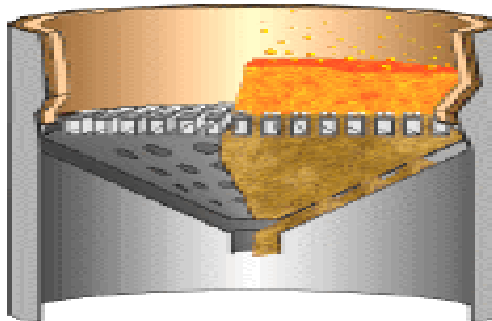
- A medida que el tamaño del carburo tungsteno disminuye y el tamaño de la partícula erosiva aumenta, se tiene que la máxima velocidad de erosión ocurre para valores de ángulos de impacto menores a 90°.
- A medida que el tamaño del grano del WC disminuye con todos los demás parámetros constantes, la velocidad de erosión disminuye.

- Para un tamaño fijo de partícula erosiva y a medida que la velocidad de impacto aumenta, la velocidad de erosión aumenta y la máxima velocidad de erosión ocurre para los ángulos de impacto menores a 90°.

2.7 LECHO FLUIDIZADO

Los sistemas de combustión en lecho fluidizado utilizan un lecho caliente de material como arena suspendido (fluidizado) dentro de un aumento de la columna de aire para quemar muchos tipos y clases de combustible. Esta técnica se traduce en una gran mejora en la eficiencia de la combustión de alto contenido de humedad de combustibles, y es adaptable a una variedad de "tipo de residuos de combustibles". La acción de lavado del material del lecho sobre las partículas de combustible aumenta el proceso de combustión por el paso lejano del dióxido de carbono y capas quemadas que normalmente forman alrededor de las partículas de combustible. Esto permite que el oxígeno llegue al material combustible mucho más fácil y aumenta la velocidad y eficiencia del proceso de combustión.

Figura 13. Sistema de combustión de un Lecho Fluidizado.



Fuente: Sitio Web [En línea] [33]

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 MODELO DE DESARROLLO

Para lograr los objetivos propuestos se organizó un grupo de trabajo conformado por el director del proyecto de la Escuela de Ingeniería de Sistemas, el codirector y líder en la investigación y miembro de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales y un estudiante de Ingeniería de Sistemas. Además de este grupo principal, se creó un grupo auxiliar conformado por un estudiante de pregrado quien realizó un trabajo de investigación en la fabricación de un recubrimiento usando técnicas de deposición electroforética, un estudiante de maestría de la escuela de ingeniería de sistemas e informática quien asesoro en procesos de optimización de distribución de valores en un intervalo específico, y grupo de profesores y auxiliares del semillero de investigación quienes asesoraron en temas concernientes a caracterización de recubrimientos, mecanismos de erosión y corrosión que afectan la microestructura de los materiales expuestos e este fenómeno y modelos de erosión.

En cuanto a la metodología en la gestión y desarrollo del software se usó la guía del *rational unified process (RUP)* [36], el cual es un proceso comprobado y confiable en la industria de desarrollo de software, dirigido por el riesgo, basado en iteraciones e incremental. Este proceso garantizó controlar el riesgo desde un principio, producir prototipos de acuerdo a los requisitos que surgieron en el proyecto y establecer una arquitectura sólida para el software. Como complemento a la metodología, se usó el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) para especificar, visualizar y documentar los diferentes aspectos relativos al sistema software bajo desarrollo, así como para el modelado de la simulación.

El RUP está dirigido por casos de uso, centrado en la arquitectura, iterativo (mini-proyectos) e incremental (versiones). Se implementaron las mejores prácticas actuales en ingeniería de software, como:

- Desarrollo iterativo del software.
- Administración de requerimientos.
- Uso de arquitecturas basadas en componentes.
- Modelado visual del software.
- Verificación de la calidad del software.
- Control de cambios.

3.1.1 Fases del Modelo de Proceso. Bajo esta etapa se estableció un marco de referencia para controlar los flujos de trabajo en cada fase del proceso.

Estas fases son: **Inicio, Elaboración, Construcción y Transición**. Cada fase concluye con un trabajo resultante bien definido donde se tomaron ciertas decisiones importantes y críticas de acuerdo a los flujos de trabajo.

Descripción de cada fase:

Inicio: se estableció la oportunidad y alcance del proyecto. Las partes interesadas acordaron el alcance, estimación de tiempo, y comprensión de los requerimientos.

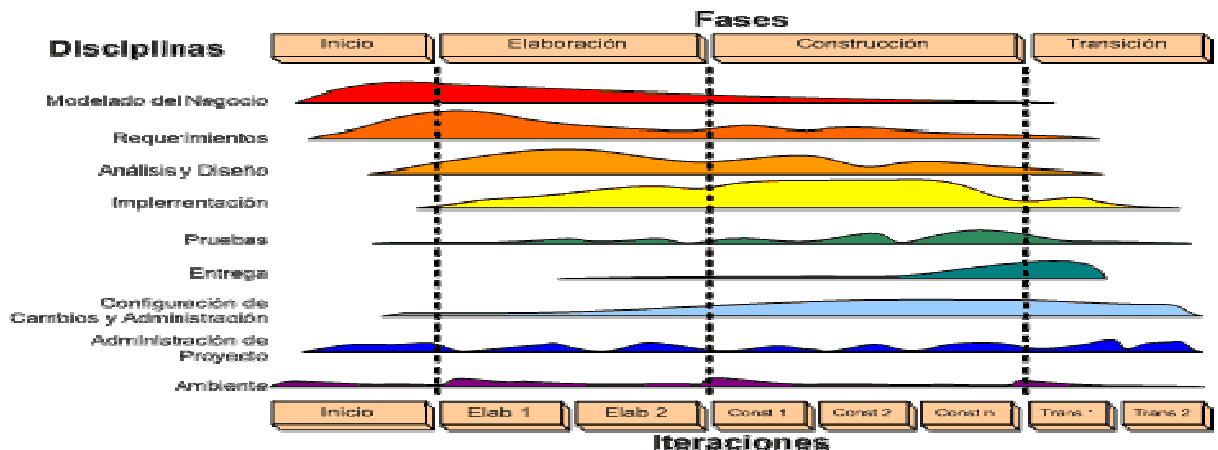
Elaboración: se analizó el dominio del problema, estableciendo una arquitectura base sólida, y se eliminaron los elementos de mayor riesgo. En esta parte se tuvo como resultado el análisis de los diferentes eventos de impacto, el análisis de distribución de figuras que representan el material de refuerzo WC y se planteó la necesidad de optimizar esta distribución en cada capa principal para que se mantuviera estable las concentraciones iniciales determinadas en la

experimentación, la arquitectura del software y diseños de interfaces gráficas y no sólo gráficas.

Construcción: todos los componentes restantes se desarrollaron e incorporaron al producto, y se utilizó escenarios de impacto variables para observar cómo sería la animación.

Transición: el objetivo es traspasar el software desarrollado a la comunidad de usuarios. Una vez instalado surgirán nuevos elementos que implicarán nuevos desarrollos. Como el RUP es un proceso demasiado grande, se debe acoplar al tipo de proyecto específico. Los flujos de trabajo que usamos en el desarrollo del software, y que están contenidos en cada fase del proceso, como se observa en la Figura 14 son:

Figura 14. Fases y flujos de trabajo del RUP.



Fuente: Sitio Web [En línea] [32]

3.1.2 Flujos Administrativos

- Gestión del proyecto. En esta disciplina se controló cada paso del proyecto estableciendo una lista de riesgo, consideraciones técnicas en la tecnología a

usar, tiempo de desarrollo, recursos disponibles y la generación del plan de desarrollo software para cada iteración; fue dirigida por iteraciones.

- Entorno. En esta disciplina se establecieron las herramientas de desarrollo a emplear, los estudios técnicos y de factibilidad de la tecnología y los procesos a implementar.

3.1.3 Flujos de Ingeniería.

- Modelado del Negocio. En esta disciplina quedo definido el alcance del proyecto y una visión global del software; fue dirigida por iteraciones.
- Requerimientos. En esta disciplina se establecieron los requisitos del usuario para definir la funcionalidad del software. Fue dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software.
- Análisis y Diseño. En esta disciplina se analizaron los requisitos de usuario y se diseñaron los componentes software de acuerdo a la lista de riesgos establecida en cada iteración. Fue dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software.
- Implementación y Codificación. En este flujo se codificaron los diseños realizados previamente en la tecnología escogida. Está dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software del RUP.
- Pruebas. En esta disciplina se realizaron las pruebas de ejecución del software, casos especiales, tiempos de cálculo y el comportamiento de los procesos. Fue dirigida por iteraciones de acuerdo al plan de desarrollo software.

3.2 PLAN DE TRABAJO

Para cumplir con los objetivos establecidos en este proyecto, y de acuerdo a la metodología empleada en el mismo, se planteó un plan de actividades compuesto

por las siguientes cuatro fases de acuerdo al RUP. Dentro de cada fase se generan prototipos:

3.2.1 Inicio. Se recopiló la información necesaria para argumentar y documentar el proyecto, además se realizaron diferentes actividades de carácter visual.

- Se elaboró el marco teórico que describe el fenómeno de erosión en un recubrimiento multicapas (NiCrB/WC) y sus diferentes mecanismos de daño.
- Se recopiló la información bibliográfica sobre modelos matemáticos de erosión en recubrimientos usados en la generación de energía, y sus formas de representar esta información
- Se establecieron los casos de uso más significativos para representar confiablemente el comportamiento del sistema.
- Se documentó la información obtenida en esta etapa de la investigación bibliográfica.

3.2.2 Elaboración. Se identificaron de los elementos potenciales de mayor riesgo en el desarrollo del software:

- Se implementaron los algoritmos que representan el comportamiento erosivo del recubrimiento multicapas para cada tipo de daño, dependiendo de la(s) fase(s) en las que impacta la partícula erosiva sobre la superficie del material expuesto a erosión.
- Se evaluó la eficiencia de los modelos matemáticos a utilizar para la versión presente, y se establecieron posibles cambios.
- Se identificó y se establecieron posibles escenarios de simulación similares a los presentados en las pruebas de laboratorio.
- Se documentaron los procedimientos de desarrollo y sus etapas.

- Se definió el plan de desarrollo software para cada versión que se elaboró (Aproximadamente 2 versiones generales), y para la primera de la siguiente fase “Construcción”.

3.2.3 Construcción. Se incorporaron los componentes restantes desarrollados, al producto, concentrándose en la producción en sí.

- Se depuraron los algoritmos elaborados y criterios evaluativos de la fase “Elaboración” con base en las nuevas solicitudes y requerimientos de los usuarios.
- Se diseñó y se elaboró la interfaz gráfica de usuario que muestra inicialmente los resultados que cuantifican el desgaste del recubrimiento.
- Se documentaron los procedimientos de desarrollo y sus etapas.
- Se definió el plan de desarrollo software para cada versión que se elaboró seguidamente (Aproximadamente 2 versiones generales), y para la primera de la siguiente fase “Transición”.

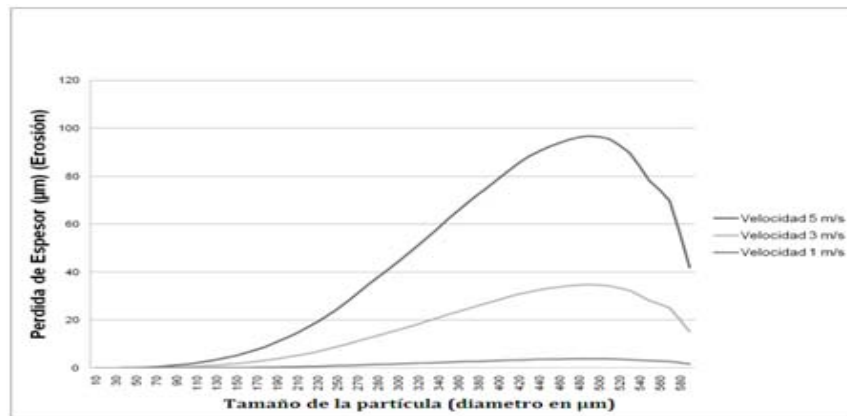
3.2.4 Transición. En esta fase se puso en marcha el software y se evaluaron los nuevos requisitos que surgieron en el proyecto:

- Se depuraron los algoritmos de los modelos matemáticos, y criterios evaluativos desarrollados en la fase “Construcción”.
- Se validaron los resultados de la simulación con respecto a los obtenidos experimentalmente.
- Se creó el manual de usuario y el manual técnico.
- Se estableció un plan de contingencia para brindar asesoría técnica al usuario encargado de utilizar el software desarrollado.

3.3 MODELO DE EROSIÓN

3.3.1 Modelo Base MB [3]. En la Figura 15 se muestra el problema encontrado, ya que para una velocidad de 1 m/s es poco apreciable el incremento, a una velocidad de 3 m/s aparecen valores mayores para diámetros menores de 600 μm y a una velocidad de 5 m/s esta tendencia se hace mayor indicando que para valores mayores de 600 μm disminuye la erosión hasta llegar a velocidades de erosión más bajas, y realmente no es lo que sucede en las pruebas de laboratorio.

Figura 15. Efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión para el modelo anterior MB.



Fuente: Autor.

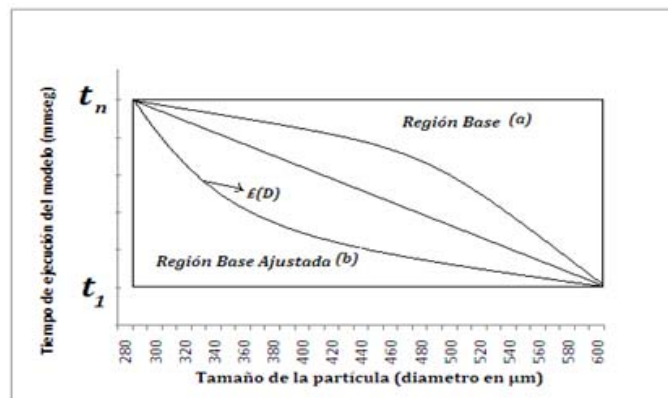
El modelo base [3] se expresa en la ecuación 20.

$$E = K * D^m * v^n * f(90^\circ) \quad (20)$$

K es la constante del material, D es el diámetro de la partícula, m es el exponente de diámetro (2 a 6 para dúctiles y para frágiles), v es la velocidad de la partícula, n es el exponente de velocidad (2 a 3 para dúctiles, 3 a 5 para frágiles) y 90° es el ángulo de impacto (Incidencia normal).

3.3.2 Función Matricial de Ajuste $\mathcal{E}(D)$. Al implementar la función matricial en el modelo base descrito anteriormente, se utilizaron valores de la región triangular superior llamada Región Base (a), como se muestra en la Figura 16. Una vez, identificado este problema se planteó construir una multifunción que ajuste el modelo base mediante una región factible de valores cuya cantidad es infinita, pero estos valores fueron acotados progresivamente con los valores de erosión generados a medida que aumenta el diámetro de la partícula. Como se muestra en la región triangular inferior de la Figura 16 llamada Región Base Ajustada (b).

Figura 16. Región de valores para la función matricial del tiempo de ejecución del modelo respecto al diámetro de la partícula.



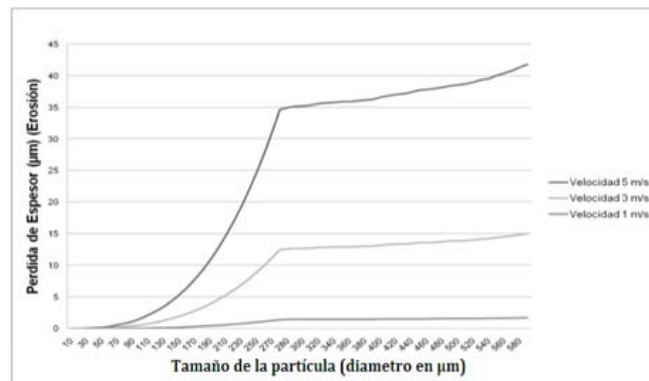
Fuente: Autor.

3.3.3 Modelo Base Ajustado (MBA). Este modelo es apropiado para un ángulo de impacto de 90° , donde se asumen las características principales de la partícula que está en contacto con la superficie del recubrimiento durante la erosión, la función matricial del tiempo de ejecución del modelo respecto al diámetro de la partícula y el tiempo de exposición del recubrimiento, así como se expresa en la ecuación (21) [Autor].

$$E = K * D^m * v^n * \mathcal{E}(D) * t_{exp} * f(90^\circ) \quad (21)$$

K es la constante del material, D es el diámetro de la partícula, m es el exponente de diámetro (2 a 4 para dúctiles y para frágiles), v es la velocidad de la partícula, n es el exponente de velocidad, $\mathcal{E}(D)$ es la función matricial del tiempo de ejecución del modelo respecto al diámetro de la partícula y t_{exp} es el tiempo de exposición del recubrimiento y 90° es el ángulo de impacto (Incidencia normal).

Figura 17. Efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión para el nuevo modelo MBA, utilizando patrones de comparación (Desgaste-Diámetro-Iteración por milisegundos).



Fuente: Autor.

Como se observa en la Figura 17, a velocidades de 1 m/s, 3 m/s y 5 m/s se pudo obtener una región de estabilidad progresiva para valores entre [280-600] μm indicando una leve tendencia creciente de la velocidad de erosión a medida que incrementa el diámetro de la partícula, así como ocurre en el laboratorio. Esta tendencia aproximada del nuevo modelo respecto a los datos experimentales mejora la estimación de la erosión para cualquier tiempo de exposición, cualquier diámetro de la partícula y para velocidades de partícula pequeñas.

3.3.4 Factor de Proporcionalidad de Modelos de Erosión. En investigaciones realizadas en el estudio de erosión de partículas sólidas sobre la superficie de algún tipo de material compuesto, se encontró una relación de proporcionalidad entre la velocidad de erosión dúctil y la velocidad de erosión frágil para impactos

de partículas solidas con ángulos de incidencia normal (90°). Para este ángulo, la erosión es mayor en un material frágil que en un material dúctil.

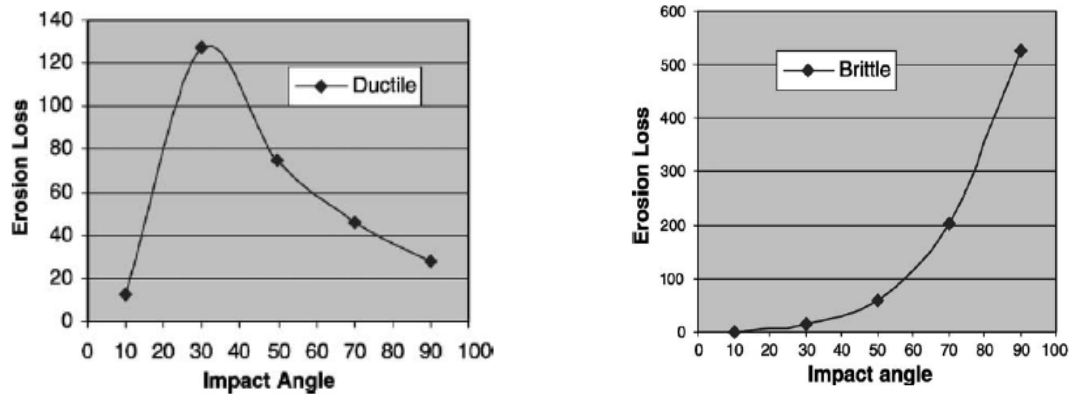
Se determinó una relación de proporcionalidad para los modelos de erosión dúctil y frágil, como se indica en la ecuación (22).

$$E_{\text{frágil}} = k * E_{\text{dúctil}} \quad (22)$$

Donde, $E_{\text{Frágil}}$ es la velocidad de erosión frágil, K es el factor de proporcionalidad y $E_{\text{Dúctil}}$ es la velocidad de erosión dúctil

En la investigación de Q. Chen, D. Y. Li [30][31] se presentan variaciones en la erosión de material dúctil y frágil con una proporción equivalente K_1 . La relación de proporcionalidad se encuentra de manera implícita en la Figura 18.

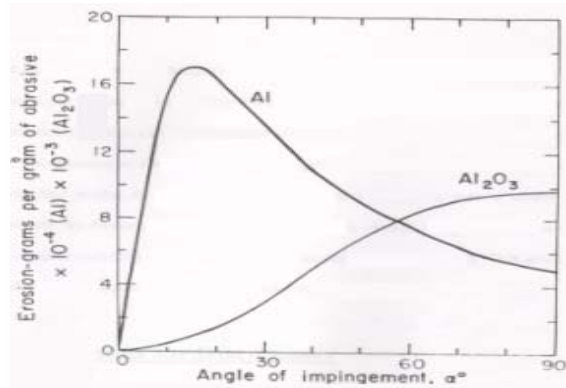
Figura 18. Relación entre ángulo de impacto y pérdida de erosión.



Fuente: Q. Chen, D. Y. Li [30]

En la investigación de Rebecca Stubbs [1] se presentan variaciones en la erosión de material dúctil y frágil con una proporción equivalente K_2 . La relación de proporcionalidad se encuentra de manera implícita en la Figura 19.

Figura 19. Relación entre ángulo de impacto y pérdida de erosión.



Fuente: Rebecca Stubbs [17]

Estos factores de proporcionalidad para este ángulo de impacto son muy aproximados, y de esta manera se obtiene un factor de proporcionalidad promedio como se muestra en la ecuación (23).

$$K_3 = (K_1 + K_2)/2 \quad (23)$$

Donde el factor de proporcionalidad obtenido K_3 en esta relación, tendrá una magnitud con un error relativo del 1.38% con respecto a la proporción encontrada por Rebecca Stubbs [1] siendo esta la fuente de estudio para este trabajo de investigación. De esta manera, haber encontrado una buena aproximación de los coeficientes de proporcionalidad de erosión dúctil-frágil, se implementa la ecuación (22) utilizando el factor de proporcionalidad K_3 y se utiliza un modelo matemático específico dependiendo del evento de impacto que se presente en el momento de chocar la partícula sólida erosiva sobre la superficie del recubrimiento.

3.3.5 Utilización de un modelo específico y del factor de proporcionalidad.

Se presenta cuando se cuenta con un modelo específico, puede ser un modelo de erosión dúctil o un modelo de erosión frágil, y mediante el uso del factor de proporcionalidad encontrado K_3 , se puede estimar el modelo faltante. De esta manera al simular algún evento de erosión dúctil, frágil o multicapa se puede evidenciar las diferentes velocidades de erosión para cada tipo de material bajo

las mismas condiciones (diámetro y velocidad de partícula erosiva, ángulo de impacto de 90° (incidencia normal) y tiempo de exposición del recubrimiento).

3.3.6 Utilización de un modelo promedio, un modelo de influencia de erosión y el factor de proporcionalidad. Se presenta cuando se cuenta con un modelo promedio, es decir, se calcula la erosión del recubrimiento en un tiempo de exposición establecido teniendo en cuenta los dos modelos implícitamente (modelo multicapa). Un inconveniente encontrado al realizar la simulación del fenómeno fue el no contar con un modelo dúctil y un modelo frágil por separado y a su vez no tener una relación entre ellos.

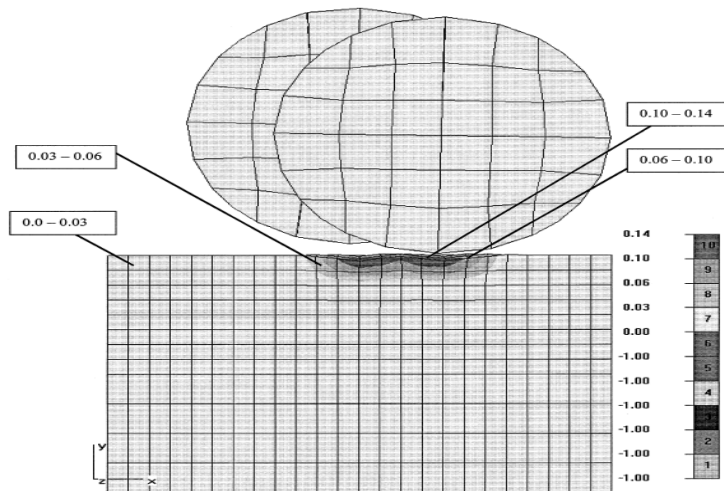
Al identificar este problema se llegó a la necesidad de encontrar una relación entre:

- Los valores calculados con este tipo de modelo promedio.
- El efecto variable de la velocidad de erosión para materiales dúctiles y frágiles con incidencia normal.
- Factor de proporcionalidad entre estos dos tipos de desgaste descrito anteriormente.
- La probabilidad de incidencia de cada tipo de material en el cálculo de la erosión dentro de la región de impacto, es decir, la región en la que choca la partícula erosiva con la superficie del material cuya energía se puede presentar de dos formas. (a) distribución de la energía sobre el material dúctil formando subcapas por encima del material “labios” (tensión plástica), (b) concentración de la energía en una región específica del material frágil formando una red de grietas (tensión elástica).

3.3.7 Región de Contacto.

3.3.7.1 P.J. Woytowitz, R.H. Richman [29]. Un modelo de región de impacto consta de una serie de impactos, y la atención de estos eventos es obtener elementos lo suficientemente pequeños que puedan capturar las concentraciones inducidas por impactos múltiples al mismo tiempo de mantener el número de elementos y nodos dentro de los límites manejables. Varias iteraciones de las mallas y el ámbito producido en la configuración [29] mostrada en la Figura 20.

Figura 20. Vista sectorial en primer plano para dos impactos no coincidentes



Fuente: P.J. Woytowitz, R.H. Richman [29]

3.3.7.2 Modelo de Región de contacto Implementado. Se establece una región triangular que abarca la zona de impacto y según la posición central de choque de la partícula erosiva se calcula la probabilidad de impacto en una zona dúctil ó en una zona frágil para estimar que tipo de evento se presenta, descritos estos más adelante. La región de impacto se divide en cuatro partes donde cada parte le corresponde un nivel específico de valor de la velocidad de erosión, y en cada punto (pixel) del recubrimiento se almacena ese valor, y una vez sobrepasado un valor crítico llamado “umbral de borrado” se borra el pixel indicando en la

animación que esos puntos han sido borrados (es decir, erosionados). El umbral de barrido depende de una cantidad crítica de velocidad de erosión que es almacenada en cada punto del recubrimiento y fue encontrada creando una matriz que relaciona diámetro de la partícula, tiempo de ejecución del modelo promedio y la velocidad de la partícula, su valor se indica en la ecuación (24) [Autor] y fue estimado para diámetros de [150-280] μm , donde a este tamaño de partícula la probabilidad de ocurrir un evento dúctil o un evento frágil es alta.

$$\text{Umbral}_{\text{Barrido}} = 1.06115 \text{ E}(-10) \quad (24)$$

En la Figura 21, se observa una vista de la animación en la que se presenta una erosión multicapa, con probabilidad de contacto dúctil del 95% y una probabilidad de contacto frágil del 5%. Internamente se tiene la coordenada de impacto (X_k, Y_k) con un desplazamiento vertical (ángulo de impacto 90° , incidencia normal) de la partícula erosiva que choca con la superficie de la capa principal E1 del recubrimiento.

Figura 21. Vista en el plano XY de una posición aleatoria la partícula 1 en una simulación al azar.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 [Autor]

En la Figura 22, se observa el evento de impacto multicapa, para poder mostrar exactamente la posición de la partícula sobre la superficie del recubrimiento, se

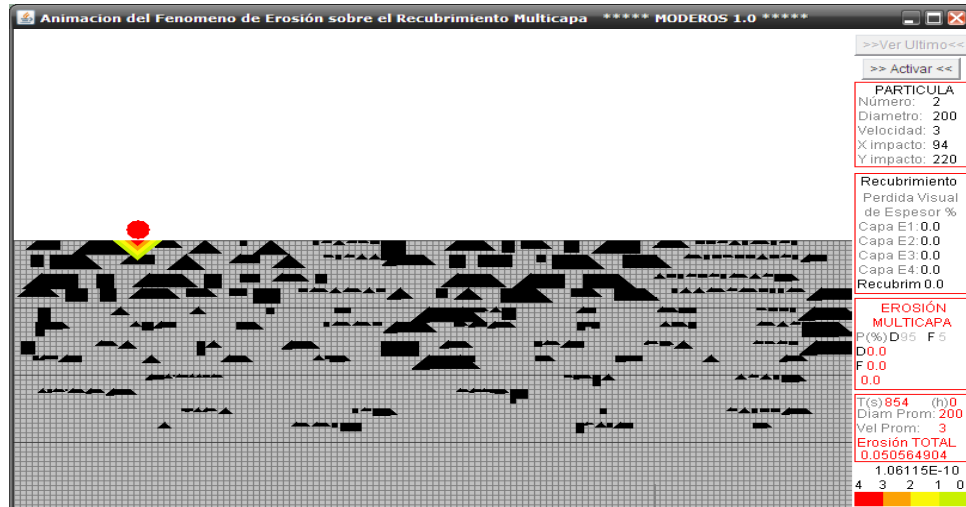
tuvo que considerar cada instante del desplazamiento de la partícula y bajo una región de choque con respecto a la posición Y de la partícula y el diámetro de la misma, se creó un algoritmo que calculara esta distancia y cuando estuviese en esta región de choque, se le asignara este valor Y_k a el atributo Y de la partícula para que en este instante se pudiese ubicar en la región de contacto y a su vez representar gráficamente este evento.

Además, se le asignó un color rojo a la partícula en el momento del choque que significa que esta toca la superficie y suministra energía en el material expuesto, y a su vez, la tensión inducida en este es producida y la erosión calculada dependiendo del diámetro y velocidad de la partícula es almacenada en cada punto de la región de contacto, con la característica particular que para cada gama de colores es asignada una intensidad de erosión según sea el color, y se describe así:

- Color Rojo: asociado a un valor 4 veces del calculado en ese punto del material.
- Color Naranja: asociado a un valor 3 veces del calculado en ese punto del material.
- Color Rojo: asociado a un valor 2 veces del calculado en ese punto del material.
- Color Rojo: asociado a un valor de 1 veces del calculado en ese punto del material.

Se tuvo en cuenta que el valor calculado depende del punto (pixel) del material interno en la región de contacto, de la probabilidad de incidencia de la cantidad de material dúctil o material frágil, y del factor de proporcionalidad entre estos tipos de erosión.

Figura 22. Vista en el plano XY del evento de impacto, la asignación de intensidad de erosión asignada para cada región de color, de la partícula 1 en una simulación al azar.

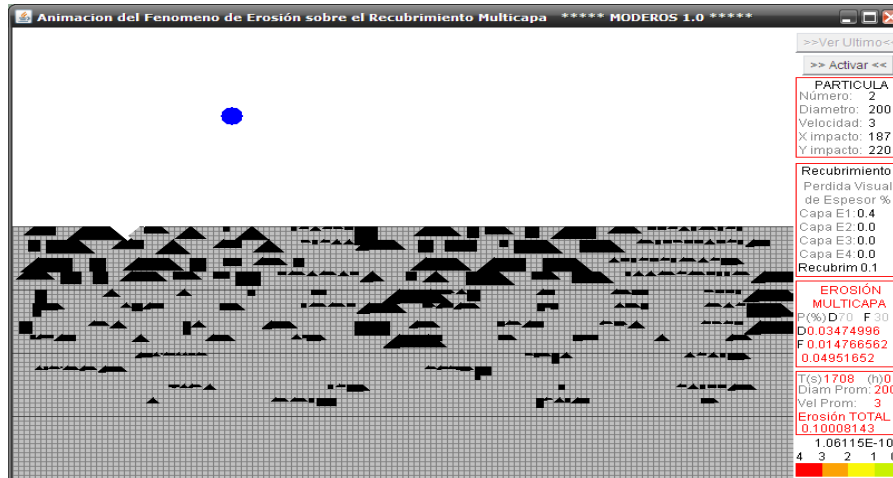


Fuente: Simulador MODEROS 1.0 [Autor]

En la Figura 23, se observa la partícula 2 de la misma simulación con otra coordenada de impacto, y en la región anterior se puede evidenciar el efecto erosivo que se presentó con la partícula anterior.

Estos valores de **Erosión Total** han sido calculados para un diámetro y velocidad constante (estos comportamientos pueden variar en el panel central de la aplicación ya que cualquiera de estas variables de entrada pueden ser constante o variable).

Figura 23. Vista en el plano XY del evento de impacto, la asignación de intensidad de erosión asignada para cada región de color, de la partícula 1 en una simulación al azar.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 [Autor]

Además, se puede observar en la Figura 23, que la velocidad de erosión frágil de la figura negra (grano de Carburo Tungsteno WC) es mayor que la erosión dúctil (puntos grises que representa el matriz NiCrB), ya que los valores calculados en la parte frágil fueron mayores y estos sobrepasaron el valor del umbral de borrado generando un efecto de remoción del material. Además, en la región dúctil impactada solo para regiones cercanas al punto de impacto tomaron valores que se alcanzaron a almacenar y luego ser borradas, y a su vez se puede observar que para la región verde se almacenó valores de erosión más bajos que no alcanzaron el umbral, y como consecuencia el no borrado de estos puntos en la matriz.

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS DE LA ANIMACIÓN

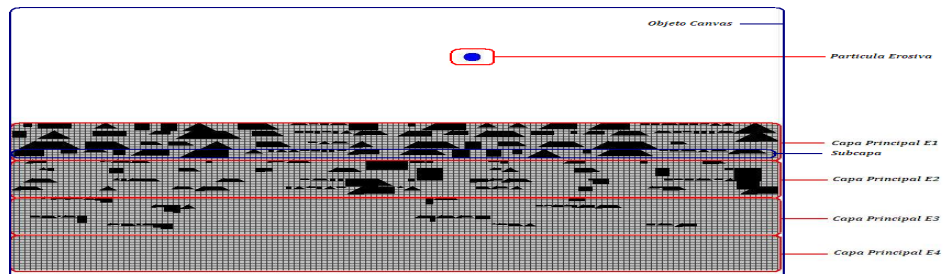
4.1.1 Descripción del recubrimiento y la partícula erosiva. Para realizar la simulación se estudió el modo de representar el recubrimiento multicapa compuesto por dos fases, la matriz (fase dúctil) y los granos carburo de refuerzo (fase frágil).

Tabla 1. Datos de composición química y dureza de las capas que componen el recubrimiento [3].

Recubrimiento	Composición	% Volumétrico de WC	Microdureza (Hv)
Capa principal E1	25% NiCrB, 75% WC	34	1500
Capa principal E2	50% NiCrB, 50% WC	19	1170
Capa principal E3	75% NiCrB, 25% WC	9	860
Capa principal E4	NiCrB (Cr 13%,B)	0	540

Como se muestra en la Figura 24, el recubrimiento consta de 4 tipos de capas principales con concentraciones de %WC que varía desde la superficie del metal (ubicada en la parte inferior de la imagen) hasta la superficie que está expuesta al medio erosivo y será impactada por las partículas incidentes (ubicada en la parte media de la imagen).

Figura 24. Representación del recubrimiento por capas y subcapas, y de la partícula erosiva.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 [Autor]

Representación de la fase dúctil. Es la matriz de color gris incluyendo las líneas de color gris oscuro que separan un cuadro del otro, las líneas de color gris claro que separa las capas principales.

Representación de la fase frágil. Son las diferentes figuras geométricas de color negro que representan los granos de carburo de refuerzo. Se especificaron 6 tipos de figuras con generación de dimensiones aleatorias cada vez que se genere un nuevo grano, a su vez con áreas de espesor independiente una de la otra.

Además, cada capa principal tiene subcapas que deben ser uniformemente distribuidas, para que su concentración acumulada obtengan el %WC requerido para cada capa E_i , donde $i = 1, 2, 3, 4$. Ya descritas en la Tabla 1.

La partícula impactante tiene dimensiones, masa y coordenadas iniciales de movimiento mutuamente excluyentes cada vez que se genere una nueva partícula debido al choque que se ejerce con la superficie externa del recubrimiento. Está representada por una figura circular de color azul que se mueve a medida que el tiempo de exposición se incrementa.

4.1.2 Descripción del efecto micro-estructural. El evento de erosión “real” en un recubrimiento multicapas es completamente aleatorio, tanto en coordenadas de impacto, eventos de impacto, características de la partícula impactante y tipo de desgaste con respecto al material impactado. Debido a que el evento de impacto sobre cualquier fase depende de:

- Porcentaje de material de refuerzo WC.
- Porcentaje de material dúctil de la matriz.
- Tamaño de la partícula erosiva.
- Tamaño promedio de refuerzo.
- Relación entre el tamaño de la partícula erosiva y la trayectoria media libre de la matriz (λ)

4.2 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN Ω

Esta función Ω relaciona el tamaño de la partícula erosiva y la trayectoria media libre.

$$\Omega = \frac{T_p}{\lambda} \quad (26)$$

T_p : Tamaño de la partícula

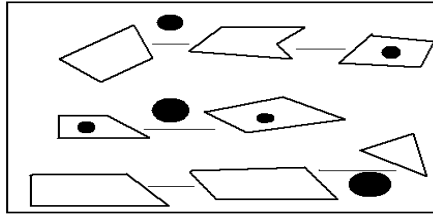
λ : Trayectoria media libre

4.2.1 Evento de impacto de una sola fase. Se puede establecer la siguiente relación, (según la ecuación 26).

$$\Omega < 1, \text{ es decir, } T_p < \lambda \quad (27)$$

Esto significa que el evento se presenta si el tamaño de la partícula erosiva es menor que la trayectoria media libre.

Figura 25. Evento de impacto en una fase dúctil o fase frágil.



Fuente: Autor

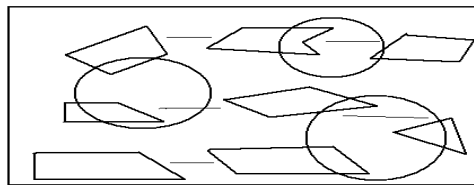
La figura muestra que existen dos tipos de eventos de impactos, ya que la partícula puede chocar en la matriz dúctil o en el material de refuerzo WC.

4.2.2 Evento de impacto de varias fases. Se puede establecer la siguiente relación, (según la ecuación 26).

$$\Omega > 1, \text{ es decir, } T_p > \lambda \quad (28)$$

Esto significa que el evento se presenta si el tamaño de la partícula erosiva es mucho mayor que la trayectoria media libre.

Figura 26. Evento de impacto de varias fases.



Fuente: Autor

La Figura 26 muestra que existe un tipo de evento de impacto multicapa, ya que la partícula puede chocar tanto en la matriz dúctil como en el material de refuerzo WC simultáneamente, este se denota por la imagen circular sobre la superficie de los dos tipos de materiales.

4.3 EVENTOS DE IMPACTO POSIBLES

Se identificó posibles escenarios de evento de impacto y se obtuvo un perfil de acción que ayuda a identificar factores importantes en el momento de establecer una relación de selección:

- Tipo de desgaste.
- Cálculo de desgaste.
- Borrado de material en la animación.

En la literatura se distinguen dos tipos de eventos de impacto específicos:

4.3.1 Evento A. Se presenta un desgaste dúctil o desgaste frágil, esto se debe a que el tamaño de la partícula erosiva es más pequeño que la escala micro estructural del grano de carburo tungsteno (wolframio), es decir, es menor que la trayectoria media libre.

4.3.1.1 Impacto en material dúctil. Cuando la partícula impacta en el material dúctil (color blanco en la Figura 18) entre dos granos de carburo. Existen 3 posibles escenarios a considerar en la simulación.

Figura 27. Representación de posibles escenarios de impacto dúctil.



Fuente: Autor

Ver ANEXO F, en el se muestra el evento dúctil descrito en una simulación al azar de la aplicación MODEROS 1.0.

4.3.1.2 Impacto en material frágil. Cuando la partícula impacta en el grano de carburo (color negro en la Figura 19) dentro de su área de contacto disponible para el evento. Existen 3 posibles escenarios a considerar en la simulación.

Figura 28. Representación de posibles escenarios de impacto frágil.



Fuente: Autor

Ver ANEXO I, en el se muestra el evento frágil descrito en una simulación al azar de la aplicación MODEROS 1.0.

4.3.2 Evento B. Se presenta un desgaste multicapas, esto se debe a que el tamaño de la partícula erosiva es más grande que la escala micro-estructural del grano de carburo tungsteno (wolframio), es decir, es mayor que la trayectoria media libre.

4.3.2.1 Impacto de dos fases. Cuando la partícula impacta parte de los dos materiales en algún extremo de algún grano de carburo. Existen 2 posibles escenarios a considerar en la simulación.

Figura 29. Representación de posibles escenarios de impacto de dos fases.

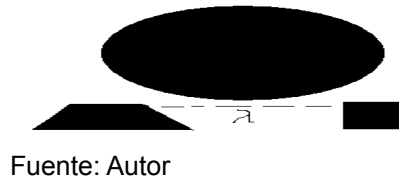


Fuente: Autor

Ver ANEXO H, en el se muestra el evento multicapa de una fase dúctil y un grano frágil, descrito en una simulación al azar de la aplicación MODEROS 1.0.

4.3.2.2 Impacto de múltiples fases. Cuando la partícula impacta sobre dos granos de carburo y cobre todo el material dúctil disponible. Existe 1 posible escenario a considerar en la simulación.

Figura 30. Representación de posible escenario de impacto multicapas (a).



Cuando la partícula impacta sobre varios granos de carburo y cobre varios segmentos de material dúctil. Existe 1 posible escenario a considerar en la simulación.

Figura 31. Representación de posible escenario de impacto multicapas (b).



Ver ANEXO G, en el se muestra el evento multicapa de varios granos frágiles, descrito en una simulación al azar de la aplicación MODEROS 1.0.

4.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA

4.4.1 Características de los elementos de la simulación. Cada vez que comienza la simulación, se generan diferentes variables intrínsecas con características propias que interaccionan simultáneamente y brindan en conjunto la funcionalidad de la simulación. Estas funcionalidades del diámetro y velocidad

de partícula son definidas en el panel de entrada de datos en la simulación y pueden ser constantes y/o variables.

Partícula erosiva.

- Diámetro (Constante o Variable, depende de la funcionalidad inicial)
- Velocidad (Constante o Variable, depende de la funcionalidad inicial)
- Posición inicial con coordenadas, X_j =variable Y_j = fija.

Formas de granos de refuerzo.

- Lado horizontal de la figura (Aleatorio).
- Altura de la figura (Aleatorio).
- Distancia con respecto a la siguiente figura a generar (Aleatorio).
- Área de la figura (Aleatorio)
- Posición inicial diferente en cada subcapa (Aleatorio).

Esta aleatoriedad de características se realizó con el fin de representar de manera discreta la creación de un recubrimiento multicapas así como se lleva a cabo en el laboratorio, es decir, se construye para cada subcapa de las capas principales una distribución variable de figuras geométricas (Granos de Carburo Wolframio WC, "Material Frágil") que sea semejante con la realidad.

Recubrimiento multicapa:

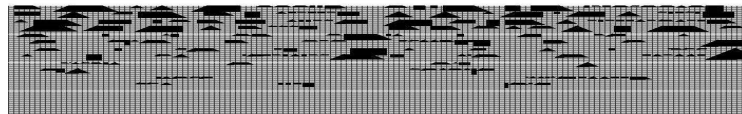
- Formas de granos de WC (Carburo Tungsteno) (figuras geométricas).
- Posición inicial de la primera figura generada.
- Creación de diferentes subcapas, dentro de estas subcapas una cantidad porcentual que sumadas corresponden a la cantidad de %WC que debe tener cada una de las cuatro capas principales (E1, E2, E3, E4 descritas anteriormente en la tabla 1).

- Generación de figuras por cada subcapa con características totalmente excluyentes.

Todas estas variables han sido creadas y documentadas en el código fuente, de manera que se pueda entender el flujo de datos que se maneja en cada ciclo de la simulación. Además, se cuentan con condiciones que permiten monitorear la distribución de %WC por cada subcapa de la capa principal E1, E2, E3 Y E4, y su consecuente visualización y utilización en los cálculos de erosión.

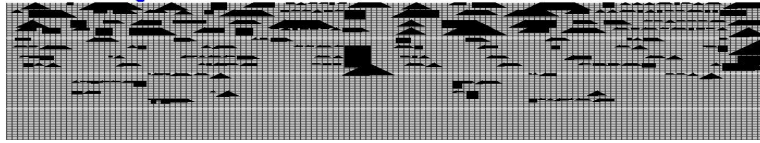
En las Figuras 32 y 33, se observará diferentes simulaciones iniciales, con composición variable del recubrimiento usando figuras que representan el material Frágil (WC Duro, Color negro) esparcido de manera aleatoria por toda la subcapa del material Dúctil (Suave, Color gris, gris claro y gris oscuro). Las líneas horizontales con color blanco representan los límites correspondientes a cada capa principal. De manera que el usuario pueda ver que está pasando en el recubrimiento en toda su micro-estructura y como la afecta, cada impacto producido por la partícula erosiva.

Figura 32. Simulación (a) con características diferentes del recubrimiento y de la partícula erosiva.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 [Autor]

Figura 33. Simulación (b) con características diferentes del recubrimiento y de la partícula erosiva.



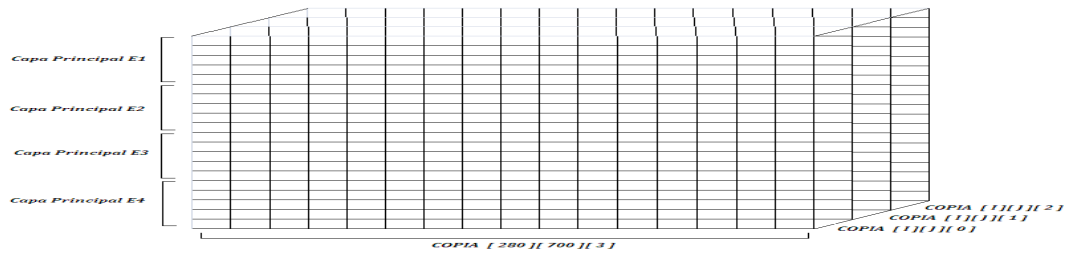
Fuente: Simulador MODEROS 1.0 [Autor]

4.4.2 Estructura de la matriz del Recubrimiento. La matriz recubrimiento está dividida en dos matrices de trabajo, la primera es la Matriz COPIA [I][J][K] descrita en la Figura 24, y la segunda es la Matriz MATRIZ [I][J][K] descrita en la Figura 25. Las especificación de las dimensiones [280][700][3] son la siguientes:

- [280]: Hace referencia a todas las filas representativas del recubrimiento (altura).
- [700]: Hace referencia a todas las columnas del recubrimiento (ancho).
- [3]: Hace referencia a los 3 tipos de valores que se asignan.
- [I][J][0]: Hace referencia al tipo de color del recubrimiento, estos pueden ser la gama de colores de la región de impacto, material dúctil y material frágil.
- [I][J][1]: Hace referencia al tipo de material del recubrimiento.
- [I][J][2]: Almacena el valor de erosión calculado por el MBA (descrito en la sección 3.3.3), este valor depende del tipo de material al que pertenece el pixel, de la influencia del material dúctil y frágil presente en la región de contacto, del factor de proporcionalidad y del nivel de intensidad de la región (gama de colores).

La matriz COPIA que se muestra en la Figura 34, se utilizó para representar el evento de impacto y poder asignar las diferentes gamas de colores de la región de contacto.

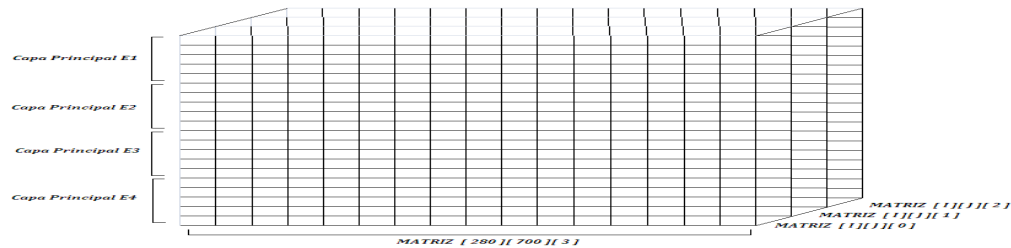
Figura 34. Matriz COPIA [I][J][K] que representa el evento de impacto entre la partícula y el recubrimiento.



Fuente: Autor

La matriz MATRIZ que se muestra en la Figura 35, se utilizó para almacenar tipo y valor de desgaste.

Figura 35. Matriz MATRIZ [I][J][K] que almacena que tipo de material es cada punto (pixel de la pantalla) y en cada punto almacena la información de erosión que es comparada con el umbral de borrado.



Fuente: Autor

En la Tabla 2 y la Tabla 3, contiene la información referente a la gama de colores que pinta el recubrimiento en la animación, y el tipo de material presente la simulación.

Tabla 2. Gama de colores utilizados para representar el recubrimiento en la animación en tiempo real [Autor].

Atributo [I][J][0]	Color	Descripción del Pixel
0	Blanco	Erosionado
1	Negro	Material Frágil
2	Gris Claro	Material Dúctil
3	Gris	Material Dúctil, Cuadrícula de la matriz
4	Gris Oscuro	Material Dúctil, Margen que separa capas principales
11	Verde	Nivel 1 de intensidad de erosión
12	Amarillo	Nivel 2 de intensidad de erosión
13	Naranja	Nivel 3 de intensidad de erosión
14	Rojo	Nivel 4 de intensidad de erosión

Tabla 3. Tipo de material para caracterizar el recubrimiento en la animación en tiempo real [Autor].

Atributo [I][J][1]	Descripción del Tipo de Material
0	Vacio
1	Material Frágil
2	Material Dúctil
3	Material Dúctil
4	Material Dúctil

4.4.3 Modelado del sistema usando UML. Se analizó el sistema recubrimiento-partícula erosiva, y sus correspondientes eventos de impacto y cómo se origina el fenómeno de erosión que desgasta la microestructura del recubrimiento multicapas en estudio.

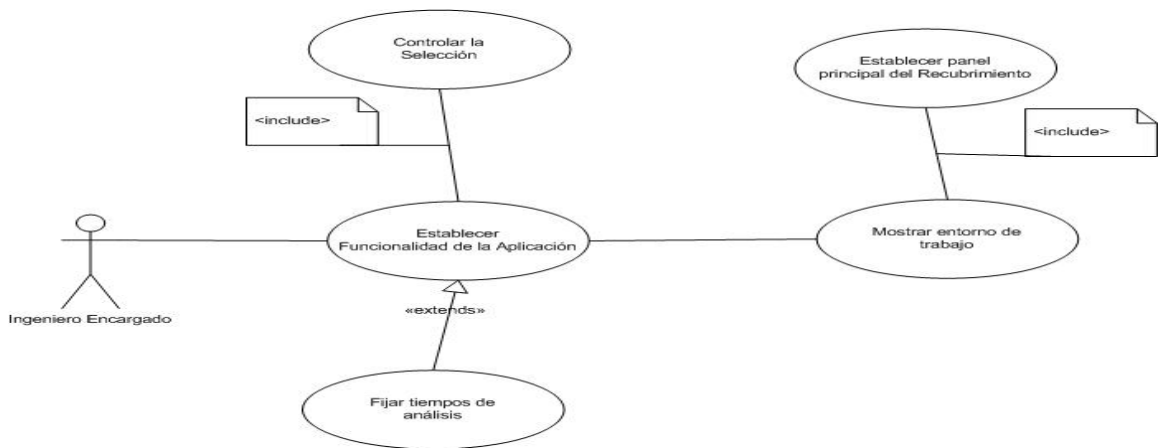
Cada evento particular de la aplicación y la interacción del usuario con el sistema crea un nuevo escenario en el cual cada uno de estos ha sido analizado de manera detallada, dando como resultado unos flujos de trabajo que son

representados gráficamente en los diferentes diagramas de casos de uso y diagramas de actividades que se muestran y describen a continuación:

La documentación de cada caso de uso, son mostrados en un modelo de plantilla específico [28].

4.4.3.1 Diagramas de casos de uso. Caso de uso funcionalidad de la aplicación

Figura 36. Diagrama de el Caso de uso para determinar cuál será el funcionamiento de la aplicación.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 [Autor]

Descripción del caso de uso:

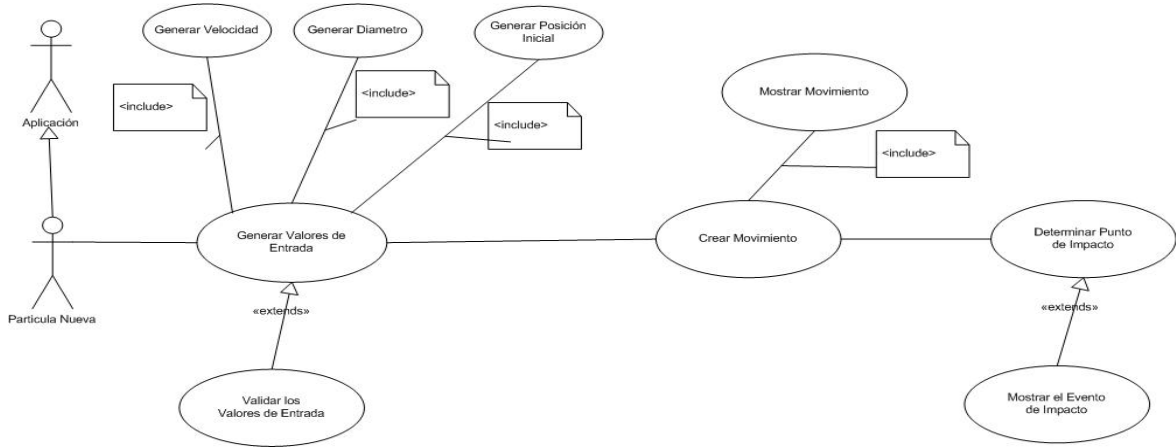
Caso de uso:	Establecer funcionalidad de la aplicación
Actor primario:	Ingeniero encargado
Meta en el contexto:	Determinar cómo funcionará la aplicación para la simular el desgaste del recubrimiento
Condiciones previas:	El sistema espera la creación de un nuevo entorno de simulación al inicio de la aplicación
Activador:	El ingeniero decide qué tipo de funcionalidad será la más apropiada para sus estudios.

Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ingeniero: observar el panel gráfico 2. Ingeniero: decide la funcionalidad a utilizar 3. Ingeniero: selecciona funcionalidad de diámetro y velocidad de la partícula erosiva. 4. Ingeniero: observa el nuevo panel principal de la aplicación
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. El panel no está listo: el ingeniero verifica que todos los valores de entrada estén seleccionados y habilitados. 2. Botones inhabilitados: el ingeniero debe seleccionar una sola opción. 3. Animación automática: el sistema muestra el panel de la animación que funciona sin interrupciones (periodos de tiempo definidos en el panel de entrada).
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿El panel de control debería desplegar otros mensajes de texto?. 2. ¿Debería haber otra forma de seleccionar el tipo de funcionalidad de la aplicación?. 3. ¿Existe alguna forma de terminar la simulación actual antes de activar una nueva simulación?.

Los demás casos de uso, se describen en el Anexo A del libro.

Caso de uso para Generar la partícula erosiva

Figura 37. Diagrama de el Caso de uso para Generar la partícula erosiva.



Fuente: Autor

Descripción del caso de uso:

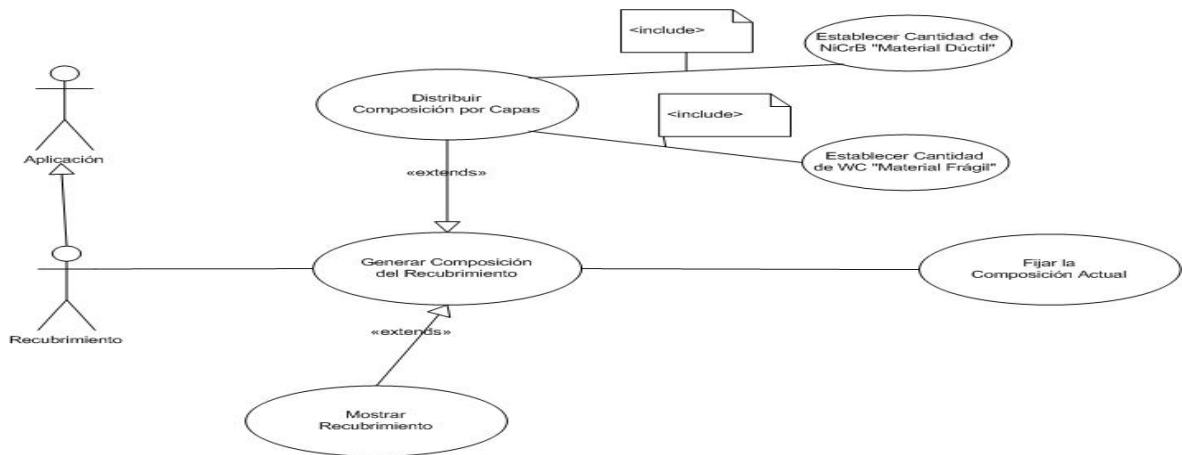
Caso de uso:	Generar valores de entrada
Actor primario:	Partícula nueva (objeto de la aplicación)
Meta en el contexto:	Generar la velocidad, el diámetro y la posición inicial que tendrá la partícula para cada evento de impacto
Condiciones previas:	Haber creado la partícula
Activador:	La aplicación crea un nuevo objeto llamado partícula, y espera ser inicializado
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. La partícula nueva: obtiene el valor para la velocidad según la funcionalidad definida. 2. La partícula nueva: obtiene el valor para el diámetro según la funcionalidad definida. 3. La partícula nueva: obtiene el valor generado para la posición inicial y en donde comienza su movimiento.
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recubrimiento no inicializado: la aplicación no generó el recubrimiento con su respectiva composición.

	2. Botón de simulación inhabilitado: el no haber generado el recubrimiento inicialmente, mantiene bloqueada la aplicación y no se daría comienzo de la simulación.
Asuntos pendientes:	<p>1. ¿El sistema deberá monitorear la continuidad de la simulación manualmente?</p> <p>2. ¿La partícula se debería generar en un rango de valores especificados en la experimentación, aunque se alejaría de la independencia de valores que es en su medida, el factor de incertidumbre que ofrece un comportamiento más real?</p>

Los demás casos de uso, se describen en el Anexo B del libro.

Caso de uso para Crear el Recubrimiento

Figura 38. Diagrama de el Caso de uso para Crear el Recubrimiento.



Fuente: Autor

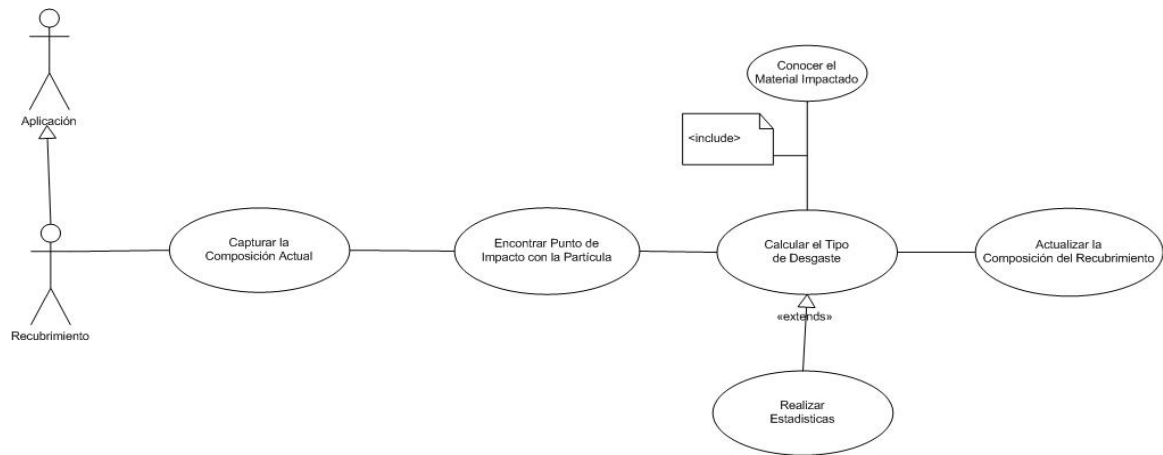
Descripción de cada caso de uso:

Caso de uso:	Generar composición del recubrimiento
Actor primario:	El Recubrimiento (objeto de la aplicación)
Meta en el contexto:	Generar la composición micro estructural del recubrimiento multicapas (NiCrB “Dúctil”— WC “Frágil”). Ni (Níquel), Cr(Cromo), B (Boro), W (Tungsteno o Wolframio), C (carburo).
Condiciones previas:	Haber creado el recubrimiento
Activador:	La aplicación crea el objeto llamado recubrimiento, y espera ser inicializado
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. El recubrimiento: obtiene el valor generado para su dimensión Matriz (m*n), es decir (Filas x Columnas). 2. El recubrimiento: comienza a distribuir sus respectivas celdas de composición (cuadro de la matriz, ya sea de material Dúctil o material Frágil).
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recubrimiento no inicializado: la aplicación no genera el recubrimiento con su respectiva composición. 2. Botón de simulación inhabilitado: el no haber generado el recubrimiento inicialmente, mantiene bloqueada la aplicación y no se daría comienzo de la simulación.
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿El sistema debería crear la matriz de una manera diferente para cada nueva aplicación que se realice, sin repetir la composición anterior? 2. ¿El sistema debería tener un historial promedio de la composición de cada recubrimiento para evitar repetir estos valores iniciales? 3. ¿El sistema deberá monitorear la continuidad de la simulación manualmente?

Los demás casos de uso, se describen en el Anexo C del libro.

Caso de uso para Generar el Fenómeno de Erosión en el Recubrimiento

Figura 39. Diagrama de el Caso de uso para Generar el Fenómeno de Erosión en el Recubrimiento.



Fuente: Autor

Descripción de cada caso de uso:

Caso de uso:	Capturar la composición actual
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Obtener la información generada del recubrimiento y guardarlo en una matriz para dar continuar con la simulación
Condiciones previas:	Haber creado adecuadamente la matriz recubrimiento.
Activador:	El objeto recubrimiento
Asociación:	
Escenario:	1. La aplicación: obtiene la información del recubrimiento y la guarda en una variable de trabajo 2. El recubrimiento: queda identificado con una concentración actual

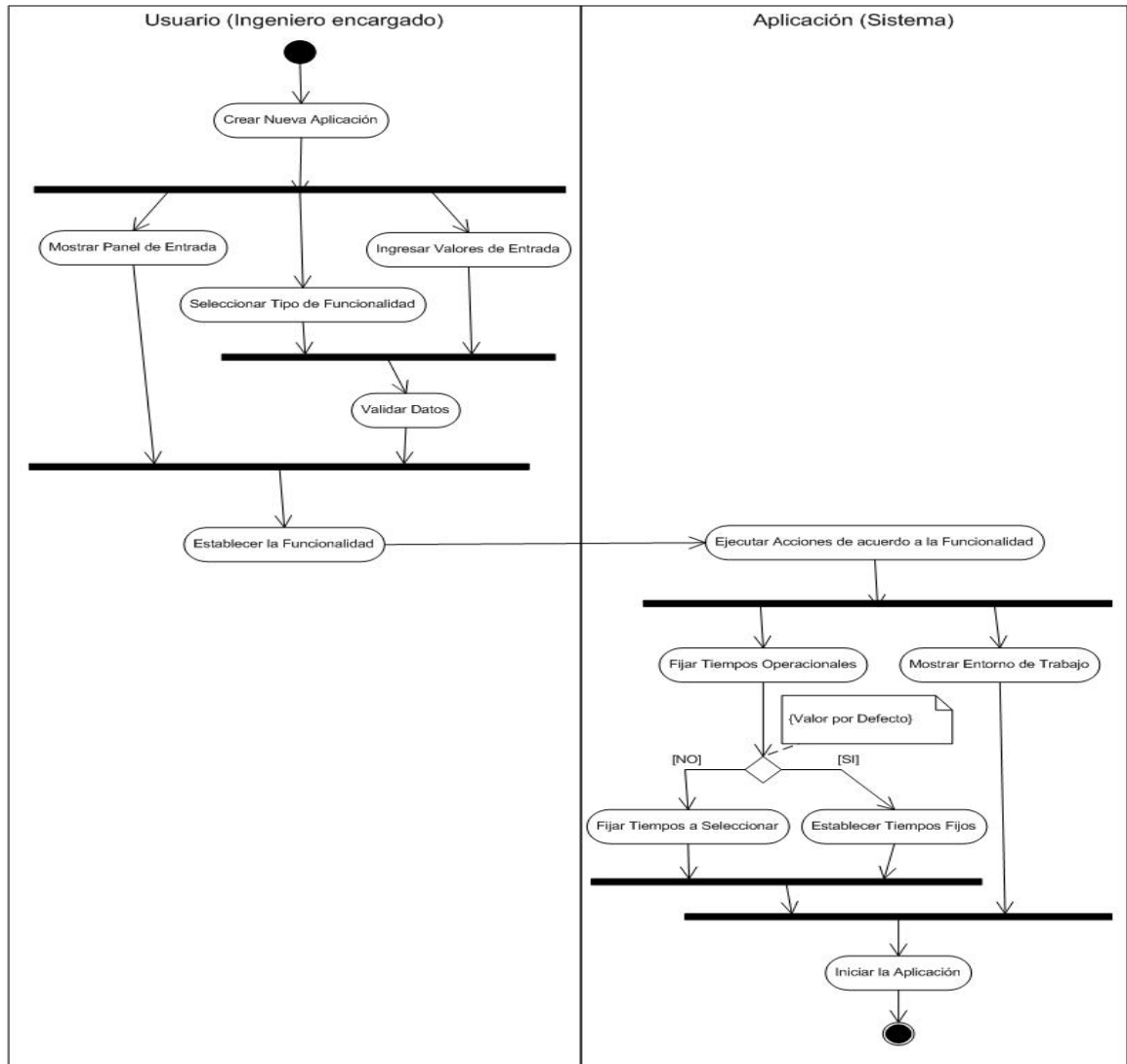
Excepciones:	<p>1. Valores sin borrar: el sistema debe permitir no alterar sin los respectivos controles la información que se tenga</p> <p>2. Identificación de controles: el sistema debe actualizar la información del recubrimiento dependiendo de los desgastes que hayan sido calculados, dependiendo del evento de impacto generado</p>
Asuntos pendientes:	<p>1. ¿Qué el sistema permita utilizar cuando sea necesario, cualquier tipo de información del recubrimiento en cualquier momento?</p>

Los demás casos de uso, se describen en el Anexo D del libro.

4.4.3.2 Diagramas de Actividades. Las siguientes imágenes muestran los diagramas de actividades que surgieron después de un extenso tiempo de estudio del sistema a simular “fenómeno de erosión de un Recubrimiento Multicapas expuesto a un ambiente erosivo originándose en este un desgaste en su micro estructura por medio de impactos sucesivos de partículas solidas”, y a su vez estos diagramas sirvieron para representar una gran variedad de actividades que incluye funcionalidad de la aplicación y eventos propios de la simulación.

Funcionalidad de la Aplicación.

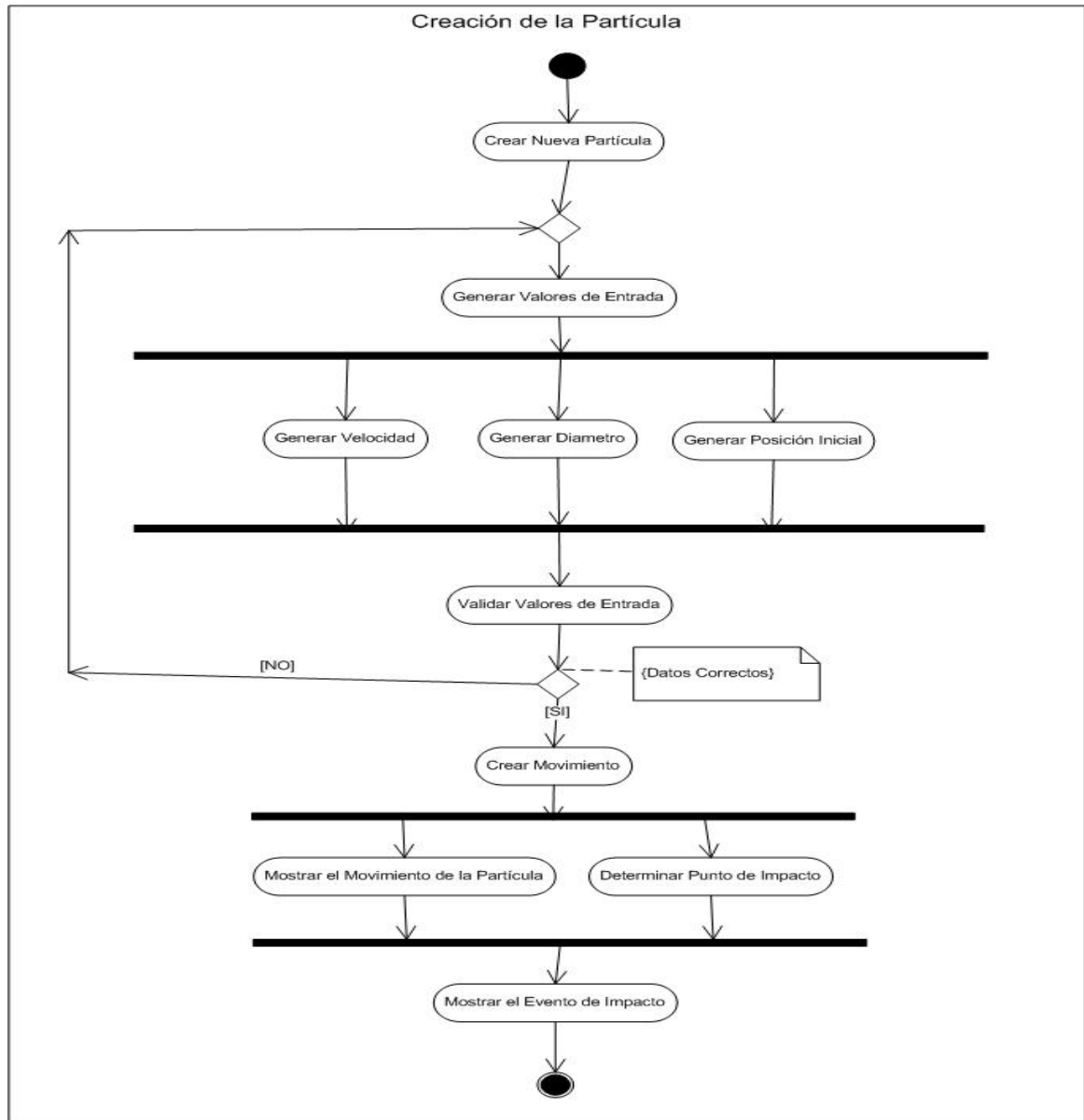
Figura 40. Diagrama de Actividades para la funcionalidad de la aplicación.



Fuente: Autor

Creación de la partícula

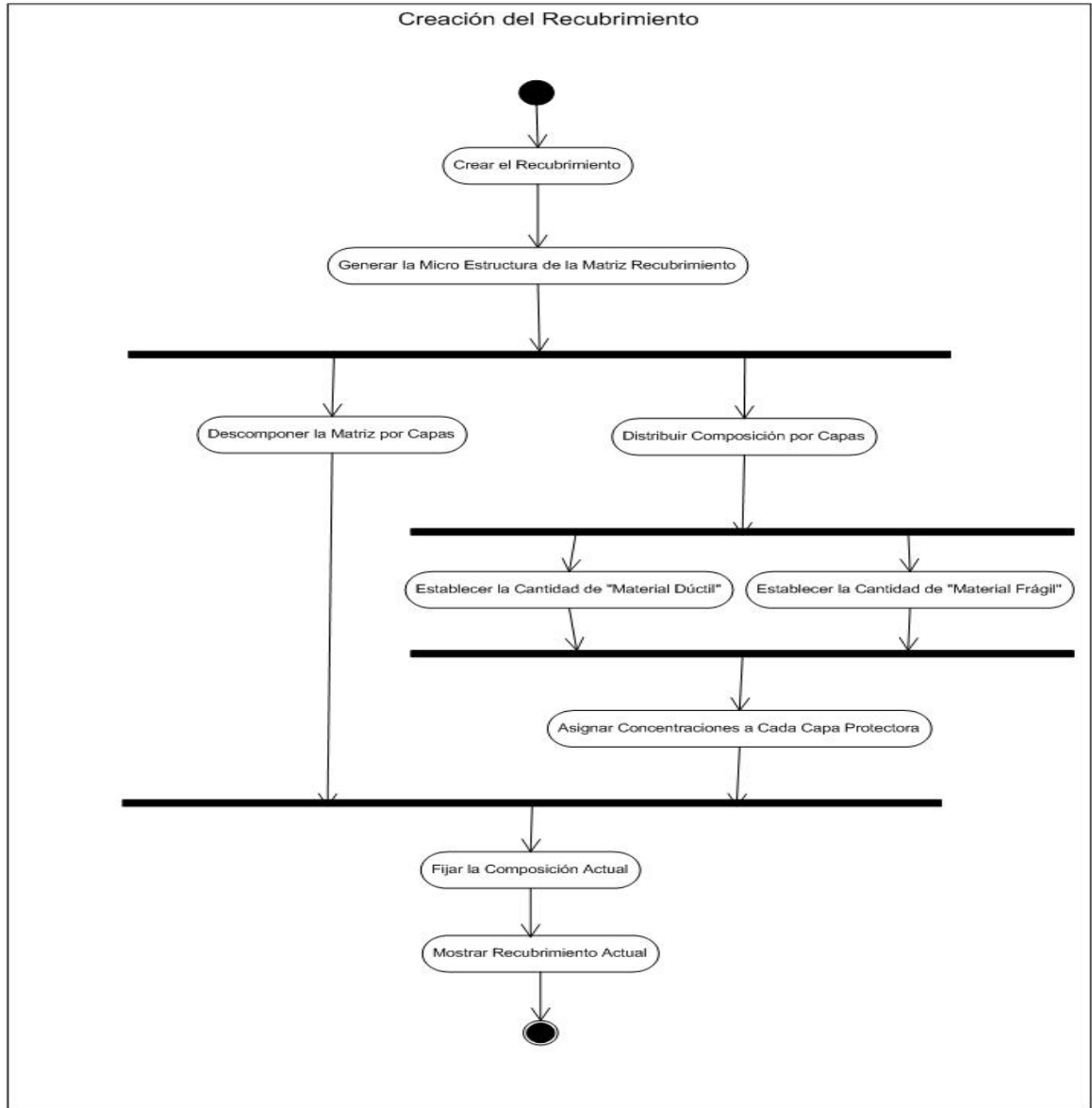
Figura 41. Diagrama de Actividades para la creación de la partícula.



Fuente: Autor

Creación del Recubrimiento

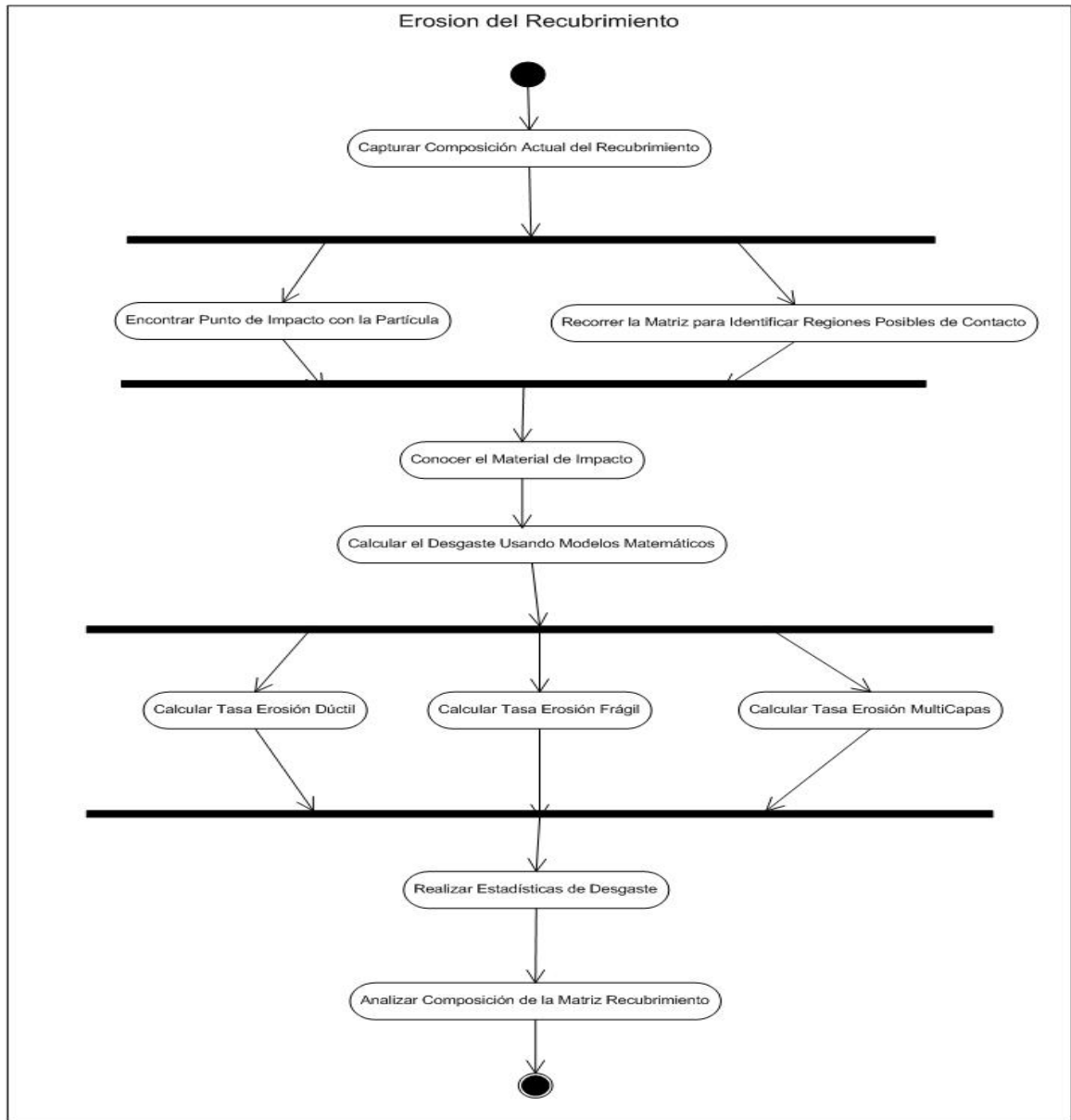
Figura 42. Diagrama de Actividades para creación del Recubrimiento.



Fuente: Autor

Erosión del Recubrimiento

Figura 43. Diagrama de Actividades de la erosión en el recubrimiento [Autor].



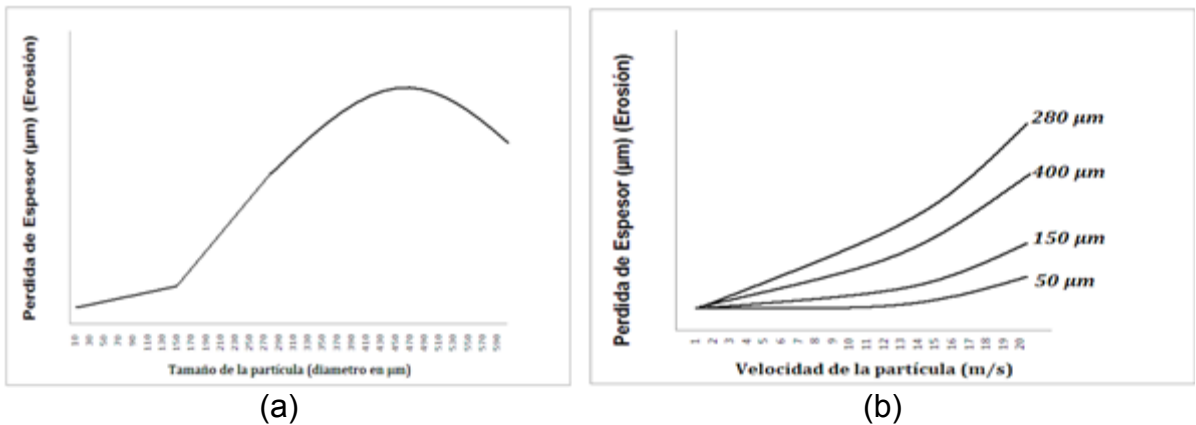
Fuente: Autor

5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 INFLUENCIA DE UTILIZAR EL MODELO BASE MB [3]

Se utilizaron los valores de la Región Base (a) de la Figura 16 de la sección (3.3.2), y se obtuvieron efectos muy diferentes a los obtenidos en la parte experimental. Por ejemplo, al analizar el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvieron valores máximos en intervalos menores de 600 μm y tendencias decrecientes para diámetros muy grandes, como se muestra en la Figura 44 (a). Al analizar el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvo una pérdida de espesor menor para partículas mayores de 280 μm , y esta tendencia contradice lo experimental, como se muestra en Figura 44 (b).

Figura 44. Valores de la Región Base (a). (a) el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión. (b) el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión.

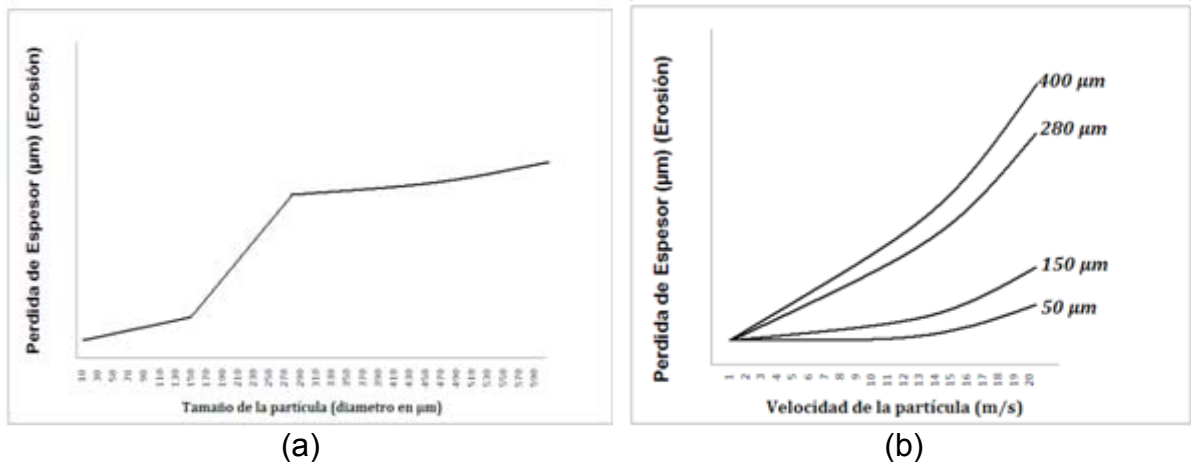


Fuente: Autor

5.2 INFLUENCIA DE UTILIZAR LA FUNCIÓN MATRICIAL DE AJUSTE EN MBA

Se utilizaron los valores de la Región Base Ajustada (b) de la Figura 16 de la sección (3.3.2), y se obtuvieron efectos aproximados a los obtenidos en la parte experimental. Al analizar el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvo una leve tendencia creciente en la pérdida de espesor a medida que aumenta el diámetro de la partícula, como se muestra en la Figura 45 (a). Al analizar el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvo una pérdida de espesor mayor para partículas mayores de 280 μm , y esta tendencia valida lo experimental, como se muestra en Figura 45 (b).

Figura 45. Valores de la Región Base Ajustada (b). (a) el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión. (b) el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión.



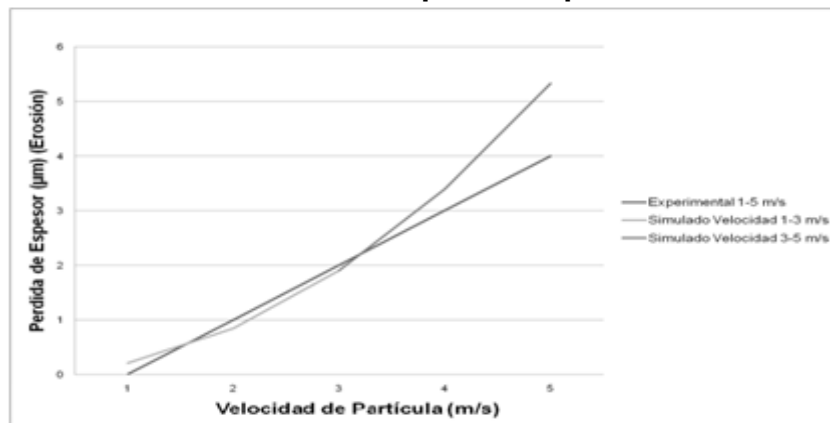
Fuente: Autor

Una vez ajustado el modelo base y haber encontrado tendencias que concuerdan con el comportamiento de la erosión bajo estos efectos como se muestra en la Figura 45, se obtuvo un modelo computacional más confiable para cualquier diámetro de partícula y velocidades de partícula menores de 4 m/s, este modelo fue descrito en la ecuación (21) de la sección (3.3.3).

5.3 EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE EROSIÓN PARA VALORES SIMULADOS Y VALORES EXPERIMENTALES

5.3.1 Uso del coeficiente de linealidad. En la Figura 46 se pudo observar la similitud de los valores de la velocidad de erosión (perdida de espesor) generados al usar el Modelo Base Ajustado de erosión (MBA), y los obtenidos en las pruebas de laboratorio evidenciadas en el trabajo de doctorado PEÑA B, Darío Y [6].

Figura 46. Efecto de la velocidad de la partícula para un diámetro de 150 μm .



Fuente: Autor

A bajas velocidades, menores o iguales a 3 m/s la velocidad de erosión medida en su pérdida de espesor del modelo ajustado es muy aproximada a los datos experimentales, y al linealizar la función para estos valores se obtiene un coeficiente de linealidad $R^2=0,979$ indicando que valores intermedios (2 m/s) son muy cercanos a los reales.

A velocidades mayores a 3 m/s, la velocidad de erosión del modelo ajustado es relativamente aproximada pero su diferencia comienza a incrementar con el aumento de la velocidad de la partícula. Al linealizar la función se obtiene un coeficiente de linealidad $R^2=0,994$ indicando que valores intermedios (4 m/s) son aproximados a los reales en este intervalo.

Como se observa en la Figura 46 existen dos tendencias relativamente lineales para velocidades de 1 a 3 m/s y de 3 a 5 m/s, lo que indica que al crear dos funciones en estos intervalos, se puede aproximar significativamente valores de velocidad de erosión para velocidades intermedias de 2 m/s y 4 m/s. Además, el coeficiente lineal para cada función es mayor que 0,97 como se muestra en la Tabla 4, lo que indica una mejor aproximación de los datos simulados con respecto a los datos experimentales. De este modo, se tienen estimaciones de pérdida de espesor (erosión) muy aproximadas para velocidades de 1-4 m/s lo que indica una mejora en el modelo base, validando por medio de estos resultados el modelo base ajustado (MBA).

Tabla 4. Funciones lineales de pérdida de espesor (erosión) en función de la velocidad de la partícula [Autor].

Velocidad de la Partícula	Función Lineal	Coeficiente R2
Experimental 1-5 m/s	$y = x - 1$	1
Simulado Velocidad 1-3 m/s	$y = 0,846x - 0,708$	0,979
Simulado Velocidad 3-5 m/s	$y = 1,712x - 3,306$	0,994

A una velocidad de partícula de 1 m/s se obtiene una velocidad de erosión de $0,2098 \pm 0,20\%$ aumentando su eficiencia al disminuir el error absoluto en un 0,01% en comparación al modelo anterior.

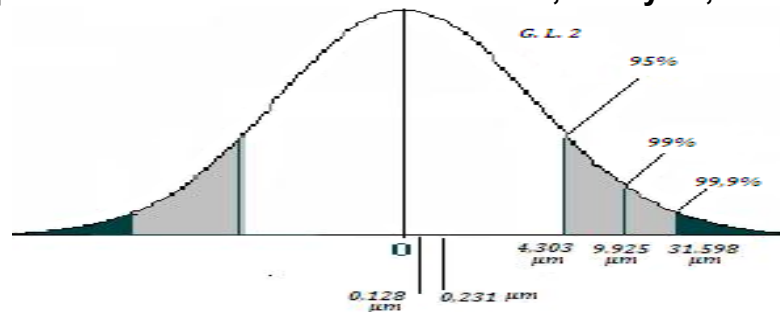
A una velocidad de partícula de 5 m/s se obtiene una velocidad de erosión de $5,3282 \pm 33,2\%$ aumentando su eficiencia al disminuir el error relativo en un 0,55% en comparación al modelo anterior.

5.3.2 Uso de la Distribución T-Student. Además, se utilizó la distribución T-Student para estudiar la proximidad de los valores mediante las diferencias de cada par de valores, evaluar y comparar para cada velocidad de la partícula las

velocidades de erosión calculadas en la simulación y las obtenidas en la parte experimental; se valida el modelo ajustado utilizado en la simulación y que será implementado para estudiar el fenómeno de erosión en recubrimientos multicapas con las características previamente establecidas en la Tabla 1.

Con una confianza del 95% y 2 G.L (Grados de Libertad, para cada intervalo de velocidades) utilizando las tablas de la distribución t [38] para dos colas se tiene que la variable t-student es de 4,303, y representa el valor umbral de la región de rechazo, es decir, si la diferencia promedio para cada par de valores (experimental/simulado) es mayor a 4,303, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula planteada y los datos estarán muy dispersos y poco aproximados.

Figura 47. Valores t-student calculados y ubicados fuera de la región crítica o de rechazo para intervalos de confianza del 95%, 99% y 99,9%.



Fuente: Autor

Se plantea que:

H_0 (Hipótesis nula): \bar{x} igual a cero. (Promedio de las diferencias iguales a cero).

H_a (Hipótesis alterna): \bar{x} diferente de cero. (Promedio de las diferencias diferentes a cero).

Como se muestra en la Figura 47, para velocidades de partícula menores de 3 m/s se obtiene una $t = 0,128$, quedando fuera de la región crítica y dentro de la región de confianza, esto indica que no hay suficiente evidencia para rechazar H_0 , es decir, los valores comparados varían poco siendo estos muy aproximados. Además, se obtuvo un $p\text{-value} = 0,909$ que es mayor de 0,05 (Nivel de

significancia del 5%) lo que indica que NO se rechaza H_0 [39] (es decir, la diferencia es casi nula).

Además, se puede observar en la Figura 47 que para velocidades de partícula mayores de 3 m/s se obtiene una $t = 0,231$, quedando dentro de la región de confianza pero más cerca a la región crítica en comparación con el valor de t obtenido para velocidades de partícula < 3 m/s, esto indica que no hay suficiente evidencia para rechazar H_0 , es decir, los valores en comparación varían un poco más, siendo estos relativamente aproximados a los experimentales.

Se obtuvo un $p\text{-value} = 0,070$ que es un poco mayor que $p\text{-value} = 0,05$ (Nivel de significancia del 5%) lo que indica que NO se rechaza H_0 pero se evidencia que a medida que aumenta la velocidad de la partícula el $p\text{-value}$ será menor y se rechazará H_0 (esto quiere decir que existe una variación significativa de los datos y el modelo no será tan preciso para velocidades mayores).

Tabla 5. Diferencias de t-student y los niveles de significancia (Calculados, Vs, Teórico) [Autor].

Encontrando Diferencias (t-St) y (α)	Velocidad 1-3 m/s	Velocidad 3-5 m/s
t-Student Calculado (μm)	0,128	0,231
t con 2 G.L. Tablas(μm) para un 95% de Confianza	4,303	4,303
Dif (t-St)	4,175	4,072
P-Value Calculado (α)	0,9092	0,0701
(α por Definición) descartar aproximación de datos	0,05	0,05
Dif (α)	0,8592	0,0201

En la Tabla 5 se observa en resumen, que la diferencia entre el t-student calculado y el obtenido en las tablas para velocidades de partícula de 1-3 m/s es mayor que la diferencia para velocidades de 3-5 m/s, es decir, se encuentra más retirado de la región de rechazo indicando que son más aproximados los valores calculados al utilizar el modelo de erosión para velocidades pequeñas.

Además, se observa que la diferencia de los Niveles de Significancia calculados y el definido con un intervalo de confianza mínimo del 95% (N.S. α del 5%, 0.05) es mayor para velocidades de 1-3 m/s lo que indica que los valores calculados de la erosión son más aproximados a los experimentales.

La diferencia (α) para velocidades de 3-5 m/s es más cercana al 0,05 indicando que a medida que se incremente la velocidad de la partícula, la estimación de la velocidad de erosión con este modelo tendrá una diferencia más significativa con respecto a los valores experimentales y no será confiable su uso.

5.4 COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES VS. MODELO BASE (MB) Y VALORES EXPERIMENTALES VS. MODELO BASE AJUSTADO (MBA)

5.4.1 Valores Experimentales Vs. Modelo Base (MB). En la Tabla 6, se puede evidenciar la aproximación que existe entre los datos experimentales y los datos simulados para una velocidad de partícula de 3 m/s y diámetros de 50, 150 y 600 μm , al implementar MB [3] en la simulación. Estos valores son comparados con las velocidades de erosión promedio obtenidas en la tesis doctoral PEÑA B, Darío Y [6].

Tabla 6. Comparación de Valores Experimentales, Vs, Valores simulados usando el Modelo Base (MB) para una velocidad de la partícula de 3 m/s [3]

Diámetro de la partícula Erosiva	Experimental	Modelo Base (MB)	Error Relativo(MB)
	Perdida de Espesor promedio (μm)	Perdida de Espesor (μm)	(%)
50 μm	0,12	0,0713	40,48
150 μm	2	1,92	4
600 μm	17	15,2	10,58

5.4.2 Valores Experimentales Vs. Modelo Base Ajustado (MBA). En la Tabla 7, se puede evidenciar la aproximación que existe entre los datos experimentales y los datos simulados para una velocidad de partícula de 3 m/s y diámetros de 50, 150 y 600 μm , con errores relativos más pequeños que los obtenidos en (MB), lo que indica que implementar MBA [Autor] permite una mejor aproximación de la simulación. Estos valores son comparados con las velocidades de erosión promedio obtenidas en la tesis doctoral PEÑA B, Darío Y [6].

Tabla 7. Comparación de Valores Experimentales, Modelo Base Ajustado (MBA) (MODEROS 1.0) para una velocidad de la partícula de 3 m/s [Autor].

Diámetro de la partícula Erosiva	Experimental	Modelo Base (MBA)	Error Relativo(MBA)
	Perdida de Espesor promedio (μm)	Perdida de Espesor (μm)	(%)
50 μm	0,12	0,07182	40,14
150 μm	2	1,9200076	3,99
600 μm	17	15,7332	7,45

5.4.3 Eficiencia de Implementar MBA en el Simulador MODEROS 1.0. En la Tabla 8 se puede establecer la eficiencia de utilizar el Modelo Base Ajustado (MBA) en la aplicación software MODEROS 1.0, ya que el error relativo disminuye

y los datos simulados son más aproximados a los experimentales. Con este resultado se obtiene una alternativa de estimación de la velocidad de erosión en un recubrimiento multicapas para cualquier rango de diámetros de partícula y velocidades menores de 5 m/s.

Tabla 8. Eficiencia de Implementar MBA en el Simulador MODEROS 1. 0

Diámetro de la partícula Erosiva	Error Relativo(MB)	Error Relativo(MBA)	Eficiencia de MBA
	(%)	(%)	
50 μm	40,48	40,14	Aumento la eficiencia, al disminuir el error en 0,34%
150 μm	4	3,99	Aumento la eficiencia, al disminuir el error en 0,01%
600 μm	10,58	7,45	Aumento la eficiencia, al disminuir el error en 3,13%

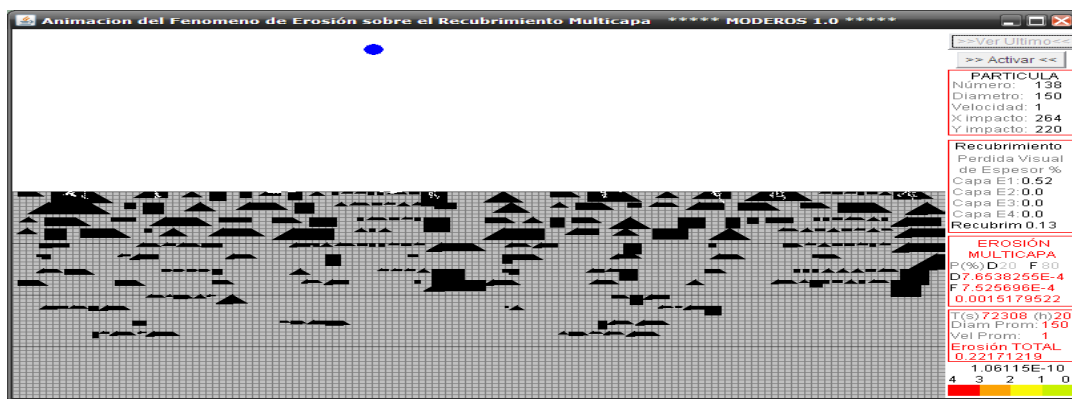
5.5 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA DIÁMETRO DE PARTÍCULA DE 150 μm Y VELOCIDADES DE 1 M/S, 3 M/S Y 5 M/S

En esta sección, se muestra de manera secuencial el efecto de la pérdida de espesor del recubrimiento para un diámetro y velocidad de partícula constante durante la simulación a 20 horas de tiempo de exposición.

En las Figuras 48, 49 y 50 se puede observar como incrementa la **“Erosión Total”** producida en el recubrimiento a medida que incrementa la velocidad de la partícula, esto se hace con el fin de no solo obtener resultados tabulados, sino constar con una animación (videojuego) que represente la realidad a la que está expuesto un recubrimiento cuando se presente este tipo de fenómeno de erosión. Existe la variable pérdida de espesor virtual, que es de carácter porcentual mas no decimal, estos valores varían relativamente debido a que se van borrando pixeles del recubrimiento si estos sobrepasan el umbral de borrado.

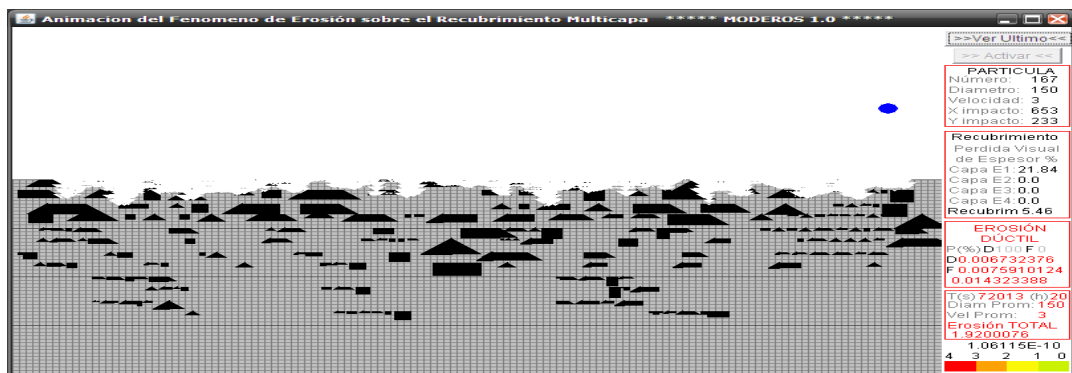
En cambio, la variable **“Erosión Total”** de color ROJO en la parte inferior derecha de la animación, es la que acumula la cantidad de erosión calculada con el modelo de erosión MBA para cada uno de los pixeles, y este valor total es el que se compara con los datos experimentales.

Figura 48. Erosión dúctil, frágil y multicapas con características constantes de la partícula durante la simulación, diámetro de 150 µm y velocidad de 1 m/s usando MBA en la simulación.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 Autor

Figura 49. Erosión dúctil, frágil y multicapas con características constantes de la partícula durante la simulación, diámetro de 150 µm y velocidad de 3 m/s usando MBA en la simulación.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 Autor

Figura 50. Erosión dúctil, frágil y multicapas con características constantes de la partícula durante la simulación, diámetro de 150 μm y velocidad de 5 m/s usando MBA en la simulación.



Fuente: Simulador MODEROS 1.0 Autor

5.6 TIEMPO REAL DE EJECUCIÓN DE LA ANIMACIÓN

El funcionamiento de la aplicación consiste en crear un nuevo marco de trabajo, y en este aparecen varios paneles:

Panel de la Partícula erosiva:

En este panel, se puede establecer la funcionalidad de la partícula, es decir, existen posibles combinaciones de comportamientos entre el diámetro y la velocidad, estos son:

1. Diámetro: Constante, Velocidad: Constante (Este es fue usado para comprobar la aproximación del modelo a los datos experimentales).
2. Diámetro: Constante, Velocidad: Variable.
3. Diámetro: Variable, Velocidad: Constante.
4. Diámetro: Variable, Velocidad: Variable

Los comportamientos 2, 3 y 4 son funcionalidades adicionales que se crearon en el software con el fin de prestar un mejor servicio en la parte académica, de estimación de la erosión y una alternativa de solución visual y cuantificable que permita dar una idea de cómo crear el nuevo recubrimiento y tener una idea de cómo será su vida útil. Basándose en el modelo MBA, se pueden presentar comportamientos diferentes donde su análisis queda a cargo del experto (Ingeniero Metalúrgico encargado) quien será el que brindará su respectiva interpretación.

Panel del Tiempo de Exposición.

Se establece un tiempo límite que detendrá la simulación y su respectiva simulación, el tiempo máximo es de 20 horas y fue el establecido en la parte experimental, sirviendo de punto de referencia para la comparación exitosa de los resultados utilizando el MBA.

Se realizaron simulaciones previas durante 3 días, y se obtuvieron tiempos de ejecución de simulaciones realizadas a diferentes velocidades y diámetros de partícula, como se muestra en la Tabla 9, esto con el fin de brindarle al usuario encargado de utilizar el simulador y realizar algunas pruebas, tener la idea de cuánto tiempo tiene que esperar para que una vez terminada la simulación, el usuario pueda obtener toda la información generada en la simulación.

En el ANEXO J, se muestran la información utilizada para cada partícula erosiva a medida que el tiempo de exposición incrementa.

Tabla 9. Tiempo Real de Ejecución de la Animación simulando 20 horas de tiempo de exposición, Aproximación en minutos, Error Relativo de +/- 4 minutos [Autor].

		Tamaño de la Partícula Erosiva			
		50 μm	150 μm	280 μm	600 μm
Velocidad de la partícula Erosiva	1 m/s	193 min	51 min	20 min	7 min
	3 m/s	134 min	31 min	14 min	6 min
	5 m/s	75 min	29 min	11 min	5 min

En el ANEXO K, se muestran los valores de erosión para diferentes diámetros y velocidades de partícula a 20 horas de exposición.

En el ANEXO L, M y N, se muestran imágenes de la animación de MODEROS 1.0, y se puede observar como incrementa la erosión total a medida que incrementa la velocidad de la partícula para un diámetro de partícula constante.

6. CONCLUSIONES

- Al implementar el nuevo modelo MBA, ajustando intervalos de diámetro de partícula [300-590] μm se pudo mejorar significativamente la tendencia creciente que tiene la velocidad de erosión, y observar este comportamiento a medida que incrementa la velocidad de la partícula.
- Se evaluó y se comparó la erosión simulada y la experimental y se obtuvo funciones lineales para velocidades pequeñas con un coeficiente de linealidad R^2 por encima del 0,97, lo que indica que ya se pueden calcular por medio de la simulación, velocidades de erosión para velocidades de partícula intermedias como 2 m/s y 4 m/s con diferentes diámetro de partícula [10-600] μm .
- Por medio del estadígrafo t-stundet se encontró que los valores simulados y experimentales son muy aproximados cuya diferencia promedio es muy cercana a cero, dejando evidencia que para velocidades menores de 4 m/s el modelo es confiable, pero a medida que incrementa la velocidad, los valores pueden no ser tan aproximados a los experimentales.
- Se utilizó un modelo matemático promedio que calcula velocidades de erosión dúctil, erosión frágil y erosión multicapa por medio de una relación del efecto que produce la cantidad de material frágil y dúctil presente para cada región de impacto, y un factor de proporcionalidad K_3 a un ángulo de impacto de 90° (incidencia normal), calculado en este trabajo de investigación.
- Se estableció una matriz patrón del tiempo (tiempo de ejecución del modelo en milisegundos) en la que se puede calcular la erosión en el recubrimiento para intervalos de tiempo [1-20] horas, y así estimar el desgaste al que fue expuesto el recubrimiento por el impacto sucesivo de partículas solidas.

- Se implementaron algoritmos que permitieron llevar a cabo el deterioro del material, a un tiempo de exposición límite en la simulación.
- Se creó un modelo matemático llamado región de contacto que relaciona los datos aproximados de la animación con los reales, de manera que se pueda representar en tiempo real lo que sucedería con el recubrimiento expuesto a este tipo de condiciones, convirtiéndose en un aporte a la investigación de erosión de partículas solidas a nivel mundial, debido en la actualidad no se cuenta con una conexión matemática entre simulación y animación en tiempo real.
- Se encontró un valor crítico de desgaste (llamado **“Umbral de borrado”**) que es comparado con el valor de cada pixel de la matriz MATRIZ [I][J][K], que permite monitorear la erosión del material, y a su vez representar gráficamente por medio de la animación, como se desgasta la superficie del recubrimiento multicapa.
- Con la función matricial de ajuste, se pudo utilizar el Modelo Base Ajustado (MBA) creado por el Autor. De esta manera se mejora la estimación de la velocidad de erosión del modelo base anterior [3] ya que este solo se podía estimar la erosión a velocidades de partícula menores o iguales de 2 m/s, y diámetros menores de 280 μm . Se llega a la conclusión que utilizar el MBA es confiable y más eficiente, debido a que los valores simulados son muy aproximados a los experimentales para cualquier diámetros de partícula [1-600] μm , y a velocidades de partícula menores de 4 m/s solamente.
- La aplicación software MODEROS 1.0 está condicionada a velocidades menores de 5 m/s, aunque se extendió el rango de valores para cualquier diámetro de partícula, convirtiéndose esta aplicación en una alternativa para el estudio de estimación de la velocidad de erosión en un recubrimiento

multicapas, de fundamento académico, en una nueva área de estudio en la Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática y un apoyo en el área de Tribología en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

- Utilizando técnicas de ingeniería del software, se pudo comprender el fenómeno, establecer marcos de trabajo, organizar la información, crear listas de riesgos e implementar algoritmos que fueron muy significativos para el desarrollo incremental de cada versión de la aplicación software.

7. RECOMENDACIONES

- Emplear un modelo matemático donde la región de contacto sea semicircular, para poder representar de una mejor forma el desgaste, evitando una visualización lineal del mismo.
- Contar con una formula específica ya sea dúctil o frágil, para utilizar el factor de proporcionalidad sin tener que usar modelos donde se calcula la probabilidad que tiene cierto tipo de material en la región de impacto y como este influye en la erosión.
- Implementar un modelo de erosión en 3D, que permita visualizar el fenómeno de una manera más didáctica.
- Trabajar conjuntamente con un ingeniero Metalúrgico en otros trabajos de laboratorio y crear nuevos modelos de erosión para diferentes recubrimientos.
- Implementar algoritmos de búsqueda por sectores dentro del recubrimiento, que establezca la contigüidad de algún conjunto de material que este por fuera del recubrimiento y se produzca su borrado, brindando la apariencia en la animación de haber sido removido por alguna otra partícula erosiva.

BIBLIOGRAFÍA

SIMULACIÓN DE RECURIMIENTOS

- [1] Rebecca Stubbs, *“Modelling the Erosion of Multilayered coatings”*, Corrosion and Protection Centre, UMIST Manchester, pp. 1-5. 1994.
- [2] Rigaux P., Scholl M. and Voisard A. *Spatial Databases with Applications to GIS*. Morgan Kaufmann Publishers (2002).
- [3] Jaimes S., Alban y Correa M., Christian M. *“Simulación por computador del proceso de erosión de un recubrimiento multicapa de Ni-Cr-Fe-WC a bajas temperaturas”*, UIS Bucaramanga pp. 39-46 2002.

TÉCNICOS

- [4] Jacobson I, Rumbaugh J, Booch G, *“Unified Modeling Language User Guide”*, 2nd Edition, Addison-Wesley Object Technology Series 2000.
- [5] Jacobson, Ivar. Booch, Grady. Rumbaugh, James. *“El Lenguaje Unificado de Modelado”*, Editorial Addison Wesley. 1999.
- [6] PEÑA B, Dario Y. *“Erosion – corrosion of composite based materials in laboratory simulated fluidized bed conditions”*, Corrosion and Protection Centre, UMIST Manchester, 1998.
- [7] A. Levy. *Proc. 6th Int “Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact”*, (1983) pp. 39.
- [8] *“Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials”*, ELSEVIER.
- [9] I. M. Hutchings. *“Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact”*.
- [10] I. M. Hutchings, Edward Arnold. *“Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials”*,.
- [11] S. K. Hovis, J. E. Talia, *Wear*.
- [12] P. H. Shipway and I. M. Hutchings, *Phil. Mag*, *“Fracture of brittle spheres under compression and impact loading: I - Elastic stress distributions”*.

- [13] I. M. Hutchings, "*Abrasive and erosive wear of metal-matrix composites*", Proc. 2nd European Conf. on Advanced Materials and Processes, Euromat '91, Inst. of Materials, vol.2, pp. 56-64. 1992.
- [14] LAWN B., "*Fracture of Brittle Solids*", Second Edition, Cambridge University Press. 1993.
- [15] CONRAD H, D. McCabe and Sargent G. A, Proc. Int. Conf. Science of Hard Materials 1981.
- [16] FINNIE I. "*The mechanisms of erosive wear in ductile metals*", 1976.
- [17] FINNIE I. Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact. 1979.
- [18] HUTCHINGS I. M. Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact. 1979.
- [19] SUNDARARAJAN. G. "*the influence of impact angle and velocity, particle shape and materials properties*", The depth of plastic deformation beneath eroded surfaces, 1995.
- [20] UNDERWOOD E. E, "*Quantitative Stereology*", Addison-Wesley Publishing Co. 1970.
- [21] GURLAND J, Transactions of the Metallurgical Society 236. 1966.
- [22] EXNER H. E. and GURLAND J., Powder Metallurgy 13,25 1970.
- [23] LEE H. C. and GURLAND J., Materials Science and Engineering 33. 1978.
- [24] DAWIHL W. and FRISCH B., Cobalt 22. 1964.
- [25] ANNAD K., MORRISON C., SCATTERGOOD R. and WARREN R. "*Erosion of multiphase materias*", 1986.
- [26] COCKBURN [COC01] <http://alistair.cockburn.us/Use+cases>
- [27] PIATTINI. MARIO G., CALVO. JOSE. "*Análisis y diseño de aplicaciones informáticas de gestión "Una perspectiva de Ingeniería del Software"*", Alfaomega 2004.
- [28] PRESSMAN S. ROGER. "*Ingeniería del Software "Un Enfoque Practico"* ", McGraw Hill Sexta edición. 2005. Pag 207-208
- [29] P.J. Woytowitz, R.H. Richman, "*Modeling of damage from multiple impacts by spherical particles* ", *Wear* 233–235_1999.120–133.

[30] Q. Chen, D. Y. Li, "Computer Simulation of solid-particle erosion", *Wear* 254 (2003) pp. 205-206.

[31] Q. Chen, D. Y. Li, "Computer Simulation of solid-particle Erosion of composite materials", *Wear* 255 (2003) pp. 82-83.

SITIOS WEB

[32] <http://www.consolida-it.com/marco.htm>

[33] http://www.energyproducts.com/fluidized_bed_combustors.htm

[34] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/estadisticas2004/otros/glosario.htm>

[35] http://es.wikipedia.org/wiki/Unidades_de_viscosidad

[36] http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Unificado

[37] <http://www.sun.com>

[38] "Tabla de cuantiles de la distribución t de Student", [En línea]. Disponible: <http://oromeroeii.blogcindario.com/ficheros/t-studentdoscolas.pdf>.

[39] Dr. Ada Ray, "Prueba de hipótesis en una población", [En línea]. Disponible: <http://www.aray1.com/docupdf/hipotesis.pdf>.

ANEXOS

Anexo A. Plantillas del caso de uso funcionalidad de la aplicación.

Descripción de cada caso de uso:

Caso de uso:	Controlar selección
Actor primario:	Ingeniero encargado
Meta en el contexto:	Evitar algún ingreso erróneo de los valores de entrada requeridos para la simulación
Condiciones previas:	Validar la selección y habilitar el botón escogido
Activador:	El ingeniero decide qué valores debe digitar.
Asociación:	Excluye de caso de uso establecer la funcionalidad de la aplicación
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ingeniero: observar cada panel de valores de entrada 2. Ingeniero: decidir qué valores son los apropiados 3. Ingeniero: selecciona las opciones disponibles
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. los cuadros de texto vacíos: el ingeniero debe digitar algún valor apropiado. 2. las listas de selección inhabilitadas: el ingeniero debe seleccionar algún valor de las listas. 3. Se ingresen valores incorrectos: el sistema debe validar cada valor de entrada.
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿En el momento de mostrar el panel principal del recubrimiento debería aparecer mensajes de error o inhabilitar cualquier opción de comenzar la simulación? 2. ¿Para cada ingreso de valor incorrecto debería interrumpir cualquier avance en la toma de datos, y permitir automáticamente que se corrija el error?

Caso de uso:	Fijar tiempos de análisis
Actor primario:	Ingeniero encargado
Meta en el contexto:	Escoger que tiempos son los más apropiados para la simulación y así tener una idea de cómo fue el fenómeno de erosión
Condiciones previas:	Haber escogido la opción
Activador:	El ingeniero decide que tiempos son los recomendables para el análisis
Asociación:	Excluye de caso de uso establecer la funcionalidad de la aplicación
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ingeniero: observar el panel que contiene los tiempos 2. Ingeniero: decidir qué tiempo escoger 3. Ingeniero: seleccionar los tiempos
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. los cuadros de selección vacíos: el ingeniero debe seleccionar máximo 20 tiempos. 2. los cuadros seleccionados: el sistema debe validar cada cuadro de selección y a su vez monitorear que no sobrepase el máximo de tiempos permitidos (20). 3. cuadros de selección fijos: el sistema tiene fijos el tiempo 0 horas (estado inicial del recubrimiento sin desgaste) y el tiempo 20 horas (estado final del recubrimiento expuesto al desgaste).
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿El sistema debería permitir el estudio de todos los tiempos que se decidieran escoger? 2. ¿Para cada selección adicional de algún botón radio de selección (<i>RadioButton</i>), el sistema debería mostrar algún mensaje de error y a su vez no permitir más selecciones? 3. ¿El panel debería tener un botón de borrar selección de tiempos en caso de querer otra colección de tiempos para la simulación?

Caso de uso:	Mostrar entorno de trabajo
Actor secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Visualizar como será la simulación
Condiciones previas:	Haber ingresado los valores de entrada y las selecciones apropiadas para dar inicio a la simulación
Activador:	El ingeniero después de establecer la funcionalidad (marco de trabajo) de la aplicación
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicación: obtiene el perfil funcional a mostrar 2. Aplicación: muestra el panel principal del recubrimiento 3. Aplicación: da inicio a la generación del recubrimiento 4. Aplicación: comenzaría la simulación.
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Flujo de trabajo interrumpido: los valores de entrada no hayan sido habilitados para dar inicio a la aplicación. 2. Frame oculto: el sistema no habilite el frame para ser mostrado y continuar con la simulación.
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Permitir otro tipo de color para una visualización diferente? 2. ¿Restringir de forma automática la continuidad de la simulación, en caso de no generarse el recubrimiento y su consecuente visualización?

Anexo B. Plantillas del caso de uso generar la partícula erosiva.

Descripción de cada caso de uso:

Caso de uso:	Crear movimiento
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Dar la dinámica al sistema a simular y comienzo a los impactos subsecuentes
Condiciones previas:	Haber creado la partícula con anterioridad
Activador:	El objeto partícula nueva
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. La partícula: se muestra en la posición inicial 2. La partícula: comienza a mostrarse para cada posición 3. La partícula: se sigue desplazando 4. La partícula: se ubica en la posición de impacto con la superficie externa del recubrimiento que está expuesta al medio erosivo.
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Punto de inicio incorrecto: el sistema al generar esta coordenada (Xk, Yk) de la partícula sobrepase el margen de valores permitidos para ubicarla dentro del panel grafico 2. Partícula no creada: el sistema no haya generado previamente la partícula erosiva
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Establecer una relación matemática entre el espacio a recorrer (a partir de la posición inicial de la partícula hasta la superficie de contacto del recubrimiento) y el espacio disponible generado por el desgaste del recubrimiento, es decir, espacio disponible vs cantidad de desgaste en la matriz? 2. ¿Crear un modelo matemático que implemente esta relación? 3. ¿E sistema permite visualizar este movimiento bajo estos modelos matemáticos?

Caso de uso:	Determinar punto de impacto
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Obtener la posición actual que permitirá dar colisión con la superficie del recubrimiento
Condiciones previas:	Que las coordenadas X_k (partícula) y X_j (superficie del recubrimiento) sean iguales [$X_k=X_j$], con el fin de permitir un desplazamiento lineal con un ángulo de incidencia normal (90°)
Activador:	La información suministrada por la aplicación y el objeto partícula nueva.
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. La aplicación: asigna el valor de la coordenada X_k a la coordenada X_j 2. La aplicación: por medio de la coordenada X_j del recubrimiento, busca la coordenada Y_j que pertenezca a algún valor de material dúctil o frágil 3. La aplicación: obtiene el punto de impacto (X_j, Y_j) sobre la superficie
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coordenada X_k incorrecta: el valor sobrepase los rangos permitidos para dar inicio al movimiento de la partícula 2. Valor X_k previamente asignado: se debe borrar el valor actual una vez se haya ocurrido el evento de impacto, para evitar dependencia de datos
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿El sistema debería controlar cada punto de impacto de manera que no sea repetible durante un largo tiempo de exposición? 2. ¿Debería haber un color específico para cada evento de impacto, para visualizar mejor lo sucedido?

Anexo C. Plantillas del caso de uso crear el recubrimiento.

Descripción de cada caso de uso:

Caso de uso:	Distribuir la composición por capas
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Establecer qué cantidad de material Dúctil o material Frágil le corresponde a cada capa (e1, e2, e3, e4).
Condiciones previas:	Haber asignado la dimensión del recubrimiento y sus posibles áreas de concentraciones (celdas de cada capa)
Activador:	El objeto recubrimiento
Asociación:	Excluye de caso de uso Generar composición del recubrimiento
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. El recubrimiento: obtiene la cantidad de filas de la matriz que le corresponden a cada capa 2. El recubrimiento: obtiene la cantidad total de celdas para cada capa 3. El recubrimiento: calcula el porcentaje de concentración para cada capa 4. El recubrimiento: distribuye aleatoriamente en las celdas la cantidad de %WC (carburo tungsteno) calculado 5. El recubrimiento: complementa en las celdas restantes de cada capa protectora la cantidad de material Dúctil
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cantidad de material frágil incorrecto: el sistema debe generar de manera adecuada de acuerdo a los porcentajes de concentración %WC 2. Distribución de celdas incompletas: el sistema debe identificar claramente toda la micro estructura de la matriz, para poder mostrarla en la animación de la simulación
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Crear un modelo matemático que permita descomponer la matriz del recubrimiento por capas y celdas, y a su vez almacenar esta información en variables para próximos análisis?

Caso de uso:	Mostrar recubrimiento
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Visualizar la matriz recubrimiento en la animación
Condiciones previas:	Haber creado la matriz recubrimiento con toda su micro estructura inicial
Activador:	El objeto recubrimiento
Asociación:	Extend de caso de uso generar composición del recubrimiento
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. El recubrimiento: obtiene la cantidad calculada de material Dúctil 2. El recubrimiento: obtiene la cantidad calculada de material Frágil 3. El recubrimiento: se muestra en la imagen usando las librerías graficas correspondientes del lenguaje JAVA.
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Distribución de la matriz incompleta: el sistema debe permitir llenar espacios vacios de la matriz antes de comenzar a visualizarlo, e incluso, antes de comenzar a someterla al desgaste
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Desarrollar un modelo matemático que permita representar esta información del recubrimiento en la animación o imagen a graficar? 2. ¿Qué el sistema permita visualizar este movimiento bajo estos modelos matemáticos?

Caso de uso:	Fijar la composición actual
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Obtener la información generada del recubrimiento y guardarlo en una matriz para dar inicio a la simulación
Condiciones previas:	Crear bien la distribución de la matriz recubrimiento bajo los parámetros de concentración especificados en la experimentación del estudio hecho en el laboratorio
Activador:	El objeto recubrimiento
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. La aplicación: obtiene la información del recubrimiento y la guarda en una variable de trabajo 2. El recubrimiento: queda identificado con una concentración actual
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Valores sin borrar: el sistema debe permitir el borrado de una composición anterior del recubrimiento de alguna simulación hecha anteriormente 2. Integridad del recubrimiento: el sistema debe actualizar la información del recubrimiento cada vez que se trabaje en el
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Desarrollar un modelo entidad relación para guardar la información del recubrimiento? 2. ¿Qué el sistema permita utilizar cuando sea necesario, cualquier tipo de información del recubrimiento en cualquier momento?

Anexo D. Plantillas del caso de uso para generar el fenómeno de erosión en el recubrimiento.

Descripción de cada caso de uso:

Caso de uso:	Encontrar el punto de impacto
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Obtener la posición actual que permitirá dar colisión con la superficie del recubrimiento
Condiciones previas:	Las coordenadas X_k (partícula) y X_j (superficie del recubrimiento) deben ser iguales [$X_k=X_j$], con el fin de permitir un desplazamiento lineal con un ángulo de incidencia normal (90°)
Activador:	La información suministrada por la aplicación y el objeto Partícula nueva.
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. La aplicación: asigna el valor de la coordenada X_k a la coordenada X_j 2. La aplicación: por medio de la coordenada X_j del recubrimiento, busca la coordenada Y_j que pertenezca a algún valor de material dúctil o frágil 3. La aplicación: obtiene el punto de impacto (X_j, Y_j) sobre la superficie
Excepciones:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coordenada X_k incorrecta: el valor sobrepase los rangos permitidos para dar inicio al movimiento de la partícula 2. Valor X_k previamente asignado: se debe borrar el valor actual una vez se haya ocurrido el evento de impacto, para evitar dependencia de datos
Asuntos pendientes:	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿El sistema debería controlar cada punto de impacto de manera que no sea repetible durante un largo tiempo de exposición? 2. ¿Debería haber un color específico para cada evento de impacto, para visualizar mejor lo sucedido?

Caso de uso:	Calcular el tipo de desgaste
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Determinar la cantidad de desgaste de acuerdo al material impactado por la partícula
Condiciones previas:	Haber encontrado el punto de impacto y el tipo de material impactado
Activador:	1. El objeto partícula nueva 2. El objeto recubrimiento
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. La aplicación: obtiene que tipo de material es impactado por la partícula y asigna su respectivo identificador para realizar los cálculos correspondientes 2. La aplicación: calcula la tasa de erosión de acuerdo a los modelos matemáticos establecidos 3. La aplicación: puede usar las ecuaciones correspondientes a las ecuaciones de Erosión Dúctil 4. La aplicación: puede usar las ecuaciones correspondientes a las ecuaciones de Erosión Frágil 5. La aplicación: puede usar las ecuaciones correspondientes a las ecuaciones de Erosión multifases 6. La aplicación: puede realizar diferentes cálculos estadísticos que permitan estudiar como fue el comportamiento del fenómeno de erosión en el recubrimiento multicapas expuesto a datos reales de laboratorio
Excepciones:	1. Errores en el uso de formulas: el sistema debe controlar anticipadamente los valores operacionales que serán empleados en las formulas correspondientes

	<p>2. Validación correcta de formulas: las formulas que calculan el desgaste deben describir apropiadamente y eficientemente las diferentes velocidades de erosión para los materiales de estudio.</p> <p>3. Deficiencia de los modelos matemáticos: el sistema debe contar con valores reales que describen la erosión para estos materiales según corresponda la literatura</p>
Asuntos pendientes:	<p>1. ¿Implementar los modelos matemáticos de manera eficiente y oportuna que permita describir el fenómeno de erosión presente en un ambiente real de experimentación?</p> <p>2. ¿El sistema debería controlar el desgaste presente en la matriz del recubrimiento de manera que se pueda establecer y estimar el nivel de eficiencia del recubrimiento al ser expuesto este a un medio erosivo?</p>

Caso de uso:	Actualizar la composición actual
Actor Secundario:	La aplicación
Meta en el contexto:	Obtener la información generada del recubrimiento y guardarlo en una matriz para dar continuidad con la simulación
Condiciones previas:	Haber generado el evento de impacto y su consecuente erosión en el recubrimiento.
Activador:	El objeto recubrimiento
Asociación:	
Escenario:	<ol style="list-style-type: none"> 1. La aplicación: obtiene la información del recubrimiento y la guarda en una variable de trabajo 2. El recubrimiento: es expuesto al desgaste y su correspondiente remoción de valores de la composición de la matriz recubrimiento 3. El recubrimiento: queda identificado con una concentración actual de la matriz calculada
Excepciones:	1. Identificación de controles: el sistema debe actualizar la información del recubrimiento dependiendo de los desgastes que hayan sido calculados, por medio del evento de impacto generado
Asuntos pendientes:	1. ¿Qué el sistema permita utilizar cuando sea necesario, cualquier tipo de información del recubrimiento en cualquier momento?

Anexo E. Plantillas de listas de riesgos

A medida que se avanzaba en las fases de la metodología RUP, se establecieron una serie de riesgos muy significativos que permitieron identificar posibles escenarios a los cuales la simulación y el funcionamiento de la aplicación están expuestos en algún momento; a su vez se plantearon ideas sueltas a las que en las plantillas se hace referencia a la Reducción/Supervisión y además se plantearon planes de contingencia que minimizarían el riesgo si llega a aparecer, evitando así la inesperada conversión de Error (en la etapa de creación) a Defecto (en la etapa de implementación).

Algunos tipos de riesgos que se identificaron, usan la siguiente nomenclatura:

- Fun: Hace referencia a la funcionalidad de algún proceso.
- Exe: Hace referencia a algún flujo de ejecución de la aplicación.
- AD: Hace referencia al análisis de datos de los resultados obtenidos en la investigación de eficiencia del modelo a utilizar en la simulación.

Id Fun1	Fecha 08/08/09	Probabilidad (70 %)	Impacto (1-4) 3
Descripción No se generarían puntos iniciales dentro del origen de cada figura.			
Contexto Se encuentra en la función generar tipo de figura, es decir, la primera de la secuencia de figuras por subcapa.			
Reducción / Supervisión - Buscar otro punto de generación de valores. - Generar y observar el flujo de datos. - Establecer si se usan variables globales ó locales para estos valores a generar.			

<p>Gestión / Plan de Contingencia</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caracterizar cada subcapa que contenga sus respectivas figuras. - Antes de generar valores iniciales, crear un for que administre las 12 subcapas que comprenden 3 capas principales (E1,E2,E3). - Para cada subcapa establecer puntos (x,y) iniciales para la primer figura de la lista de las demás figuras posibles. 			
Estado Actual			
Autor: Carlos Laguado		Asignado: Carlos Laguado	
Id Exe3	Fecha 10/12/09	Probabilidad (90 %)	Impacto (1-4) 3
<p>Descripción</p> <p>No habilitaría el botón control de flujo de la ejecución del programa y quedaría en un bucle infinito</p>			
<p>Contexto</p> <p>Se encuentra dentro del bloque de ejecución del movimiento de la partícula</p>			
<p>Reducción / Supervisión</p> <ul style="list-style-type: none"> - Crear un punto de fuga en la secuencia, controlado este por un temporal. - Mirar en qué punto se debe operar para que espere la secuencia y se habilite la opción continuar nuevamente. 			
<p>Gestión / Plan de Contingencia</p> <ul style="list-style-type: none"> - Usar una función que controle la ejecución manual. - No usar ejecución de la animación de forma manual sino de forma automática. 			
Estado Actual			
Queda en un bucle infinito al dar inicio.			
Autor: Carlos Laguado		Asignado: Carlos Laguado	

Id Exe1	Fecha 3/12/09	Probabilidad (80 %)	Impacto (1-4) 4
<p>Descripción</p> <p>Se podría no visualizar en tiempo real de ejecución la animación del recubrimiento</p>			
<p>Contexto</p> <p>Panel principal donde se muestra la animación.</p>			
<p>Reducción / Supervisión</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hacer click en la figura y generar alguna acción. - Buscar algún sustituto que permita realizar este evento. - Utilizar algún botón que permita interactuar con la animación de la simulación. 			
<p>Gestión / Plan de Contingencia</p> <ul style="list-style-type: none"> - Implementar alguna función de hacer click en la figura pintada en el objeto Canvas. - Implementar alguna función que permita interactuar con la animación usando el objeto botón. 			
<p>Estado Actual</p> <ul style="list-style-type: none"> - Solo pinta un numero K de veces de manera controlada dentro del flujo normal de la simulación. - Pintar automáticamente sin salir del bucle (este es un problema de control de flujo usando los botones). 			
Autor: Carlos Laguado		Asignado: Carlos Laguado	

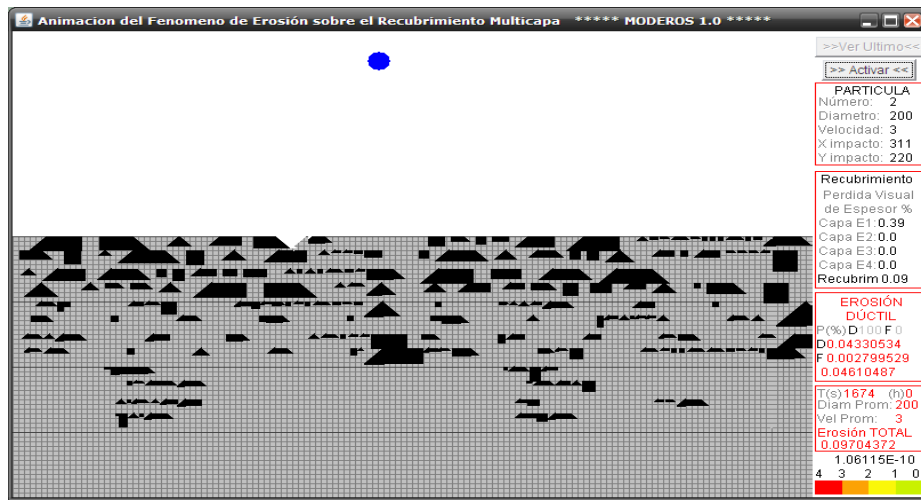
Id Exe2	Fecha 4/12/09	Probabilidad (50 %)	Impacto (1-4) 2
<p>Descripción</p> <p>Podría no trabajar sobre una región de la figura y no se generaría algún evento respuesta sobre el flujo normal de la aplicación</p>			
<p>Contexto</p> <p>Es usado en el panel de la animación cuando el flujo de esta es de manera manual</p>			
<p>Reducción / Supervisión</p> <ul style="list-style-type: none"> - Buscar códigos y adaptarlos a las necesidades previstas. - Encontrar un código apropiado que permita realizar las operaciones propuestas y se pueda utilizar e implementar. 			
<p>Gestión / Plan de Contingencia</p> <ul style="list-style-type: none"> - Crear un archivo propio que permita realizar las operaciones esperadas. - Investigar en la web una forma de operar encima de un objeto canvas. 			
<p>Estado Actual</p>			
<p>Autor: Carlos Laguado</p>		<p>Asignado: Carlos Laguado</p>	

Id Exe4	Fecha 11/12/09	Probabilidad (90%)	Impacto (1-4) 3
<p>Descripción</p> <p>Podría no encontrar y establecer exactamente el punto de impacto y su respectiva visualización y cálculos de velocidades de erosión</p>			
<p>Contexto</p> <p>Se presenta en el movimiento de la partícula a medida que transcurre el tiempo y se dificulta obtener el punto exacto de contacto para exponer el recubrimiento al desgaste.</p>			
<p>Reducción / Supervisión</p> <ul style="list-style-type: none"> - Crear una región de margen de impacto. - Crear una matriz que relacione coordenadas Y_k del punto de contacto en la superficie de la partícula y el punto de la superficie del recubrimiento que será impactado. - Encontrar un patrón que permita acotar esta región optima 			
<p>Gestión / Plan de Contingencia</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dividir una posible región alterna y cuadrar intervalos decrecientes hasta aproximar el punto de impacto. - Guardar las coordenadas del punto antes de chocar para fijarlo y pintar en el objeto canvas de la animación el choque de la partícula sobre la superficie expuesta. 			
<p>Estado Actual</p> <p>Esta pintando en un punto posterior al de contacto visible, es decir, existe una confusión de valores Y_k que visualiza un choque erróneo diferente al que se espera.</p>			
Autor: Carlos Laguado		Asignado: Carlos Laguado	

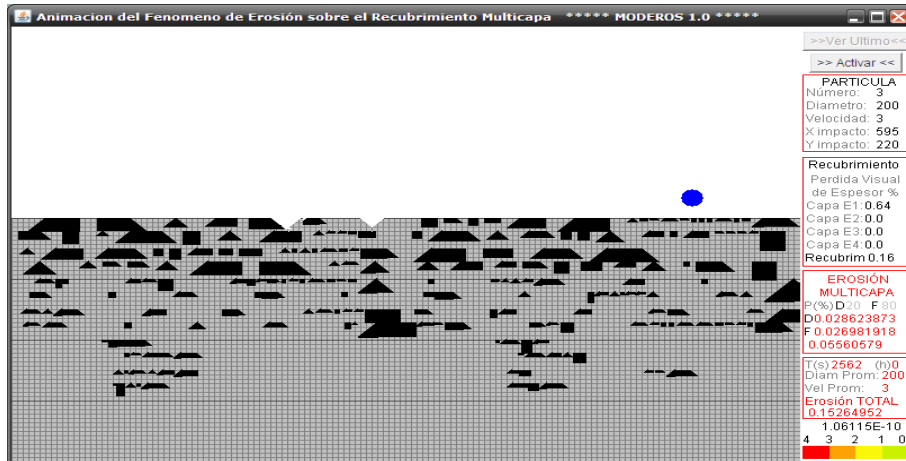
Id AD1	Fecha 10/12/09	Probabilidad (100%)	Impacto (1-4) 4
Descripción No se usarían conceptos ni algoritmos de regresión lineal			
Contexto Se encuentra en la visualización por medio de gráficas de funciones comparativas de resultados finales (Experimental, Vs, Simulados)			
Reducción / Supervisión -Buscar códigos de operación. - Utilizar tolerancia para aproximar la comparación. - Usar los parámetros requeridos para la regresión.			
Gestión / Plan de Contingencia - Implementar estos códigos si son encontrados. - Crear un nuevo algoritmo usado a la medida. - Crear un nuevo algoritmo usado a la medida.			
Estado Actual			
Autor: Carlos Laguado		Asignado: Carlos Laguado	

Id Fun2	Fecha 11/12/09	Probabilidad (60%)	Impacto (1-4) 3
<p>Descripción</p> <p>No se mostraría el efecto visual que representaría el choque de la partícula sobre la superficie del recubrimiento, independientemente del material a erosionar.</p>			
<p>Contexto</p> <p>Existe la relación: Velocidad de la partícula / Velocidad de erosión / Color / Energía.</p> <p>Se presenta en la visualización del punto y en su región horizontal de contacto para indicar un color diferente dependiendo de la energía que se genera en el momento de chocar la partícula.</p>			
<p>Reducción / Supervisión</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elaborar una tabla de que relacione; Velocidad de la partícula / Velocidad de erosión / Color / Energía / Región a pintar en el recubrimiento. - Mostrar automáticamente valores generados en la simulación en el panel de la animación. 			
<p>Gestión / Plan de Contingencia</p> <ul style="list-style-type: none"> -Asignar y pintar valores en cada punto interno del recubrimiento pero no solo horizontal sino a los lados. - Representar con algún color el desgaste ya sea Dúctil, Frágil, Multicapa. 			
<p>Estado Actual</p>			
<p>Autor: Carlos Laguado</p>		<p>Asignado: Carlos Laguado</p>	

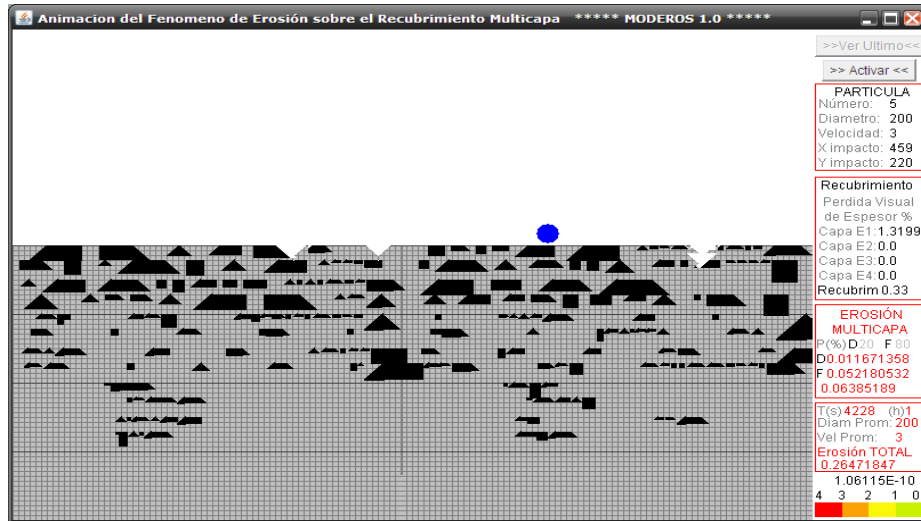
Anexo F. Evento de impacto dúctil sobre la superficie del recubrimiento.



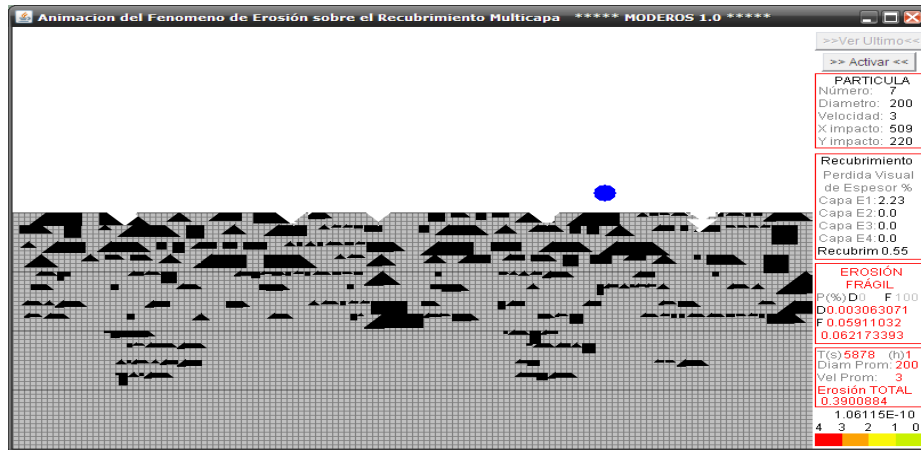
Anexo G. Evento de impacto multicapa sobre varios granos de wc en la superficie del recubrimiento.



Anexo H. Evento de impacto multicapa sobre un grano de wc y parte de la matriz dúctil en la superficie del recubrimiento.



Anexo I. Evento de impacto frágil sobre la superficie del recubrimiento.



Anexo J. Información utilizada para cada partícula erosiva a medida que el tiempo de exposición incrementa.

Datos Utilizados para cada Partícula erosiva	
Numero de partícula	Tipo de Erosión (dúctil, frágil, multicapa)
Diámetro de la partícula	Probabilidad de impacto
Velocidad de la partícula	Erosión dúctil acumulada de la partícula
Posición X de impacto	Erosión frágil acumulada de la partícula
Posición Y de impacto	Erosión total acumulada de la partícula
Borrado de pixeles (%) Capa Principal E1	Tiempo de exposición en segundos
Borrado de pixeles (%) Capa Principal E2	Tiempo de exposición en horas
Borrado de pixeles (%) Capa Principal E3	Diámetro promedio de la partícula
Borrado de pixeles (%) Capa Principal E4	Velocidad promedio de la partícula
Borrado de pixeles (%) del total de capas	Erosión Total Acumulada durante el tiempo de exposición

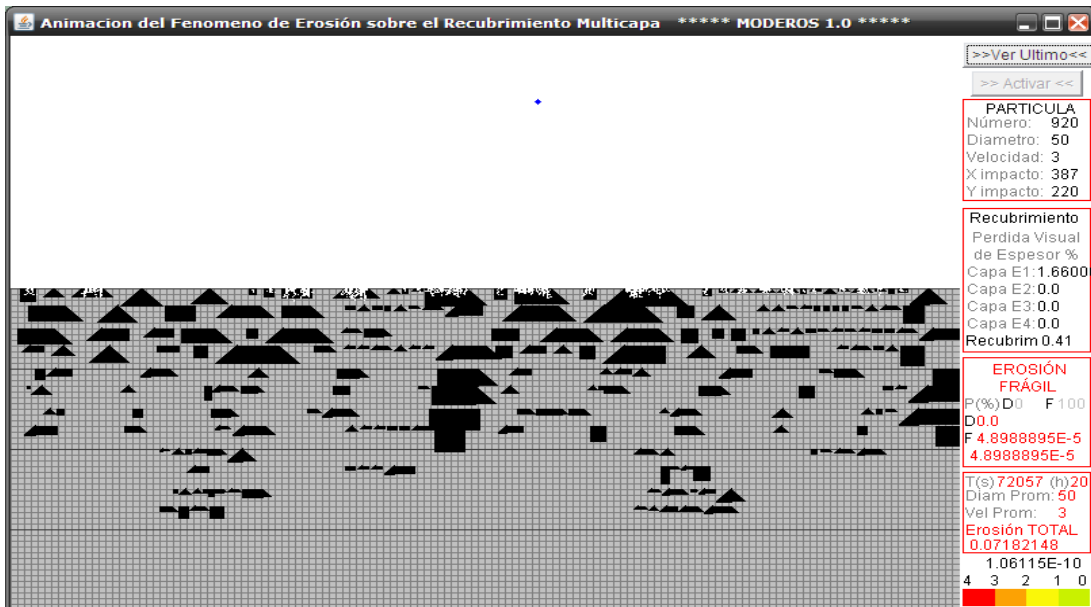
Anexo K. Valores de erosión medidos en pérdida de espesor (μM) EN UN recubrimiento multicapas con un tiempo de exposición de 20 horas.

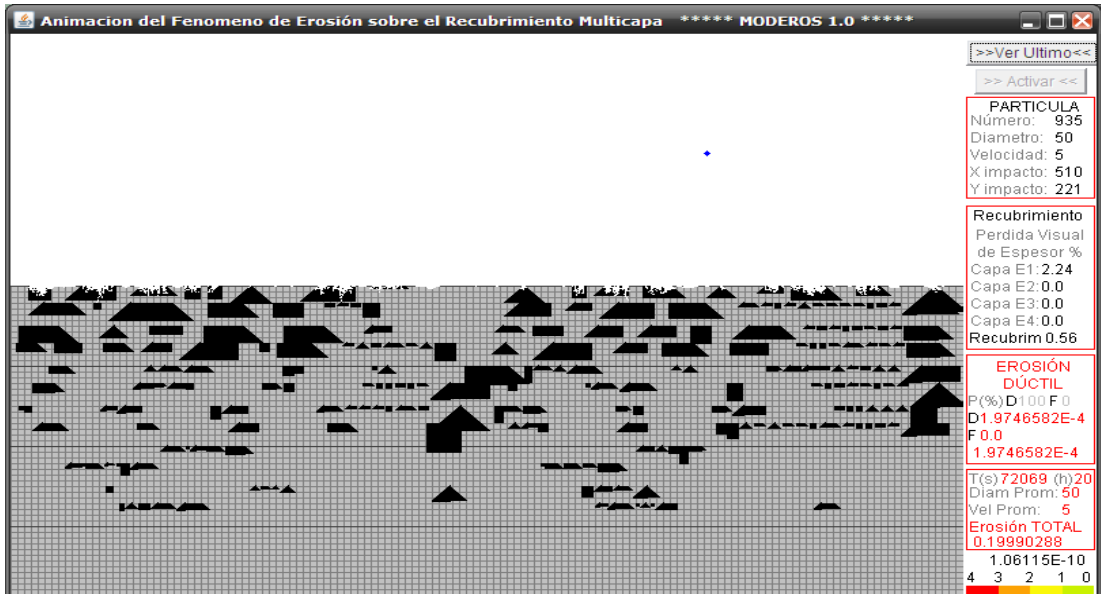
		Tamaño de la Partícula Erosiva			
		50 μm	150 μm	280 μm	600 μm
Velocidad de la partícula Erosiva	1 m/s	0,007	0,221	1,423	1,767
	3 m/s	0,07182	1,920	12,77925	15,733
	5 m/s	0,199	5,382	34,970	43,671

En la tabla del anexo k, se observa una tendencia creciente en la pérdida de espesor en el recubrimiento al mantener constante el diámetro de la partícula mientras aumenta la velocidad de la partícula. Se observó que los valores obtenidos para diámetros de [50-150] μm son pequeños, corroborando lo que ocurre en la literatura [1] [6] donde la probabilidad de chocar en un material dúctil es mayor, y la velocidad de erosión en este tipo de material es baja para choques con incidencia normal (ángulo de 90°). Se observó que los valores obtenidos para diámetros de [150-280] μm son más grandes, corroborando lo que ocurre en la literatura [1] [6] donde la probabilidad de chocar en un material frágil es mayor, y la velocidad de erosión en este tipo de material es alta para choques con incidencia normal (ángulo de 90°).

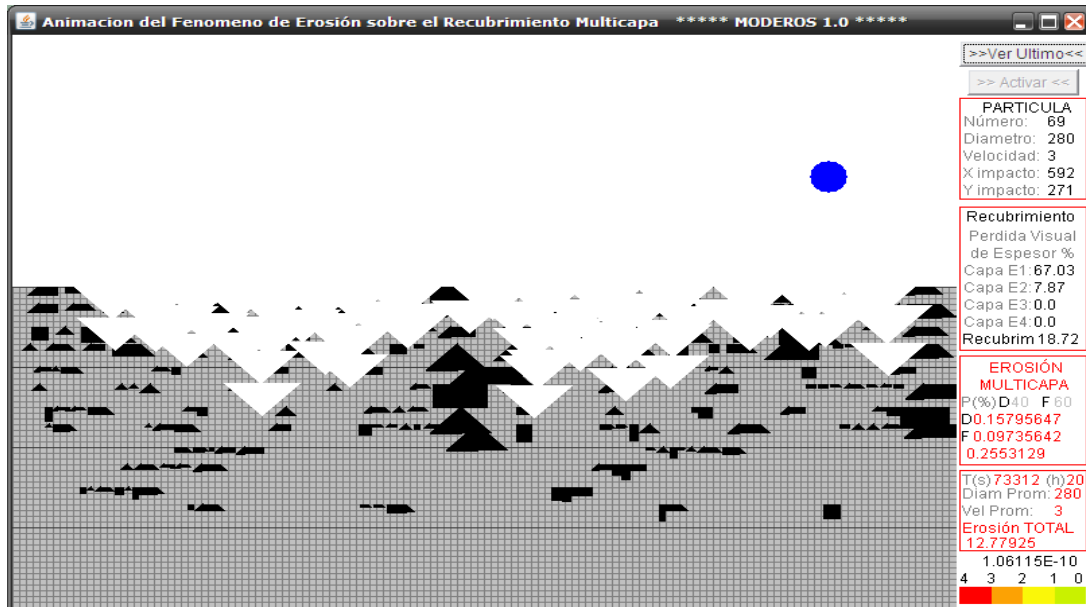
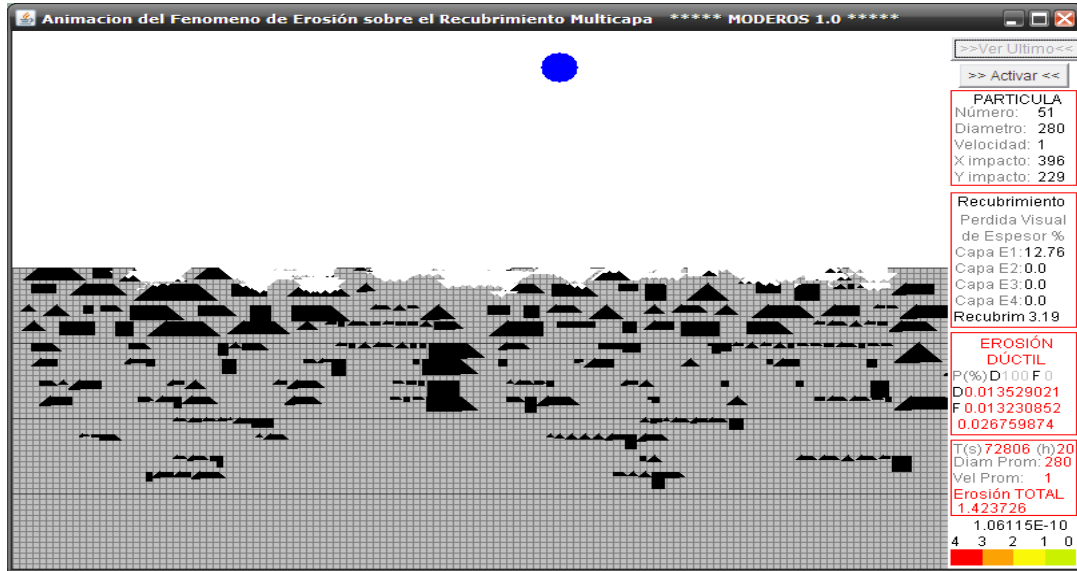
Además, se observó que los valores obtenidos para diámetros de [280-600] μm son relativamente cercanos, lo que indica que existe una tendencia pasiva de la erosión debido a que el choque de la partícula sobre la superficie del recubrimiento es multicapa y la erosión se presenta como un todo, es decir, se tiene en cuenta la probabilidad de impacto y la probabilidad del efecto erosivo que se produce tanto para sectores dúctiles y frágiles en la región de contacto al calcular la velocidad de erosión en ese choque.

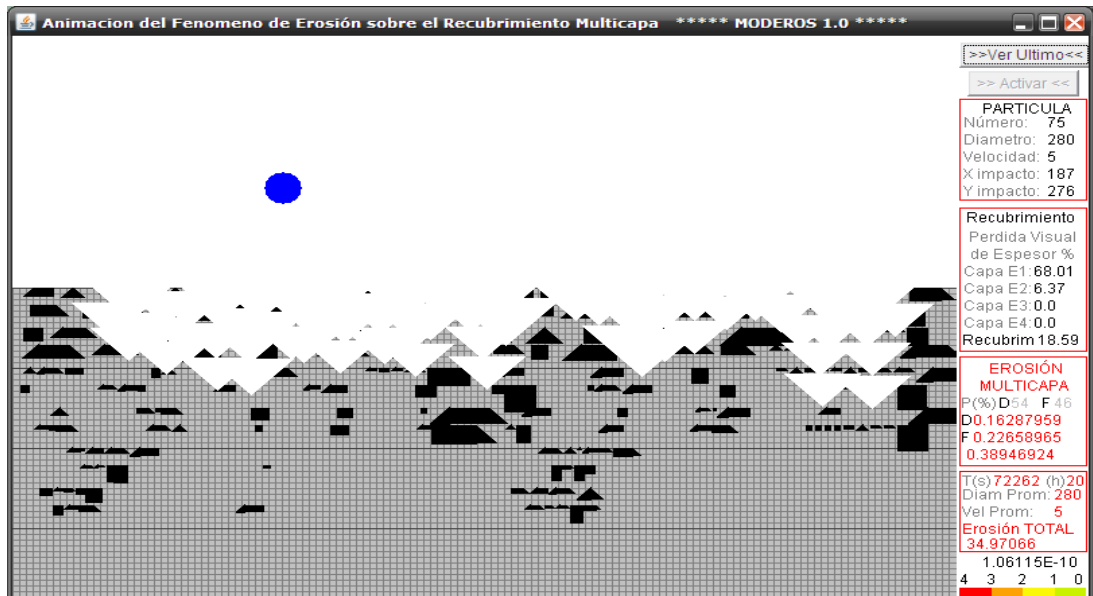
Anexo L. Efecto de un diámetro de partícula de 50 μm a velocidades de 1 M/S, 3 M/S Y 5 M/S en la erosión total acumulada después de 20 horas de exposición.



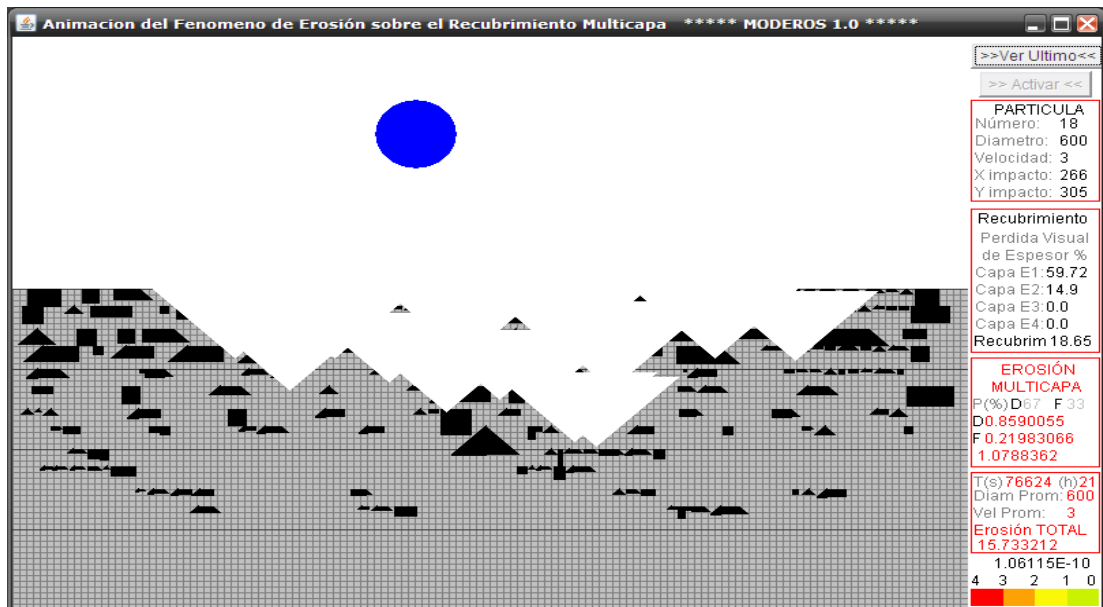
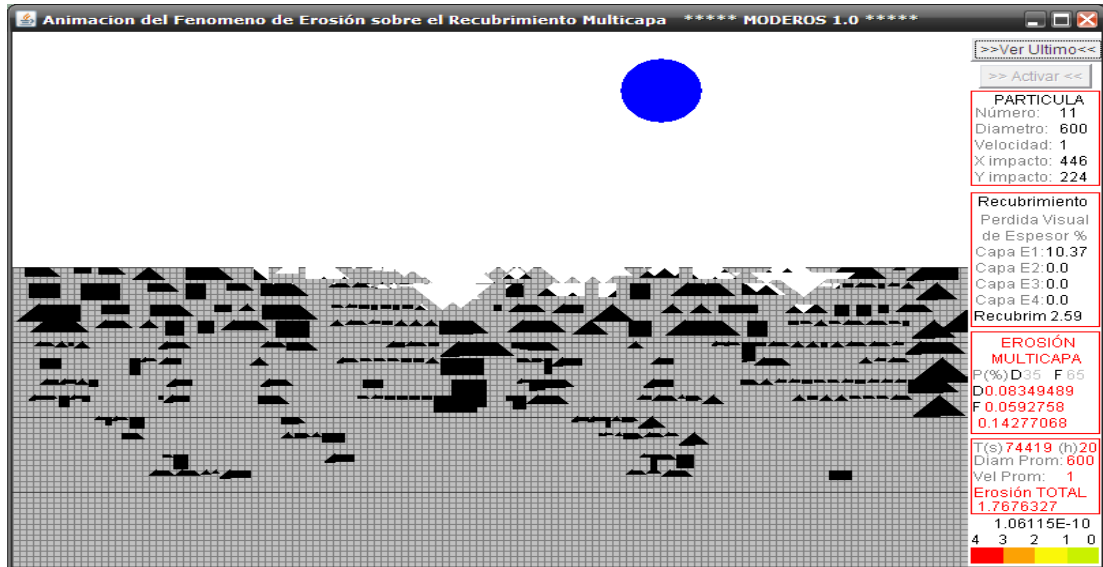


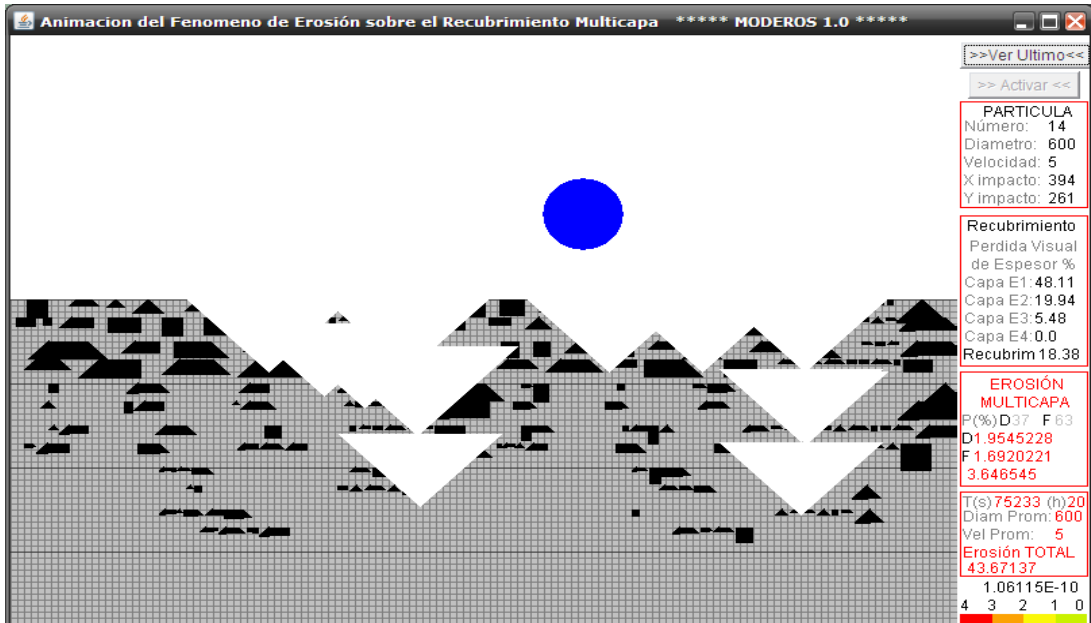
Anexo M. Efecto de un diámetro de partícula de 280 μm A velocidades de 1 m/s, 3 m/s y 5 m/s en la erosión total acumulada después de 20 horas de exposición.





Anexo N. Efecto de un diámetro de partícula de 600 μm a velocidades de 1 m/s, 3 m/s y 5 m/s en la erosión total acumulada después de 20 horas de exposición.





Anexo O. Encuesta para levantar requerimientos

Se tomo una muestra de 20 integrantes del semillero de investigación (líder uis, líder icp, asistente y auxiliares) y más adelante de muestran los resultados.

ENCUESTA PARA LA TOMA DE REQUERIMIENTOS DE DISEÑO FUNCIONAL Y DISEÑO VISUAL DE LA APLICACIÓN SOFTWARE MODEROS 1.0

Nombres y Apellidos: _____

Nombre de la Carrera: _____ Nro. Semestre: _____

Rol dentro del Grupo: Beca Docente UIS
 Asistente Profesional ICP

Se ha considerado varios parámetros de estudio que serán analizados estadísticamente, de manera que se pueda obtener un perfil de la aplicación BETA que los usuarios utilizaran (integrantes del semillero de investigación y grupo de investigación en corrosión).

Para cada pregunta se indica la cantidad de respuestas posibles (1Rta) (2Rtas) (Varias Rtas), encierre la respuesta escogida.

1. Como prefiere ingresar los datos en la aplicación (1Rta):
Manual (cajas de texto).
Automática (selección en una lista).
2. En el momento de ingresar datos, lo realiza (1Rta):
Deficientemente. c) Dudoso.
Eficientemente. d) Seguro.
3. Cuando ingresas los datos, escoge la forma que mas utilizas (Varias Rtas):
Cajas de texto.
Selección de varias opciones no enlistadas.
Selección en una lista.
4. Para trabajar en algún proceso específico, le gusta (1Rta):
5. En el momento de obtener los resultados de algún procedimiento en particular, como prefiere que estos sean mostrados (Varias Rtas):
Tablas. d) Graficas.
Imágenes, dibujos. e) Cajas de texto.
c) Archivos externos para impresión.
6. Si utilizas tablas para mostrar la información resultante, como prefieres que estén organizadas (2 Rtas):
Columnas CON nombre.
Columnas SIN nombre.
Valores en la tabla Resaltados.
Valores en la tabla SIN Resaltar.
7. Imprime la información obtenida con que continuidad (1 Rta):

Utilizar otra ventana.

Utilizar la ventana inicial de la aplicación.

8. Escoge el tipo de preferencia al utilizar gráficas (1 Rta):

Baja. c) Alta.

Media. d) Nula.

9. Como prefiere que este etiquetada una gráfica al instante de mostrar los resultados (2 Rtas):

Ejes marcados. c) CON colores.

Ejes NO marcados. d) SIN colores.

10. Las graficas que se obtienen, las prefiere (1 Rta):

En la ventana inicial de la aplicación.

En una ventana diferente a la ventana inicial de la aplicación.

No mostrar.

11. Qué nivel de influencia existe al utilizar colores y tipos de letras más llamativos (1 Rta):

Baja. c) Alta.

Media. d) Nula.

12. Para cada elemento de la aplicación , que preferencias tienes de color al momento de utilizarla (Varias Rtas):

Ventanas: _____ y _____.

Baja. c) Alta.

Media. d) Nunca.

13. El tamaño de las ventanas de la aplicación es (1 Rta):

Poco significativo.

Muy significativo.

Nada significativo.

14. Si considera el tamaño de la ventana un factor significativo, brindándole comodidad y agrado al instante de utilizar la aplicación software, que tamaño le parece más adecuado(1 Rta):

Medio.

Grande.

Completo.

15. Cuando trabajas con una herramienta computarizada, consideras útil la implementación de algún tipo de seguridad a la hora de trabajar en ella (1 Rta):

SI.

NO.

16. Qué cantidad de usuarios le parece más apropiada para utilizar la aplicación (1 Rta):

1 Usuario (CON clave de acceso).

2 Usuarios (CON clave de acceso).

Letras Titulo: _____ y _____.

Cualquier usuario (SIN clave de acceso).

Letras Contenido: _____ y _____.

Botones: _____ y _____.

Tablas: _____ y _____.

Graficas: _____ y _____.

Mensajes: _____ y _____.

PREGUNTA	NOMBRE	Opción 1	Opción 2
1	Ingreso Datos	(a) Manual (50%)	(b) Automatica (50%)
2	Confianza Ingreso	(b) Eficiente (31%)	(d) Seguro (56%)
3	Forma Ingreso	(a) Cajas de Texto (36%)	(c) Listas (45%)
4	Ver Procesos	(a) Otra Ventana (68%)	(b) Ventana inicial (32%)
5	Ver Resultados	(a) Tablas (27%)	(d) Graficas (42%)
6	Organizar Tablas	(a) Columnas con Nombre (53%)	(c) Valores Resaltados (38%)
7	Impresión Datos	(b) Media (12%)	(c) Alta (68%)
8	Preferencia Graficas	(b) Media (50%)	(c) Alta (43%)
9	Etiquetar Graficas	(a) Ejes marcados (53%)	(c) Con colores (35%)
10	Ver Graficas	(a) Ventana Inicial (12%)	(b) Ventana Diferente (88%)
11	Influencia Color	(b) Media (32%)	(c) Alta (69%)
13	InfluenciaTamaño Ventanas	(b) Muy Significativo (100%)	
14	Tamaño de Ventanas	(a) Medio (50%)	(b) Grande (31%)
15	Seguridad Uso	(a) Si (81%)	(b) No (19%)
16	Cantidad Usuarios	(b) 2 Usuarios con clave (31%)	(C) Cualquier Usuario sin clave (44%)

	azul	blanco	rojo	verde	negro	amarillo	gris	naranja	marron
ventanas	9	7	0	2	2	1	4	1	0
letra titulo	2	3	2	3	6	1	1	0	0
letra contenido	4	3	1	1	9	0	2	0	0
botones	1	1	6	5	1	1	2	1	1
tablas	3	3	2	4	4	0	3	0	0
graficas	3	4	2	4	4	2	2	1	0
mensajes	1	3	4	3	2	2	1	1	0

Anexo P. Artículo sobre modelo matemático implementado en el trabajo de investigación del simulador.

SIMULACIÓN DE LA EROSIÓN DE PARTICULAS SOLIDAS EN UN RECUBRIMIENTO MULTICAPA USADO EN INDUSTRIAS GENERADORAS DE ENERGIA

CARLOS EUSEBIO LAGUADO FERNÁNDEZ

Miembro del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica GIIB

Grupo de Investigación en Corrosión GIC

Universidad Industrial de Santander

COLOMBIA

carlos55laguado1@gmail.com

MPE. HENRY ARGUELLO FUENTES

Profesor Asistente Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática

Director del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica GIIB

Universidad Industrial de Santander

COLOMBIA

henarfu@uis.edu.co

Ph.D DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS

Profesor Titular Escuela de Ingeniería de Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Director del Grupo de Investigación en Corrosión GIC

Universidad Industrial de Santander

COLOMBIA

dypena@uis.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se realiza la descripción del fenómeno de erosión en un recubrimiento multicapas de fase dúctil y fase frágil, expuesto a impactos sucesivos de partículas sólidas. Mediante simulación numérica se representó el fenómeno de la erosión y se mostraron los resultados por medio de una animación, tablas y gráficas en la cual se visualizó en tiempo real los diferentes perfiles de espesor que se van formando en un recubrimiento. Además, se creó un escenario de simulación en el que se genera un nuevo recubrimiento con distribución aleatoria de granos de refuerzo WC (Carburo Wolframio ó Carburo Tungsteno) con características diferentes para cada simulación. La simulación permitió al Ingeniero Metalúrgico encargado de crear el recubrimiento, obtener información del mismo y dar una idea de qué tipo de distribución inicial debía tener este con las concentraciones de porcentaje de WC. A su vez permitió al Ingeniero Metalúrgico observar cómo fue la tendencia de deterioro de este material multicapas a medida que el tiempo de exposición se incrementó.

PALABRAS CLAVES: Simulación, Fenómeno de Erosión, Modelo Base Ajustado, Recubrimiento Multicapas.

ABSTRACT

In this paper it is described the phenomenon of erosion in a multi-layer coating of ductile and brittle phase when exposed to successive impacts of solid particles. By numerical simulation was performed on erosion phenomenon and results were shown by means of an animation, tables and in the graphics the different profile of thickness that get formed in the coating are visualized in real time. Moreover, a scene of simulation can be created in which a new coating with distribution of reinforcement grains WC (Wolframio Carbide or Tungsten Carbide) with different characteristics for each simulation is generated. The simulation allowed the metallurgical engineer, in charge of

creating the coating, to obtain information about it and give an idea of what kind of initial distribution the coating was to have with the concentrations of %WC. At the same time it allowed the metallurgical engineer to observe the deterioration tendency this multi-layer material will have as the time of exposure increases.

KEY WORDS: simulation, phenomenon of erosion, adjusted base model, multi-layer coating.