

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Diseño Mecánico

Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

Selección de materiales mediante métodos multicriterio (MCDM) aplicado a la parte lateral de una estructura autoportante para vehículos livianos, verificación mediante simulación FEM.

Rodger Benjamín Salazar Loor

Nota del autor

Rodger Benjamín Salazar Loor, Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.

Director: Ing. Javier Martínez, PH.D.

Codirector: M.sc. Juan Carlos Rocha

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

rsalazar.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, Rodger Benjamín Salazar Loor, con cédula de identidad 0925787749, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

RODGER BENJAMÍN SALAZAR LOOR
CI: 0925787749

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	2
ESTADO DEL ARTE.....	3
Estructura autoportante	3
Comportamiento estructural lateral durante colisión	4
Materiales automotrices usados en la estructura autoportante.....	6
Acero.....	6
Aceros de estampación y alta resistencia	8
Aceros de alta resistencia.....	8
Aceros Bake-Hardening.....	9
Aceros Refosforado	9
Aceros Microaleados	10
Aceros IF.....	10
Aceros de muy alta resistencia.....	10
Aceros de fase doble	11
Acero de fase compleja.....	11
Aceros TRIP.....	12
Aceros ultrarresistentes	13
Aceros Martensítico	13
Aceros al boro	14
Selección de materiales.....	14
Software de Selección CES Edupack	15
Diagrama de Pareto.....	16

SELECCIÓN DE MATERIALES CON MCDM APLICADO ESTRUCTURA LATERAL

Método Multicriterio (MCDM)	17
Métodos de Ponderación.....	19
Métodos Subjetivos.....	20
Métodos Objetivos	20
Método de entropía	21
Ventajas.....	24
Desventajas	25
Método CRITIC (The CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation: Importancia de criterios a través de la correlación entre criterios)	25
Ventajas de método CRITIC.....	28
Desventajas de método CRITIC	28
Método de Pesos medios.....	29
Método de Desviación estándar	29
Método de Variación estadística.....	30
TOPSIS	32
COPRAS	35
PROMETHEE II.....	39
VIKOR.....	41
Simulación 3D	42
MÉTODO	44
Tipo de investigación.....	44
Método	45
Metodología	45
Selección de Materiales Candidatos	47
Desarrollo de métodos multicriterios.....	51

SELECCIÓN DE MATERIALES CON MCDM APLICADO ESTRUCTURA LATERAL

Simulación dinámica de estructura lateral	94
Resultados obtenidos	106
Análisis Multicriterio	106
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	125
CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES	128

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Estructura autoportante del vehículo.	3
Figura 2. Resultado de la colisión en zona central.....	5
Figura 3. Deformación banana.....	5
Figura 4. Tipos de acero usados en automóviles en vehículo AUDI.....	7
Figura 5. Clases de aceros usados para la fabricación de carrocerías.....	7
Figura 6. Combinación de aceros de alta resistencia.	8
Figura 7. Capo fabricado en acero Bake Hardening.	9
Figura 8. Travesaño de parachoques fabricado en acero de Fase Doble.	11
Figura 9. Barra de refuerzo lateral fabricada en acero de Fase compleja 1000.	12
Figura 10. Pilar B fabricado en acero TRIP.....	12
Figura 11. Acero de ultra resistencia en Pilar B.	13
Figura 12. Bases de datos disponibles en CES Edupack	16
Figura 13. Curva de Optimización de Pareto.....	17
Figura 14. Matriz de decisión empleadas en MCDM.....	18
Figura 15. Pasos para implementación de Análisis Multicriterio.	19
Figura 16. Demostración de puntos de referencia ideales y anti-ideales.	32
Figura 17. Procedimiento de prueba de choque lateral y escala de colores para el conductor	43
Figura 18. Simulación computacional del ensayo de impacto lateral a escala real.	44
Figura 19. Desarrollo de la metodología.....	46
Figura 20. Límites fijados para la selección de materiales.	49
Figura 21. Aplicación de Pareto en selección de materiales.....	50
Figura 22. Proceso de recubrimiento mediante operaciones de superficie.	95
Figura 23. Modelo 3D para la barrera deformable.	95

SELECCIÓN DE MATERIALES CON MCDM APLICADO ESTRUCTURA LATERAL

Figura 24. Módulo de Explicit Dynamics	96
Figura 25. Modelos tridimensionales cargados en el entorno de simulación de Ansys.	97
Figura 26. Restricción de elementos en zonas de menor afectación al impacto.....	98
Figura 27. Definición de parámetro de control – velocidad:50 km/h	98
Figura 28. Mallado de modelos 3D.....	99
Figura 29. Deformaciones obtenidas en sección lateral (acero de baja aleación 8650)	99
Figura 30. Esfuerzos obtenidos en sección lateral (acero de baja aleación 8650).....	100
Figura 31. Deformaciones obtenidas en sección lateral (acero de baja aleación 8740)	101
Figura 32. Esfuerzos obtenidos en sección lateral (acero de baja aleación 8740).....	102
Figura 33. Deformaciones obtenidas en sección lateral (Acero martensítico, de plasticidad inducida, de fase doble, de fase compleja)	105
Figura 34. Esfuerzos obtenidos en sección lateral (Acero martensítico, de plasticidad inducida, de fase doble, de fase compleja)	105
Figura 35 Comparación de resultados obtenidos mediante las ponderaciones.....	106
Figura 36. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando entropía	107
Figura 37. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando CRITIC	108
Figura 38. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando pesos medios...	108
Figura 39. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando varianza estándar	109
Figura 40. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando desviación estándar	109
Figura 41. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 50km/h.	111
Figura 42. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 50km/h.	111

SELECCIÓN DE MATERIALES CON MCDM APLICADO ESTRUCTURA LATERAL

Figura 43. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 50km/h.	112
Figura 44. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 50km/h.	112
Figura 45. Deformación total de segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 50km/h.....	113
Figura 46. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 50km/h.....	113
Figura 47. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 55km/h.	114
Figura 48. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 55km/h.	114
Figura 49. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 55km/h.	115
Figura 50. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 55km/h.	115
Figura 51. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 55km/h.....	116
Figura 52. Deformación total de segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 55km/h.....	116

SELECCIÓN DE MATERIALES CON MCDM APLICADO ESTRUCTURA LATERAL

Figura 53. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 64km/h.	117
Figura 54. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 64km/h.	117
Figura 55. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 64km/h.	118
Figura 56. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 64km/h.	118
Figura 57. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 64km/h.....	119
Figura 58. Deformación total de segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 64km/h.....	119
Figura 59. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8650 a velocidad de 50 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.	120
Figura 60. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8740 a velocidad de 50 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.	120
Figura 61. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero martensítico a velocidad de 50 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.....	121
Figura 62. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8650 a velocidad de 55 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.	121

SELECCIÓN DE MATERIALES CON MCDM APLICADO ESTRUCTURA LATERAL

Figura 63. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8740 a velocidad de 55 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.	122
Figura 64. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero martensítico a velocidad de 55 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.....	122
Figura 65. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8650 a velocidad de 64 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.	123
Figura 66. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8740 a velocidad de 64 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.	123
Figura 67. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero martensítico a velocidad de 64 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.....	124

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Importancia relativa para criterios	47
Tabla 2. Materiales candidatos obtenidos en CES Edupack.....	51
Tabla 3. Criterios asignados a cada material	51
Tabla 4. Matriz estándar de decisión empleada	52
Tabla 5. Pesos obtenidos mediante entropía	56
Tabla 6. Pesos obtenidos mediante método CRITIC	61
Tabla 7. Pesos obtenidos mediante pesos medios.....	62
Tabla 8. Pesos obtenidos mediante desviación estándar.....	64
Tabla 9. Pesos obtenidos mediante varianza.....	67
Tabla 10. Matriz normalizada de decisión (Topsis).....	69
Tabla 11. Matriz estandarizada de pesos obtenidos (Topsis)	70
Tabla 12. Solución ideal positivas y negativas	71
Tabla 13. Distancias entre soluciones positivas y negativas ideales	74
Tabla 14. Proximidad relativa a solución ideal y ranking (Topsis)	75
Tabla 15. Matriz normalizada de decisión (Copras).....	76
Tabla 16. Matriz estandarizada de pesos obtenidos (CRITIC)	77
Tabla 17. Sumatoria de pesos obtenidos de criterios beneficiosos y no beneficiosos	79
Tabla 18. Prioridades relativas de cada alternativa.....	80
Tabla 19. Proximidad relativa a solución ideal y ranking	80
Tabla 20. Ranking PROMETHEE	89
Tabla 21. Ranking (VIKOR).....	94
Tabla 22. Propiedades del acero de baja aleación 8650 Fuente: Autor	97
Tabla 23. Propiedades del acero de baja aleación 8740.....	101
Tabla 24. Propiedades del acero Martensítico YS1200	103

SELECCIÓN DE MATERIALES CON MCDM APLICADO ESTRUCTURA LATERAL

Tabla 25. Propiedades del acero de plasticidad inducida YS500	103
Tabla 26. Propiedades del acero de fase doble YS600	104
Tabla 27. Propiedades del acero fase compleja YS800	104
Tabla 28. Porcentaje de aceptación para cada material en función de los Métodos	
Multicriterio	110

RESUMEN

La presente investigación establece la aplicación de métodos de análisis multicriterios para seleccionar el material más apropiado para los segmentos estructurales laterales de vehículos livianos, de manera que se pueda determinar el potencial que tienen estos elementos en la fabricación de la carrocería de automóviles. Debido a la numerosa cantidad de accidentes que acontecen en nuestro País y la cantidad de heridos, lesionados y fallecidos, nace la necesidad de evaluar las condiciones de impacto que reciben los vehículos durante una colisión. Se aplican cuatro métodos de análisis multicriterio (TOPSIS, COPRAS, VIKOR, PROMETHEE II) a materiales candidatos, donde se evalúan diferentes criterios de optimización para determinar el rendimiento de cada uno de ellos, y establecer cuál es el más apropiado para soportar condiciones de impacto y deformación, obteniéndose que el acero martensítico YS1200 es la mejor opción. Luego se procede a realizar una simulación de impacto de un modelo 3D que corresponde a la sección lateral de la estructura del vehículo con una barrera deformable a 50 km/h según la norma IIHS, que provoca la intrusión de un elemento cuadrangular sobre el pilar central afectando a los elementos adyacentes a este. Se obtiene que para los materiales empleados la deformación obtenida se encuentra entre 32 a 33 mm, mientras que la carga de impacto se mantiene en condiciones estable para los elementos transversales que se encuentran unidos al pilar central, siendo este el que recibe la mayor cantidad de esfuerzos.

Palabras clave: Métodos de análisis multicriterio, TOPSIS, COPRAS, PROMETHEE II, VIKOR, acero martensítico, acero de doble fase, acero de fase compleja, acero de plasticidad inducida, simulación computacional, Ansys.

ABSTRACT

The present investigation sets out the applicability of multi-criteria analysis methods to select the most appropriate material for the light-duty vehicle side structural segments, so that the potential of these elements in manufacture of body's car can be determined. Due to the large number's accidents that occur in our country and the number of injuries and deaths, it is necessary to evaluate the impact conditions that vehicles receive during a collision. Four multi-criteria analysis methods (TOPSIS, COPRAS, VIKOR, PROMETHEE II) are applied to candidate materials, where different optimization criteria are evaluated to determine the efficiency of each one of them, and to establish which is the most appropriate to withstand impact and deformation conditions, obtaining that the martensitic steel YS1200 is the best option. A 3D model corresponding to the side section of the structure with a deformable barrier at 50 km/h according to the IIHS standard is then simulated, which causes a quadrangular element to intrude on the central pillar, affecting the elements adjacent to it. It is obtained that for the materials used the deformation obtained is between 32 to 33 mm, while the impact load is maintained in stable conditions for the transversal elements that are attached to the central pillar, being this the one that receives the greatest amount of stress.

Keywords: Multicriteria analysis methods, TOPSIS, COPRAS, PROMETHEE II, VIKOR, martensitic steel, double phase steel, complex phase steel, induced plasticity steel, computational simulation, Ansys.

INTRODUCCIÓN

La estructura autoportante es una de las alternativas de diseño de chasis que se emplean con mayor frecuencia en el mercado en la actualidad, se encuentra constituida por una red de segmentos metálicos que se unen entre sí, estableciendo un conjunto de elementos de diferentes geometrías y grosores, haciéndolo resistente con capacidad de mantener cierto grado de rigidez, pero a su vez conservando su elasticidad (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, Elementos estructurales del vehículo, 2016).

El País actualmente se encuentra efectuando un cambio en su matriz productiva, que mantiene como tarea principal el reemplazo de las importaciones por la fabricación de productos que cumplan con las normas y reglamentos establecidos en el Ecuador, de manera que puedan realizarse su comercialización a nivel nacional e internacional en un corto plazo (Blas & David, 2017).

Una estructura autoportante tiene como función el reducir la concentración de esfuerzos provocados durante el comportamiento de la conducción (recorrido de curvas, desaceleración, aceleración, factores aerodinámicos), al mismo tiempo de absorber la cantidad de energía producida durante la deformación en un accidente (Viñas, 2014). Como resultado de un choque, la carrocería se deforma formando “zonas de deformación” programadas para contraerse sobre su superficie, proveyendo de esta manera un mayor tiempo extendido de deceleración y disipación de energía, garantizando la integridad de los ocupantes del vehículo (Kershaw & VanGelder, 2018).

Los materiales más empleados por los fabricantes de automóviles para la carrocería, son el acero y el aluminio, esto en vista de las propiedades de resistencia y ligereza respectivamente. Empero, el empleo primario de un material puede provocar cierto desequilibrio en la funcionalidad del mismo, dificultando llegar hacia esta meta. Por esto en la se emplean diversas aleaciones y combinaciones, consiguiendo opciones interesantes para un diseño

eficaz, barato y configurable para el vehículo. Haciendo referencia a estos los aceros que poseen un bajo contenido de aleación brindan una resistencia alta, así como las aleaciones al aluminio con base de magnesio.

El diseño paramétrico CAD debido a su alto grado de flexibilidad, brinda la posibilidad de definir diferentes soluciones para la configuración de los elementos estructurales, la optimización de las superficies generadas puede definirse mediante diferentes parámetros, tal como en tamaño y forma de la sección tubular, longitud de sección y suavizado de aristas. Mientras que la simulación FEM, permite desarrollar un modelo funcional con características similares a una aplicación real, basado en propiedades físicas y condiciones de control definidas en el modelo 3D (Fiebig, 2014).

JUSTIFICACIÓN

La elección de materiales adecuados para la manufactura y fabricación de un producto es una parte integral en el éxito y aceptación de un concepto en nuestro medio. La utilización de materiales inadecuados implicaría la desaprobación y desestimación de un producto terminado, además de afectar en gran manera la productividad, rentabilidad y prestigio de la organización encargada de su desarrollo.

En la actualidad en Ecuador con el cambio de la matriz productiva, se está incentivando a la inclusión del producto nacional en las diferentes etapas de procesos y diseño de productos. Un área de oportunidad es la manufactura y fabricación de vehículos, en el país este proceso se aplica casi exclusivamente al sector de fabricación de buses, sin embargo, no se efectúa para la fabricación de vehículos livianos, estos son ensamblados parte por parte, las cuales son importadas del extranjero.

La seguridad es un atributo indispensable que debe permanecer presente en cada uno de los componentes de un vehículo, es por ello que hoy en día las empresas automotrices

dedican gran parte de sus esfuerzos en el diseño y fabricación de dichos componentes que de una u otra forma garantizan la calidad de los automotores y bienestar de sus usuarios. Según las estadísticas de la ANT, alrededor del 30% de los siniestros son causados por choques laterales, manteniendo el primer lugar sobre otros siniestros.

En la presente investigación se pretende establecer la selección adecuada de materiales para la parte lateral de una estructura autoportante para un vehículo liviano, teniendo en consideración los requerimientos de diseño, materiales y procesos implicados. De manera que se establezcan los parámetros y criterios necesarios para conservar la integridad y seguridad de los ocupantes del vehículo, determinando el potencial de aplicación en el País.

ESTADO DEL ARTE

Estructura autoportante

Es un diseño de carrocería, está conformado mediante secciones que, propiciamente juntadas, forman un resistente conjunto, sobre el cual se ubican elementos de refuerzo para mantener la adhesión de varios componentes del vehículo (Pons, 1999). En este tipo de configuración la chapa externa del vehículo se encarga de soportar parte o toda la carga estructural del vehículo (Cabria, 2016), esta configuración de elementos en la figura 1, se puede observar.

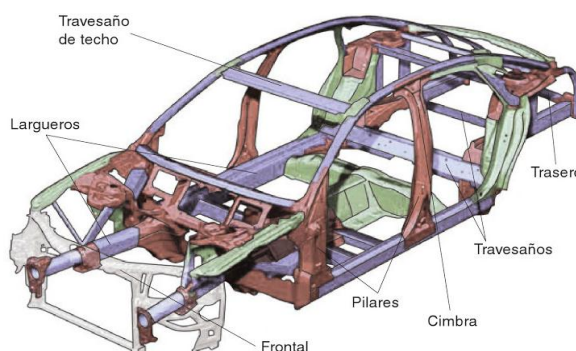


Figura 1. Estructura autoportante del vehículo.

Fuente: (Vidal, Mas, & Gonzalez, 2013)

Durante un choque estos elementos estructurales se encargan de reducir el impacto que sufren el conductor y pasajeros, con un vehículo u otro vehículo. Al producirse un accidente, los ocupantes del coche reciben gran cantidad de energía cinética que se produce de la deceleración, provocando graves consecuencias en la mayor cantidad de casos (Granell, 2016).

Comportamiento estructural lateral durante colisión

La carrocería, durante una colisión, debe de operar colectivamente con un conjunto de protocolos de resguardo, reduciendo en forma mínima las posibilidades de producir daños a los ocupantes. Eso involucra que su fabricación debe contar con materiales estructurales cuidadosamente seleccionados capaces de absorber exactamente la cantidad de energía necesaria y controlar la deformación, ni más ni menos de lo necesario para establecer un resguardo adecuado del cuerpo y extremidades de los ocupantes (Viñas, 2014).

Debido a la configuración en la zona lateral de una estructura autoportante, se debe considerar en gran manera el grado de peligrosidad de los pasajeros durante un accidente, en vista de que la posición del impacto esta próxima a los ocupantes el riesgo de sufrir daños es sumamente alto. En el momento de una colisión breve, los elementos que reciben el impacto son aquellos que cubren la estructura y demás componentes plásticos como el retrovisor, mientras que, en una colisión grave, los mencionados anteriormente, así como los elementos estructurales de la carrocería y elementos mecánicos del vehículo (Artiga, 2013), en la figura 2 se aprecia el resultado de un impacto lateral.



Figura 2. Resultado de la colisión en zona central.

Fuente: (Artiga, 2013)

En una colisión lateral, los daños indirectos pueden deberse a fuerzas colaterales generadas como consecuencia del impacto o bien como resultado de la energía producida por una colisión frontal o trasera. Cuando un vehículo recibe un impacto en la zona del pilar central, las partes delantera y trasera se trasladan en una trayectoria similar, no obstante en se mantiene contrario a la fuerza de impacto, dando como resultado el desalineamiento del eje central del vehículo y la disminución de la longitud total del coche (Artiga, 2013).

La deformación del vehículo afecta a componentes como puertas, pilares, montantes, costado y piso provocando el hundimiento de estos, la silueta obtenida después del siniestro se denomina “deformación banana”, tal como se muestra en la figura 3, que se debe a que la deformación alcanzada tiene un gran parecido a la fruta (Viñas, 2014).

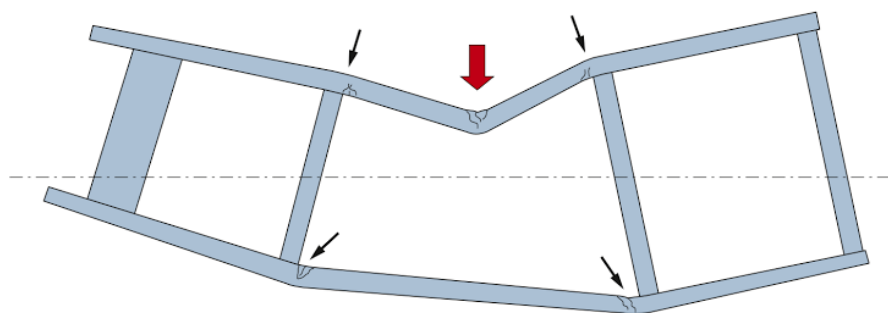


Figura 3. Deformación banana.

Fuente: (Viñas, 2014)

Materiales automotrices usados en la estructura autoportante

El estudio del diseño empleando materiales utilizados para la construcción de carrocerías se encuentra en un proceso de investigación constante, con el objetivo de contribuir a la reducción del peso de los elementos del vehículo, así como del consumo y uso de combustibles y el desprendimiento de CO₂ a la atmósfera, garantizando en todo momento la resistencia y capacidad de absorción de energía de una carrocería (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2010)

En la zona lateral, se emplean aceros de alta resistencia tanto en la estructura como en los refuerzos de las puertas. Además, se utilizan técnicas de fabricación en las que elementos como el pilar central constan de diferentes espesores para aumentar su resistencia en caso de colisión (Artiga, 2013).

Acero

El acero proviene de un conjunto aleado entre hierro-carbono, entre una composición de carbono del 0,04 hasta un 2,25%. En función de su composición, pueden distinguirse el acero al carbono, el cual tiene una particularidad en su comportamiento, se mantiene maleable si el porcentaje de carbono se encuentra por debajo al 0,2% y, más duro, pero menos maleable si su porcentaje de carbono es superior (Viñas, 2014).

El diseño de las carrocerías ha cambiado con el paso de los años, llegando al punto en el que el empleo de aceros especiales, puedan garantizar un alto rendimiento en la capacidad de los elementos estructurales, minimizando el impacto provocado sobre los ocupantes (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016). Debido a la gran diversidad de materiales de aceros empleados para la manufactura de carrocerías para automóviles, es produciente clasificarlos mediante diferentes categorías, utilizando para ello factores como el valor del límite rotura, de elasticidad, factores de carácter mecánico o la deformación que

experimentan sobre sí mismos (Viñas, 2014). Tal como se indica en la figura 4 se observan diferentes variedades de aceros utilizados en la fabricación de automóviles en la industria.

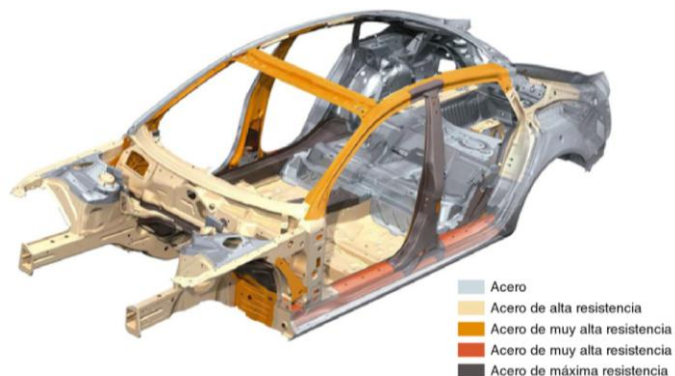


Figura 4. Tipos de acero usados en automóviles en vehículo AUDI.

Fuente: (Viñas, 2014)

En la tabla 1 se indican cada una de las variantes y alternativas de aceros, empleados en la industria automotriz.

Figura 5. Clases de aceros usados para la fabricación de carrocerías

Tipo de acero		Acero	Límite elástico (Mpa)
Para estampación	Aceros convencionales de conformación en frío		< 230
	Aceros convencionales laminados en caliente y decapados		< 250
De alta resistencia	Aceros de alta resistencia HSS (High Strength Steel). Aceros de alta resistencia y baja aleación HSLA (High Strength Low Alloy).	Bake Hardening (BH)	160 ... 300
		Refosforado (RP)	> 220
		Aceros (IF)	> 220
		Microaleado (HSLA)	> 350
De muy alta resistencia	Aceros avanzados de alta resistencia AHSS (Advanced High Strength Steel). Aceros de muy alta resistencia VHSS (Very High Strength Steel) Aceros de extra alta resistencia EHSS (Extra High Strength Steel)	Doble fase (DP)	500 ... 600
		Plasticidad inducida por transformación (TRIP)	600 ... 800
		Fase compleja (CP)	800 ... 1000
De ultra alta resistencia	Aceros de ultra alta resistencia UHSS - THLE (Ultra High Strength Steel). Aceros ultrarresistentes de baja aleación UHSLA (Ultra High Strength Low Alloy)	Martensíticos (MS)	1000 ... 1300
		Acero al boro (Bor)	> 1250

Fuente: (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016)

Aceros de estampación y alta resistencia

Entre los aceros de estampación existen dos procesos: la estampación en frío y en caliente. Los procesos de estampado mediante frío brindan la alternativa de emplear materiales que posean una alta resistencia y poder obtener optimizaciones en la minimización del peso de los segmentos estructurales del vehículo. Esto tiene precedentes en especial para elementos de la carrocería, en donde las exigencias de las tolerancias geométricas y resistencia propia del material son mayores. Mientras tanto, la estampación en caliente es un proceso innovador a través del cual se moldean los aceros ultrarresistentes en formas complejas, de una forma más eficiente que con la estampación convencional en frío (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016)

Aceros de alta resistencia

Estos aceros presentan mayor contenido de calcio y pequeñas adiciones de manganeso, vanadio, zirconio, etc., estos resultan más baratos de producir que las aleaciones tradicionales, al contener menores proporciones de aleación con mayor coste. Entre sus objetivos se tienen el de desarrollar carrocerías más ligeras, manteniendo la consistencia del conjunto, así como reforzar zonas puntuales, con un 25% menos de espesor se duplica la resistencia a la deformación permanente en chapas de acero convencionales (Casado, Jimenez, Morales & Navarro, 2016).



Figura 6. Combinación de aceros de alta resistencia.

Fuente: (Artiga, 2013)

Aceros Bake-Hardening

Estos aceros se elaboran mediante tratamientos térmicos a una temperatura baja que se denomina Bake Hardening, que se realiza durante la cocci3n de la pintura. obteniendo un elevado límite elástico. Este acero es más difícil de conformar que el acero dulce debido a que su límite elástico es mayor y, por tanto, habrá que aplicar más fuerza, además que su soldabilidad es buena debido al bajo contenido en carbono.

La mayor ventaja de este acero es que debido al aumento de la tensión de rotura y límite elástico se puede reducir la sección o espesor de las piezas y, por tanto, el peso del vehículo. El acero BH se emplea tanto en piezas exteriores de la carrocería como en piezas estructurales, como pueden ser refuerzos, travesaños, chasis o bastidores o paneles interiores (Melchor, 2012).



***Figura 7.** Capo fabricado en acero Bake Hardening.*

Fuente: (Águeda, 2016)

Aceros Refosforado

Son aceros de alta resistencia, que se obtienen por medio de la adición de fósforo en un contenido mayor a 0,08% (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016). El endurecimiento se obtiene ante la aparición de fósforo en forma sólida como ferrita, estos tienen una elevada tensión de rotura y alto límite elástico. En los vehículos suelen emplearse en elementos de refuerzo sometidos a cargas por fatiga, travesaños, refuerzos para pilares, etc. (Melchor, 2012).

Aceros Microaleados

Se denominan a los aceros microaleados a aquellos aceros que presentan adición de diversos elementos en su composición, tal como, fósforo, silicio y magnesio con el fin de mejorar sus niveles de resistencia, además pueden añadirseles otros compuestos de cromo, vanadio, titanio, los cuales pueden mejorar el rango de dureza, notando un considerable cambio en sus propiedades con la adición de cantidades mínimas de estos componentes. Mientras que la utilización de aceros micro-aleados en reemplazo a aceros tradicionales para elementos de resistencia similar, se presenta una reducción en las secciones de chapa alrededor de un 25 % (Viñas, 2014).

Aceros IF

Son aceros que se están diseñados para obtener un excelente equilibrio entre la estimabilidad y la resistencia mecánica, esto debido a su estructura cristalina sin elementos intersticiales, generalmente se combinan bajos contenidos de carbono con elementos microaleantes, como el titanio, niobio, fosforo (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016). Generalmente se usan para la fabricación de piezas exteriores de la carrocería, así como estructurales, especialmente componentes del sistema de absorción de impactos.

Aceros de muy alta resistencia

Estos aceros conocidos como “multifases” parten de un acero convencional, el cual es sometido a procesos de transformación, generalmente un tratamiento térmico (temple, revenido, normalizado), lo que les permite conseguir una elevada resistencia (Casado, Jimenez, Morales & Navarro, 2016).

Aceros de fase doble

Están formados mediante una microestructura que se encuentra formada por una fase dura extendida en una matriz de ferrita dúctil. Poseen una elevada tensión de rotura, extraordinaria respuesta ante cargas por fatiga y una buena resistencia mecánica, permitiéndole que sea empleado en piezas estructurales que deben absorber energía (Melchor, 2012), tales como elementos de un nivel superior de resistencia estructural, en secciones como montantes, largueros, cimbras, etc. (Sanchez Gutierrez, 2012).



Figura 8. Travesaño de parachoques fabricado en acero de Fase Doble.

Fuente: (Casado, Jiménez, Morales & Navarro, 2016).

Acero de fase compleja

Estos aceros tienen una microestructura de austenita y vainita de grano fino gracias al contenido de niobio y titanio. Además, contienen manganeso, cromo, silicio, molibdeno y boro en pequeñas proporciones, y su contenido en carbono es menor del 0,2%. (Melchor, 2012). En vista de su elevada capacidad de absorber energía y superior resistencia a la deformación se emplean para fabricación de elementos que tengan como tarea impedir la entrada de elementos invasores en el habitáculo del vehículo, así como las zonas del motor y posterior (Sanchez Gutierrez, 2012).



Figura 9. Barra de refuerzo lateral fabricada en acero de Fase compleja 1000.

Fuente: (ArcelorMittal, 2014)

Aceros TRIP

Son aceros que poseen una buena capacidad de absorber energía y de resistencia ante cargas por fatiga, combinan una resistencia mecánica de 600 MPa con una excelente respuesta a la deformación (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2010). Son muy empleados para piezas de estructura de refuerzo de formas complejas, su buen equilibrio entre resistencia y ductilidad favorece en gran manera la distribución de las deformaciones sobre su superficie (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016)



Figura 10. Pilar B fabricado en acero TRIP

Fuente: (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016)

Aceros ultrarresistentes

Los aceros ultrarresistentes son utilizados para componentes que se encuentran sujetos a altos requisitos de integridad estructural dentro de la cabina de pasajeros (Elmarakbi, 2013), la utilización de esta clase de materiales admite la obtención de estructuras más eficientes, ofreciendo alternativas con mejores comportamientos y desenvolvimiento, así como respuesta segura contra impactos y ligereza (Casado, Jimenez, Morales, Gracia, & Navarro, 2016).



Figura 11. *Acero de ultra resistencia en Pilar B.*

Fuente: (Artiga, 2013)

Aceros Martensítico

Estos aceros poseen una microestructura martensítica que se obtiene al convertirse la austenita mediante tratamiento térmico (recocido), poseen una elevada tensión de rotura y límite elástico. Son los más duros pero frágiles y son poco dúctiles, esto debido a su elevada tensión de rotura, además son utilizados en piezas de la zona del habitáculo de las carrocerías de vehículos destinadas resistir choques, como pueden ser barras de protección de puertas, refuerzo de pilares, etc. (Melchor, 2012).

Aceros al boro

Son aceros que poseen una estructura martensítica obtenida mediante un tratamiento térmico, estos contienen una pequeña cantidad de boro junto con otros aleantes como magnesio y cromo (Melchor, 2012). Entre sus características se tiene poseen un alto grado de dureza, además de un alto límite elástico y reducido alargamiento, lo cual lo hace ideal para piezas estructurales del automóvil, se utiliza actualmente en piezas anti-intrusión, como son los pilares de refuerzo y transversales (Sanchez Gutierrez, 2012).

Selección de materiales

Dentro del proceso de selección de materiales existen diversas perspectivas del método más adecuado para seleccionar un material para una aplicación determinada, la experiencia personal de cada ingeniero o técnico encargado de esta labor influye en gran manera en la decisión y resultado final de la selección, sin embargo, en la actualidad con la enorme cantidad de posibles alternativas de materiales que se han desarrollado, la tarea se ha vuelto mucho más compleja y tediosa de realizar.

El primer inicio de este proceso, es el de definir los requerimientos y aplicabilidad del material mediante una serie de preguntas, tales como: ¿El material debe ser resistente? ¿Cuáles son los inconvenientes de usarlo? ¿Se le va a dar alguna forma? ¿Está involucrado algún proceso de unión?, etc. (Ashby M. F., 2011) al tener en consideración toda la información relevante se pueden establecer estrategias de selección eficientes y aceptables.

Una vez definido estos aspectos, se procede a crear una lista de alternativas de materiales que cumplan con las exigencias determinadas, esto se consigue mediante el respaldo de información técnica de manuales, informes, catálogos de proveedores, graficas, etc., los cuales permiten realizar una comparación entre cada una de sus propiedades y características.

No obstante, la evaluación de un número limitado de materiales puede no aprovechar el máximo potencial de beneficios de otros materiales que no se toman a consideración.

Mediante el desarrollo tecnológico en la actualidad se han creado bases de datos de todos los materiales existentes, así como de herramientas de comparación que facilitan la labor de selección por medio de instrucciones simples como delimitación y restricciones impuestas por la persona encargada del proceso de selección (Ashby M. F., 2012).

Software de Selección CES Edupack

CES Edupack es un software que agrupa un conjunto único de herramientas de aprendizaje para soporte de materiales en áreas de ingeniería, diseño, ciencia y desarrollo sustentable (Grantadesign, 2016). Este contiene una base de datos completa de materiales e información de procesos, así como poderosas herramientas y recursos de apoyo, como: libros de texto, conferencias, proyectos y ejercicios.

Posee diferentes categorías o niveles en su biblioteca de materiales, dependiendo del problema de selección que se esté tratando y las necesidades que se demanden, se puede elegir un grupo de material adecuados que cumplan con los requisitos admisibles de diseño. En la siguiente figura se muestran las bases disponibles en el software, contando con 2 grupos fundamentales: Introdutorios y Avanzados.

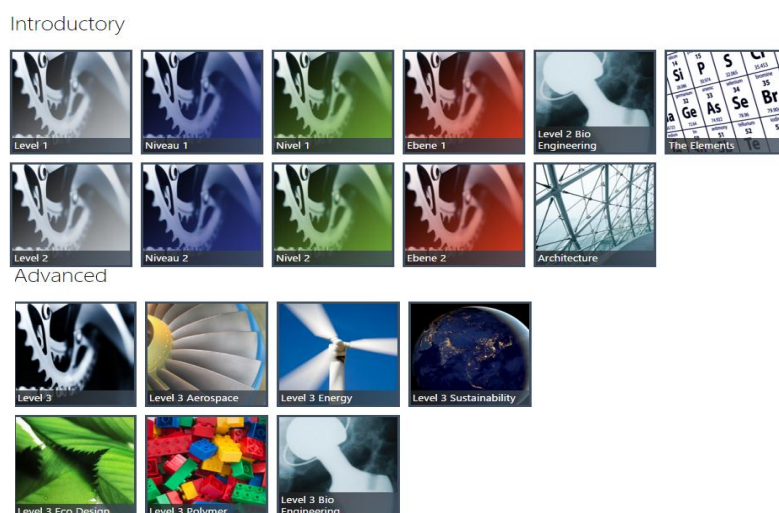


Figura 12. Bases de datos disponibles en CES Edupack

Fuente: (CES-EDUPACK, 2013)

Describiendo los más importantes se tienen los niveles 1 que contiene información clave de más de 60 materiales más utilizados con mayor frecuencia, sirve como introducción al mundo de los materiales para estudiantes, el nivel 2 contiene información relevante de más de 100 materiales y el nivel 3 que contiene más de 3900 materiales, incluyendo fibras y materiales particularizados, se pueden utilizar para el desarrollo de proyectos u diseños reales, contiene una gran lista de propiedades mecánicas, térmicas, ópticas, eléctricas, etc., además consta también de bases de datos para materiales aeroespaciales, polímeros usados en la industria, materiales amigables con el medio ambiente y biotecnología.

Diagrama de Pareto

Es una herramienta de optimización de valores en donde se pueden organizar y establecer de un conjunto de posibles soluciones en función de la maximización o minimización de parámetros. Esto ocurre dentro de un sistema cartesiano de dos coordenadas en donde existen múltiples valores de solución, se busca el valor más próximo a la intersección de estas dos coordenadas, al cual se le denominará “punto de utopía”, el cual representa la solución más eficiente al problema evaluado, como se muestra en la siguiente figura existen 5 alternativas

de solución, en la que la opción P3 es la más adecuada por ser la más cercana al punto de utopía.

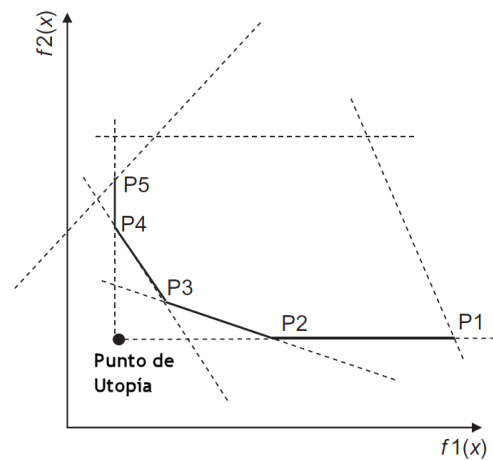


Figura 13. Curva de Optimización de Pareto.

Fuente: (Jahan, Edwards, & Bahraminasab, 2016)

Método Multicriterio (MCDM)

Los métodos multicriterio son un conjunto de estrategias de control de decisión que permiten identificar alternativas para la selección de soluciones, las cuales necesitan someterse a un proceso de evaluación y clasificación realizado por un gestor de decisiones un grupo encargado de tomar una decisión, estos valores son evaluados mediante una serie de procedimientos de medición y control, facilitando la tarea de clasificación de soluciones en relación de cada criterio que se ha ido empleando (Galarza Molina, 2011).

Un concepto más preciso y técnico del método multicriterio lo establece la Sociedad Internacional de análisis multicriterio para la toma de decisiones, definiéndolo como: un estudio de métodos y procedimientos por el cual múltiples y conflictivos de los criterios pueden ser incorporados en procesos de decisión (Zardari, 2014). El objetivo de estos métodos de análisis es ayudar en el proceso de toma de decisiones a tener en consideración todos los criterios objetivos y subjetivos del problema, mediante el uso de procesos explícitos, racionales y eficientes de decisión (Marbini & Tavana, 2010).

El desarrollo de estos métodos comienza primero con la identificación del problema, en donde se formulan preguntas como: ¿Cuáles son las variables a analizarse?, ¿cuáles son las alternativas a evaluarse?, ¿Cuáles son los objetivos o metas del estudio a realizarse?, es decir, determinar todos los factores importantes de estudio e información relevante para establecer cada uno de los indicadores, bajo los cuales se aplicará el análisis multicriterio.

Luego de esto, se agrupan todos los datos en forma de una matriz de decisión, distribuidos en forma de filas y columnas, posteriormente para poder evaluar cada criterio de manera apropiada se efectúa la normalización de la matriz, en donde se llevan estos valores a términos entre 0 y 1. Siguiendo a esto se procede a establecer valores numéricos que reflejan la importancia relativa de cada criterio, que influyen directamente sobre la matriz normalizada.

En la siguiente tabla puede observarse el diseño de la matriz, donde los valores de “C” son cada uno de los criterios considerados, “A” son las alternativas, “w” los pesos y “x” cada uno de los valores correspondientes a analizarse.

Figura 14. Matriz de decisión empleadas en MCDM

	w_1	w_2	$\dots$	w_n
	C_1	C_2	$\dots$	C_n
A_1	x_{11}	x_{12}	$\dots$	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	$\dots$	x_{2n}
A_3	x_{31}	x_{32}	$\dots$	x_{3n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
A_m	x_{m1}	x_{m2}	$\dots$	x_{mn}

Fuente: (Jahan, Edwards, & Bahraminasab, 2016)

Para la clasificación de los resultados se deben implementar un análisis compensatorio o no compensatorio, esto implica realizar métodos de agregación sobre cada indicador de manera conjunta o de manera individual respectivamente. Finalmente se debe realizar un análisis de sensibilidad, en el cual se examinan como la selección de pesos y datos

establecidos influyen sobre el resultado final y comparación entre diferentes clases de métodos.

En la figura 13 se detallan cada uno de los pasos a seguir para desarrollar un método multicriterio.

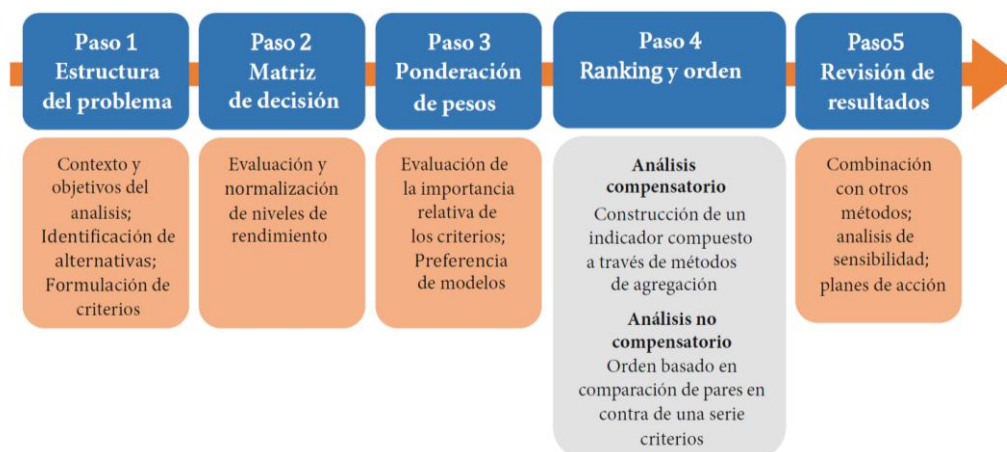


Figura 15. Pasos para implementación de Análisis Multicriterio.

Fuente: (Josselin & Maux, 2017)

Métodos de Ponderación

Las ponderaciones de criterios tienen un importante papel en la medición de valores de preferencia global de alternativas en diferentes modelos MCDM (Choo, Schoner, & Wedley, 1999), su principal propósito es el de asignar valores cuantitativos o cualitativos a varios criterios detallando la importancia individual dentro de un proceso de toma de decisiones, al mismo tiempo se debe considerar que las estimaciones obtenidas deben emplearse durante el desarrollo del método (Zardari, 2014).

Estos pueden ser categorizados en tres grupos: métodos objetivos, en el cual la asignación de la importancia de cada criterio depende completamente del juicio y experiencia del individuo encargado de evaluar cada alternativa; métodos subjetivos en el cual los valores de importancia son obtenidos mediante modelos matemáticos, sin necesidad de la intervención de la decisión humana; y métodos de combinación, que asocian los dos grupos anteriores.

Métodos Subjetivos

Los métodos subjetivos reflejan el juicio y criterio de decisión del interventor, por lo que los resultados analíticos de las alternativas se basan netamente en la habilidad, conocimiento y experiencia que tenga el encargado de esta tarea (Zardari, 2014). Se desarrolla el método mediante el establecimiento de rangos de valor cualitativos, que permiten establecer la prioridad y consideración que tendrá cada valor, un ejemplo puede ser (muy malo, malo, regular, bueno, muy bueno), al catalogarse cada uno de estos, es mucho más fácil determinar el grado de importancia que tendrán.

El método más empleado generalmente es el de ranking directo, el cual es una técnica que obtiene una escala de valores numéricos que pueden ser del 1-5, 1-7, 1-10, que se usan para especificar el grado de importancia de cada criterio o alternativa. Para una evaluación global en donde el criterio general influye en la decisión, se emplean herramientas como el uso de cuestionarios o encuestas, donde se puedan recopilar diferentes respuestas, y mediante el promedio de estas se puede asumir una ponderación acertada (Zardari, 2014).

Métodos Objetivos

En los métodos objetivos, las preferencias de decisión humana son descartadas y sustituidas por la aplicación de algoritmos o modelos matemáticos basados en el análisis de la información inicial (Wang, Jing, Zhang, & Zhao, 2009), se aplica de forma particular en casos de estudio en donde las variables a analizar son cuantificables, es decir ordenada en forma de valores o rangos numéricos.

Entre los métodos más populares se encuentran:

1. Método de entropía.
2. CRITIC.
3. Pesos medios.

4. Desviación estándar.
5. Procedimiento de varianza estándar.

Método de entropía

Al hablar de entropía se lo define como una valoración de imprecisión o vacío en la información analizada empleando conceptos estadísticos, esto manifiesta que empleando un amplio rango de datos involucraría un mayor grado de incertidumbre representados por valores máximos y mínimos en forma de cresta (Yilmaz & Harmancioglu, 2010).

En el trabajo de (Vatansever & Akgül, 2018) se detallan los pasos para la aplicación del método de entropía, a continuación se describen cada uno de estos:

1. Construcción de la matriz de decisión

Se construye una matriz de decisión (X). Un conjunto de alternativas ($A = \{A_i, i = 1, 2, \dots, n\}$) se comparan con respecto al conjunto de alternativas ($C = \{C_j, j = 1, 2, \dots, m\}$). Por lo tanto, una matriz de $n \times m$ puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

x_{mn} : pertenece a valores de la matriz de decisión.

2. Normalización de la matriz de decisión

Para obtener los pesos relativos por medición de la entropía, la matriz de decisión debe ser normalizada para cada criterio, mediante la siguiente ecuación:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

Donde:

p_{ij} : pertenece a valores de la matriz normalizada

m : pertenece al número de evaluaciones de los criterios.

La matriz normalizada se obtiene mediante los valores obtenidos.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. Cálculo de valor de entropía

Después de normalizar los valores correspondientes, se calcula el valor de la entropía.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

Donde:

$k = \frac{1}{\ln m}$: corresponde a un valor constante que establece que $0 \leq e_j \leq 1$

e_j : corresponde al valor de entropía

4. Cálculo del nivel de divergencia

Es el promedio de la información intrínseca contenida por cada criterio, se determina mediante la ecuación:

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

Donde:

d_j : es el grado de divergencia

5. Obtención de los pesos para criterio

Los pesos objetivos de cada atributo están dados por la siguiente ecuación:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (6)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

Mencionando algunos casos, se ha empleado para la obtención de pesos en la selección de equipos de aire acondicionado (Vujičić, Papić, & Blagojević, 2017), selección de materiales para la construcción puentes (Balali, Mottaghi, Shoghli, & Golabchi, 2014), selección de manzanas para procesamiento y extracción de jugo (Işık & Adalı, 2017), y para la selección de fibras naturales con refuerzos metálicos aplicados para el capó de los vehículos (Mohd Ishak, Dhar Malingam, & Mansor, 2017) en donde se consiguieron buenos resultados junto con la implementación de métodos MCDM.

Entre las ventajas y desventajas en la aplicación del método de entropía se tienen (Zardari, 2014):

Ventajas

- El método de entropía permite determinar los pesos relativos de manera simple y directa.
- Se ha comprobado que el enfoque de la entropía es suficientemente confiable para identificar tanto la intensidad y conflicto de los criterios, así como los pesos adecuados.
- En caso de no contar con toda la información disponible para su análisis, se recomienda buscar información adicional para complementar y optimizar la metodología de toma de decisiones.
- Permite una evaluación cuantitativa de los parámetros de eficiencia y beneficio/costo.
- El método de entropía para la determinación de pesos considera adecuadamente la información de los valores de todas las secciones de monitoreo provistas para equilibrar la relación entre los numerosos criterios a evaluar. Esto debilita el efecto negativo de algunos valores anormales y hace que el resultado de la evaluación sea más preciso y razonable.
- El método de entropía para la determinación del peso es un método muy eficaz para evaluar los indicadores.
- El método tradicional de entropía se centra en la discriminación entre los datos para determinar las ponderaciones de los atributos. Si un atributo puede discriminar los datos más eficazmente, se le da un mayor peso.
- Produce valores de coeficientes de divergencia para todos los criterios. Se considera que este fenómeno es, ya que puede resolver mejor el conflicto inherente entre los criterios incorporados en los problemas de decisión MCDM

Desventajas

- Su posible desventaja está relacionada con un adecuado dimensionamiento del problema, es decir, establecer que la matriz de decisión contenga un conjunto suficientemente grande de alternativas.
- No parece que bastaría con considerar las ponderaciones basadas únicamente en valores de entropía sin el juicio de expertos.
- Los pesos de los atributos determinados por el método del coeficiente de correlación y la desviación estándar son más completos y convincentes que los pesos de entropía. El primero considera no sólo la cantidad de información que contiene cada atributo, sino también el impacto de cada atributo en la toma de decisiones; mientras que el segundo no tiene en cuenta las relaciones mutuas entre atributos
- No permite considerar las preferencias de carácter y juicio humano.
- Para propósitos generales de técnicas MCDM, el método de entropía no es tan recomendado, se requieren otro tipo de metodologías.

Método CRITIC (The CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation: Importancia de criterios a través de la correlación entre criterios)

El método CRITIC indica que la importancia relativa de un indicador es superior en la metodología de toma de decisiones, por otro lado la correlación con otros indicadores es menor y su variación de por sí es mayor (Hwang, Lee, Tang, & Hsu, 2013). En otras palabras, el método usa el análisis de correlaciones para detectar diferencias entre criterios. Este método fue desarrollado por (Diakoulaki, Mavrotas, & Papayannakis, 1995).

1. Construcción de matriz de decisión

Se aplica las mismas condiciones que se emplean en el método CRITIC.

2. Normalización de matriz de decisión

Para la obtención de los pesos relativos por medición del método CRITIC, la matriz de decisión debe ser normalizada para cada criterio, donde la transformación surge del concepto de puntos ideales, es decir la interacción entre valores máximos y mínimos de un criterio con respecto a un elemento, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (7)$$

Donde:

p_{ij} : corresponde a los valores de la matriz normalizada

x_{ij}^{min} : corresponde al valor mínimo de un criterio evaluado.

x_{ij}^{max} : corresponde al valor máximo de un criterio evaluado.

La matriz normalizada se obtiene de los valores obtenidos.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdot & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & \cdot & p_{2j} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdot & p_{ij} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. Cálculo de la correlación entre criterios

Después de normalizar los valores correspondientes, se calcula el valor de la entropía.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)(p_{ik} - \bar{p}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2 \sum_{i=1}^m (p_{ik} - \bar{p}_k)^2}} \quad (9)$$

Donde:

$\bar{p}_j$: corresponde al valor promedio de un criterio evaluado.

$\bar{p}_k$: corresponde al valor k-ésimo de un criterio evaluado.

ρ_{jk} : corresponde al coeficiente de correlación

$$\rho_{jk} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \cdots & \rho_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

4. Cálculo de desviación estándar

Corresponde a la medida de dispersión de los valores con respecto a la media.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2}{m-1}} \quad (11)$$

Donde:

σ_j : corresponde al valor de la desviación estándar.

m : corresponde al número de criterios evaluados.

5. Obtención de los pesos para criterio

Para la obtención de los pesos se debe determinar un coeficiente C_j , el cual representa una medida de conflicto creado por los criterios j con respecto a la situación de decisión definida por el resto de criterios.

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^m (1 - \bar{\rho}_{jk})^2 \quad (12)$$

Donde:

C_j : es un coeficiente que relaciona cada criterio.

Posteriormente se reemplaza en la siguiente ecuación.

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (13)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

Mencionando algunos casos, se ha empleado en la combinación de índices de rendimiento en (Li & Mo, 2014), para la selección de alternativas sustentables en la producción de energía nuclear en (Gao, Nam, Ko, & Jang, 2017), selección de equipos de aire acondicionado en (Vujičić, Papić, & Blagojević, 2017), en el estudio de satisfacción de consumo eléctrico de China (Rui & Li-Xiao, 2017), obteniendo resultados aceptables en cada uno de ellos.

Ventajas de método CRITIC

- Las ponderaciones derivadas incorporan tanto la intensidad de contraste como el conflicto que están contenidos en la estructura del problema de decisión
- El método desarrollado se basa en la investigación analítica de la matriz de evaluación para extraer toda la información contenida en los criterios de evaluación.
- El método puede convertirse fácilmente en una forma algorítmica.
- Se considera que las ponderaciones derivadas del método CRITIC contienen la información transmitida a partir de todos los criterios que participan en el problema de los criterios múltiples. Además, las ponderaciones objetivas ofrecen una visión de la naturaleza de los dilemas creados por la existencia de criterios conflictivos y permiten la incorporación de criterios interdependientes

Desventajas de método CRITIC

- Los métodos de correlación de factores y desviación estándar, como no usan requerimientos específicos de la formulación de normalización, claramente ofrecen mejores mecanismos en sus modelos que el método CRITIC.

Método de Pesos medios

Es un método basado en la idea de considerar que todos las valoración para los pesos empleados tienen igual consideración en cada uno de los criterios (Deng, Yeh, & Willis, 2000), es decir que el peso para cada criterio es el mismo en todos los casos. Este método se lo utiliza cuando no existe información relevante de decisión para alcanzar a establecer los pesos de una manera cuantificable, sin embargo, se debe mencionar que su aplicación es muy sencilla y práctica para casos de comparación, este se determina mediante la siguiente ecuación.

$$w_j = \frac{1}{m} \quad (14)$$

Donde:

m : es el número de criterios a evaluar.

w_j : es el peso de cada criterio.

Método de Desviación estándar

Es un método que consiste en asignar un peso pequeño a un atributo si tiene valores de atributo similares en todas las alternativas. Es similar al método de la entropía, aunque no tan preciso como esta, porque sus resultados pueden verse afectados por una variedad de criterios diferentes, mientras que el proceso de normalización en la entropía evita que esto induzca a error (Jahan, Mustapha, Sapuan, Ismail, & Bahraminasab, 2012). El método de desviación estándar determina las ponderaciones de los criterios en términos de sus valores de desviación mediante los siguientes pasos:

1. Construcción de la matriz de decisión

Se aplica las mismas condiciones que se emplean en el método CRITIC.

2. Cálculo de desviación estándar

Corresponde a la medida de dispersión de los valores con respecto a la media.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m}} \quad (15)$$

Donde:

x_{ij} : corresponde a los valores de la matriz de decisión.

m : corresponde al número de criterios evaluados.

σ_j : corresponde al valor de la desviación estándar.

3. Obtención de los pesos para criterio

Los pesos objetivos de cada atributo están dados por la siguiente ecuación:

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \quad (16)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

Método de Variación estadística

El procedimiento de Variación Estadística es un método de ponderación objetiva en el que se derivan ponderaciones objetivas (Zardari, 2014). Los pasos a seguir se detallan en (Rao, 2007), los cuales se presentan a continuación:

1. Construcción de la matriz de decisión

Se aplica las mismas condiciones que se emplean en el método CRITIC.

2. Normalización de matriz de decisión

Para la normalización se aplica de manera similar al caso de entropía.

La matriz normalizada se obtiene de los valores obtenidos.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdot & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & \cdot & p_{2j} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdot & p_{ij} \end{bmatrix} \quad (17)$$

3. Cálculo de la variación estadística

Definida como una medida de dispersión de una serie de puntos de información cercanos al valor promedio de estos. Se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$V_j = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2}{m} \quad (18)$$

Donde:

x_{ij} : corresponde a los valores de la matriz de decisión.

m : corresponde al número de criterios evaluados.

V_j : corresponde al valor de la variación estadística.

4. Obtención de los pesos para criterio

Los pesos objetivos de cada atributo están dados por la siguiente ecuación:

$$w_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j} \quad (19)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

Clases de métodos multicriterio

Se han desarrollado muchos métodos de análisis, dependiendo del tipo de aplicación o enfoque que tenga el caso de estudio, no obstante, existe una tendencia en cada uno de estos a seleccionar una solución cuantificable con un alto grado de confianza, se presentan diferentes alteraciones o mejoramiento en la actualidad, a continuación, se describen algunos de estos.

TOPSIS

Es una metodología capaz de analizar la eficiencia que posee cada alternativa, empleando como idea el acercamiento máximo a soluciones ideales negativas y el acercamiento mínimo a soluciones ideales positivas, haciendo posible aproximarse a tolerancias admisibles para valores de solución enfocando a un grupo selectivo de variables (AL-Oqla & Salit, 2017).

Como se muestra en la figura 14 se tiene un conjunto de alternativas en donde existen distancias máximas que conducen a distancias ideales y anti-ideales, la alternativa D al encontrarse cumpliendo las 2 condiciones de ser la más cercana a la solución ideal y lejana de la anti-ideal, se considera como la más adecuada.

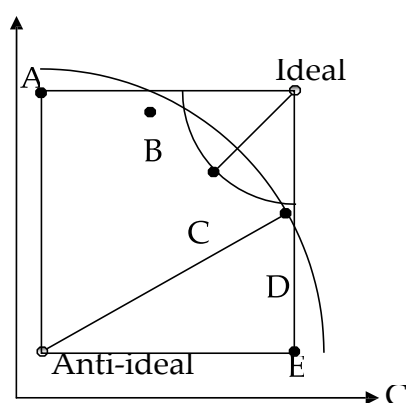


Figura 16. Demostración de puntos de referencia ideales y anti-ideales.

Fuente: (Autor)

Entre las ventajas del uso de este método es que se pueden considerar un gran número de alternativas y criterios, se aplica tanto a información cualitativa como cuantitativa, además de ser un método intuitivo, fácil y rápido de utilizar (Jahan, Edwards, & Bahraminasab, Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design, 2016).

Se ha empleado para la selección de materiales híbridos desarrollado en biocompuestos para el diseño del segmento del parachoques de un vehículo en (Davoodi, et al., 2011) , donde se optimizaron las características de absorción de energía estructural ante un impacto, considerando criterios como la geometría del segmento, costo y manufactura, peso, esfuerzos residuales y deflexiones.

Otra aplicación de este método se empleó para la selección de materiales ecológicos para la manufactura de paneles y estructura de un vehículo (Mayyas, Omar, & Hayajneh, 2016), donde se evaluaron diferentes propiedades mecánicas (densidad, modulo elástico, esfuerzos), costos de manufactura (formabilidad, proceso de unión, pintura), propiedades ecológicas (huella de carbono, porcentaje reciclable), obteniendo un rango de índices de optimización que permiten establecer la mejor alternativa de selección de material en función de cuan cerca se encuentre del valor máximo, en el caso descrito la elección corresponde a un acero martensítico 950/1200.

1. Matriz de Decisión Normalizada

Se obtiene a partir de los valores de la matriz de decisión. El valor normalizado r_{ij} se calcula como

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a^2_{ij}}} \quad (20)$$

Donde:

a_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz de decisión

r_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz normalizada

2. Construcción de la matriz estandarizada de pesos.

Se obtiene la matriz de decisión normalizada ponderada. El valor normalizado ponderado v_{ij} se calcula como la multiplicación de los pesos por el valor normalizado:

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde:

w_n = representa el valor de peso para cada criterio

V_{ij} = representa la matriz estandarizada de pesos

3. Determinación de soluciones ideales

Se determinan los valores positivos y negativos de las soluciones ideales

$$A^* = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J, (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (22)$$

$$A^- = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J, (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (23)$$

Donde:

A^* = Corresponde a los valores positivos ideales

A^- = Corresponde a los valores negativos ideales

4. Cálculo de diferencias entre mediciones

Se calculan las medidas de separación, utilizando la distancia n-dimensional euclidiana. La separación de cada alternativa de la solución ideal se da de la siguiente manera

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (24)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (25)$$

Donde:

S_i^* = Separaciones positivas

S_i^- = Separaciones negativas

5. Cálculo de la proximidad a la solución ideal

La cercanía relativa de las alternativas se determina mediante la siguiente fórmula:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (26)$$

Donde:

C_i^* = coeficiente de proximidad relativa

La alternativa con el valor C_i^* más alto se selecciona como la mejor y la alternativa.

COPRAS

En el método COPRAS se analizan cada uno de los elementos a evaluar en función del aprovechamiento de los criterios empleados y de las estrategias de ponderación. Donde se elige la mejor alternativa considerando los umbrales entre soluciones (ideales- no ideales) (Chatterjee, 2013). Donde se comparan las alternativas y se determinan sus prioridades con arreglos a los criterios contradictorios teniendo en cuenta la ponderación de los criterios, asumiendo dependencias directas y proporcionales del significado y grado de utilidad (prioridad) de las alternativas. (Adali & Iğik, 2016).

La característica más importante que hace que el método COPRAS sea superior a otros métodos es que puede utilizarse para calcular el grado de utilidad de las alternativas, indicando hasta qué punto una alternativa es mejor o peor que otras alternativas tomadas para la comparación (Chatterjee, 2013) . El éxito de la metodología se debe básicamente a su simplicidad y a su particular facilidad de uso, en la mayoría de casos se emplea cuando se consideran atributos cuantitativos. (Rao, 2007).

Se ha empleado en la selección de alternativas para la adquisición de ventanas que garanticen un aislamiento y confort térmico en edificios (Kaklauskas, et al., 2006), obteniendo que la selección de un contratista de ventanas de baja emisividad utilizando este método permite una evaluación más precisa de las necesidades del cliente, así como reducir los costos de reemplazo de ventanas.

1. Matriz de Decisión Normalizada

Los valores normalizados de esta matriz se calculan utilizando la siguiente fórmula.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (27)$$

Donde:

a_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz de decisión

r_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz normalizada

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (28)$$

2. Construcción de matriz estandarizada de pesos.

Se construye la matriz de decisión normalizada ponderada. El valor normalizado ponderado v_{ij} se calcula como la multiplicación de los pesos por el valor normalizado:

Donde:

w_{mn} = representa el valor del peso correspondiente a cada criterio.

V_{ij} = representa la matriz de pesos estandarizada

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (29)$$

3. Determinación de valores ponderados normalizados

Se obtienen las sumas de valores de atributos para los que son preferibles valores mayores, es decir, atributos beneficiosos, para todas las alternativas:

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^m y_{+ij} \quad (30)$$

Donde:

y_{+ij} = representan el valor de criterios beneficiosos

S_{+i} = representan la sumatoria de valores y_{+i}

Se calculan las sumas de valores de atributos para los que son preferibles valores, más pequeños, es decir, atributos no beneficiosos, para todas las alternativas:

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^m y_{-ij} \quad (31)$$

Donde:

y_{-ij} = representan valores pertenecientes a un criterio (costo)

S_{-i} = representan la sumatoria de valores de y_{-i}

Cuanto mayor sea el valor de S_{+i} , mejor es la alternativa y cuanto menor sea el valor de S_{-i} , mejor es la alternativa. Los valores S_{+i} y S_{-i} representan el nivel de prioridad objetiva de cada alternativa.

4. Obtención de la prioridad relativa de las alternativas

Las prioridades relativas representan el grado de satisfacción alcanzado por una alternativa, se determinan utilizando la siguiente fórmula:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{j=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (32)$$

En donde:

Q_i = representan los valores para criterios (costo)

Mientras mayor sea Q_i , deberá ser mayor cada prioridad de las alternativas.

5. Obtención el nivel de rendimiento

Se obtiene el nivel de rendimiento para cada alternativa que conduce a una clasificación completa de las alternativas, esto se consigue comparando las prioridades de todas las alternativas con la más eficiente y se puede denotar como se indica a continuación:

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100 \quad (33)$$

Donde:

Q_{max} = corresponde a la alternativa con el valor de significación relativa más alto, siendo esta la mejor opción entre las alternativas.

U_i = corresponde al nivel de rendimiento

PROMETHEE II

PROMETHEE II es un método de toma de decisiones bien establecido que se ocupa de la evaluación y selección de un conjunto de opciones sobre la base de varios criterios, con el objetivo de identificar los parámetros de beneficio y costo, para obtener una clasificación entre ellas. opciones de decisión (ANAND, 2014). Este consiste en la utilización de valores preferenciales que actúan directamente sobre una serie finita de criterios, para discretizar y elegir soluciones en función de criterios únicos y transitorios, empleando métodos de comparación de alternativas en forma dual, obteniendo desviaciones en la aproximación selección de alternativas (Chatterjee & Chakraborty, 2014).

Donde se especifica el nivel de desviación que sufre cada uno de los análisis efectuados sobre cada criterio evaluado. Las funciones de preferencia convierten esta desviación a un número entre 0 y 1 y presentan la preferencia de la persona que toma la decisión entre alternativas en cada criterio (Barnabas, Ezhilvannan, Kumar, Rajan, & Pandiyan, 2012). Este método es conocido como uno de los más eficientes, pero también uno de los más fáciles en el campo. El método es aceptado por los responsables de la toma de decisiones porque es fácil de comprender y puede presentar resultados mediante una clasificación sencilla (Mladineo, Mladineo, & Knezic, 2017).

1. Matriz de Decisión Normalizada

Se procede a normalizar la matriz de decisión para el atributo de beneficio utilizando la ecuación 1 y para el atributo de no-beneficio utilizando la ecuación 2:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (34)$$

$$r_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (35)$$

Donde:

a_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz de decisión

r_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz normalizada

2. Cálculo de funciones de preferencia

Hay diferentes tipos principales de funciones de preferencia, pero en la mayoría de criterios se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Si } R_{ij} \leq R_{i'j} \text{ entonces } p_j(i, i') = 0 \quad (36)$$

$$\text{Si } R_{ij} > R_{i'j} \text{ entonces } p_j(i, i') = R_{ij} - R_{i'j} \quad (37)$$

3. Cálculo de funciones agregadas de preferencia

Los valores de la función de preferencias agregadas para todas las alternativas emparejadas se calculan utilizando la Ecuación que representa los valores de preferencia agregados.

$$\Pi(i, i') = \left[\frac{\sum_{j=1}^m W_j * P_j(i, i')}{\sum_{j=1}^m W_j} \right] \quad (38)$$

4. Determinación de flujos de entrada y salida

El flujo de salida expresa hasta qué punto una alternativa domina las otras alternativas, mientras que el flujo de entrada denota hasta qué punto una alternativa está dominada por las otras alternativas. Los flujos de entrada y salida (flujos de preferencia multicriterio) para diferentes alternativas se calculan ahora utilizando las ecuaciones y respectivamente.

$$\phi^+(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \Pi(i, i') \quad (39)$$

$$\phi^-(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \Pi(i, i') \quad (40)$$

El flujo de superposición es la diferencia entre los flujos salientes y entrantes que se calcula usando la

$$\phi(i) = \phi^+(i) - \phi^-(i) \quad (41)$$

VIKOR

El método VIKOR es una herramienta MCDM eficaz, específicamente aplicable a aquellas situaciones en las que el gestor de la toma de decisiones tiene dificultades en definir criterios de evaluación, o presenta cierto nivel de incertidumbre en el análisis de criterios y su desempeño en el resultado final. El procedimiento computacional del método VIKOR es bastante simple y ofrece un enfoque sistemático y lógico para llegar a la mejor decisión (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2009).

El principio fundamental de VIKOR es el proceso de clasificar y elegir un conjunto de parámetros en función de factores de inconsistencia generados, puede conseguirse mediante la comparación de umbrales entre alternativas de beneficio y costo (Yalçın & Ünlü, 2017). El método es similar al TOPSIS de manera que también funcionó bajo la premisa de elegir la alternativa preferida basada en la cercanía a la solución ideal (Chhaya, 2018).

1. Matriz de Decisión Normalizada

Se utiliza de forma similar que en el método Topsis

2. Construcción de matriz estandarizada de pesos.

Se utiliza de forma similar que en el método Topsis

3. Cálculo de indicadores de soluciones positivas y negativos ideales

$$A^* = \left\{ \max_i f_{ij} \mid j \in J, (\min_i f_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{f_1^{max}, f_2^{max}, \dots, f_n^{max}\} \quad (42)$$

$$A^- = \left\{ \max_i f_{ij} \mid j \in J, (\min_i f_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{f_1^{min}, f_2^{min}, \dots, f_n^{min}\} \quad (43)$$

4. Cálculo de soluciones optimas

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_j(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \quad (44)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{W_j(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right] \quad (45)$$

Generalmente $\alpha = 0,5$

$$V_i = \frac{\alpha(U_i - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} + \frac{(1-\alpha)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \quad (46)$$

Simulación 3D

Las colisiones de vehículos en accidentes ocurren en un amplio rango de velocidades del vehículo, donde el número de colisiones a velocidades más bajas es mucho mayor que el de las velocidades más altas. Además, el frenado previo a la colisión puede reducir la velocidad de impacto del vehículo en caso de accidente (Ito, Yokoi, & Mizuno, 2015).

Durante las etapas de diseño, los fabricantes de vehículos someten a pruebas de impacto a velocidades desde los 50 km/h en adelante (Snoline, 2008). En el caso de un choque lateral, la prueba se realiza mediante una barrera móvil deformable que golpea la sección lateral del vehículo entre los pilares A y B a 50 km/h (Segui-Gomez, Lopez-Valdes, & Frampton, 2007)

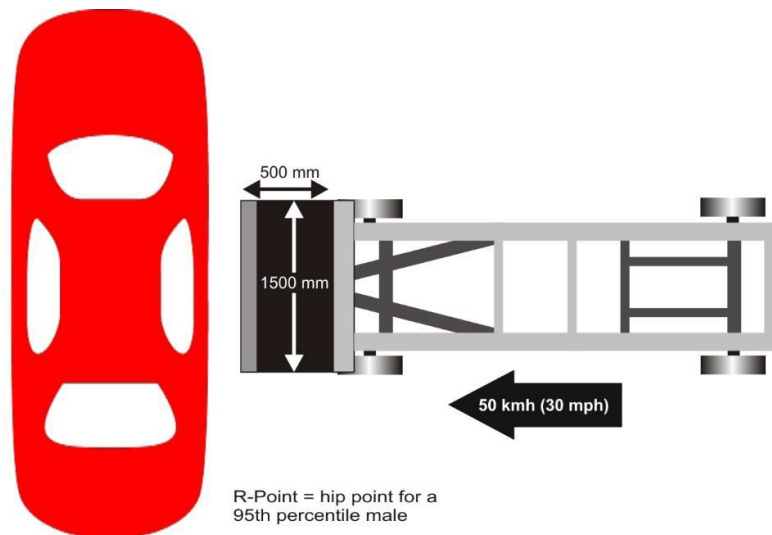


Figura 17. Procedimiento de prueba de choque lateral y escala de colores para el conductor

Fuente: (Euro NCAP, 2008)

La cantidad de energía liberada durante el impacto es absorbida por los elementos estructurales y de chapa, resultando una deformación plástica sobre la superficie y extensión de estos, el nivel de deformación máxima para la mayoría de los vehículos, sin que resulten con daños fatales los ocupantes es de 50 cm, correspondiendo a $\frac{1}{4}$ de su anchura total (Arbelaez, Baker, & Nolan, 2005).

Las tecnologías de simulación son métodos utilizados tradicionalmente en la ingeniería de automoción desde hace muchos años. Con el avance tecnológico cada vez se implementan mejoras en la metodología de los programas CAE utilizados y en los métodos de simulación aplicados (Aparicio, et al., 2011).

Los entornos computacionales permiten modelar estructuras 3D de geometría arbitraria. En simulaciones típicas de resistencia a la colisión, se utilizan placas y carcasas para modelar las paredes metálicas delgadas. Las vigas y las barras se utilizan para reforzar los bastidores y las suspensiones de las ruedas, ejes, conexiones especiales o componentes secundarios (Aparicio, et al., 2011).

A través de la simulación es posible determinar el comportamiento de los elementos estructurales sometidos ante cargas de impacto, si el nivel de deformación se mantiene dentro de un rango admisible es posible reducir la posibilidad de lesiones y daños a los ocupantes del vehículo, garantizando la seguridad e integridad de estos.

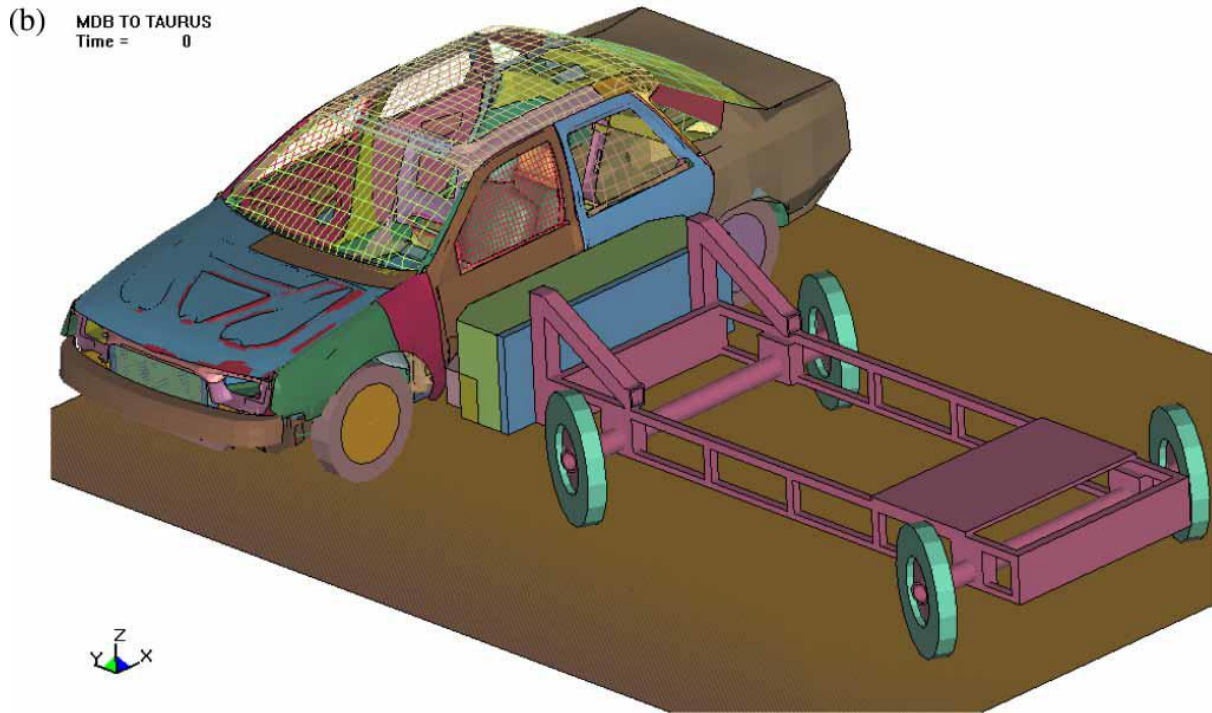


Figura 18. Simulación computacional del ensayo de impacto lateral a escala real.

Fuente: (Teng, Chang, & Wu, 2007)

MÉTODO

Tipo de investigación

En un principio se desarrolla una investigación exploratoria con el fin de establecer los tipos de materiales empleados para la fabricación de los elementos estructurales de automóviles, mediante el uso de herramientas de selección, es posible determinar un conjunto de alternativas adecuadas al caso de estudio.

El uso de métodos multicriterio participa directamente sobre la elección de una alternativa clave, mediante la interacción de cada uno de los criterios de cada material con métodos

matemáticos y estadísticos, es posible desarrollar una metodología de selección confiable y segura.

Método

En este estudio se estableció el método empírico basado en la experimentación y prueba de diferentes variables tanto en la cantidad de pesos de cada criterio, así como de los métodos utilizados, evaluando cada una de las alternativas y comparando los resultados con el fin de establecer una solución única.

Metodología

Existen diversos elementos que conforman una estructura autoportante, cada uno de estos debe ser capaz de soportar una cantidad de energía liberada por la acción de un choque, de manera que resista el impacto, además que posea una capacidad de deformación admisible asegurándose que la deformación global no supere la zona del habitáculo de los ocupantes.

Por otro lado, uno de los objetivos del diseño de cualquier vehículo es buscar la suficiencia y autonomía de la conducción, una manera de conseguir esto es reduciendo el consumo de combustible, un factor importante que influye sobre esto es el peso, si se consigue aligerar la masa de los componentes del vehículo, la cantidad de combustible necesaria para producir la energía suficiente para desplazarlo será menor, traduciéndose como un ahorro económico en la actividad de la conducción, además de contribuir a la reducción de emisiones nocivas sobre el medioambiente.

Por ende, la selección de materiales empleados en la estructura autoportante deben cumplir con criterios y requisitos de diseño, lo suficientemente aceptables para su implementación.

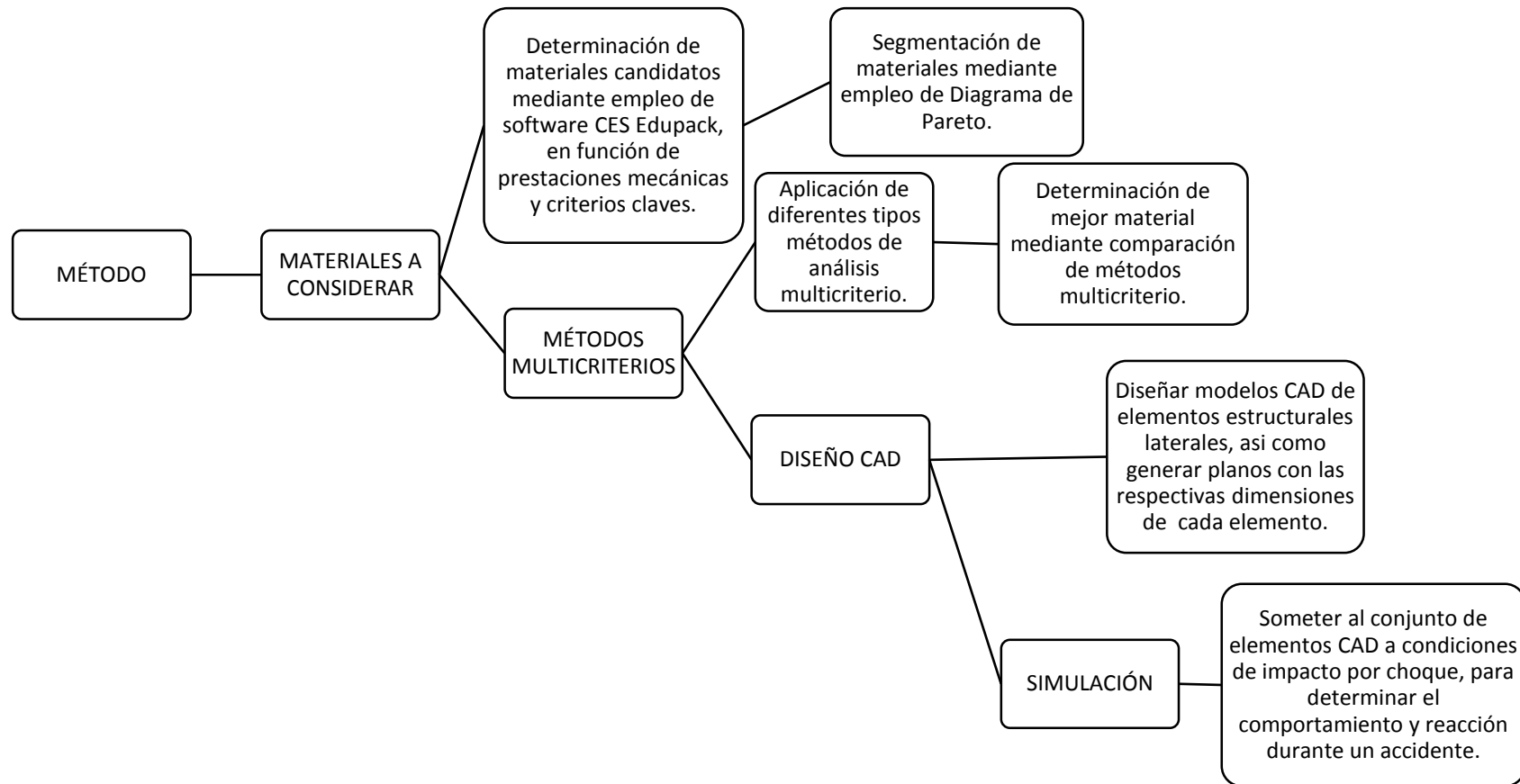


Figura 19. Desarrollo de la metodología

Fuente: Autor

Selección de Materiales Candidatos

El primer paso a efectuar es el de establecer los requerimientos preliminares según la funcionalidad del material, se define como uno de los principales objetivos el minimizar el peso de los elementos estructurales, manteniendo las prestaciones económicas. Los parámetros técnicos considerados son la resistencia a la rotura, porcentaje de elongación del material y su límite elástico.

Los criterios valorados se clasifican según el nivel de prioridad que posean sobre el sistema de análisis, evaluando cada criterio se encuentra que la densidad corresponde a la medición del peso del material.

El costo del material influye directamente sobre la idea de adquisición, pero puede verse afectado por factores externos como el volumen de compra, disponibilidad y volatilidad del mercado, sin embargo, las entidades que tasan de manera aproximada el costo de materiales, pueden variar el precio de un momento a otro, por lo que es necesario identificar los precios más oportunos sin olvidar los requerimientos funcionales.

Es necesario mantener niveles altos del límite elástico, lo bastante como para soportar cargas de impacto sin provocar un grado de deformación que produzca la intrusión de elementos que dañen a los ocupantes. También se debe considerar un alto grado de resistencia a la rotura, con el fin de evitar el fallo del material, y el porcentaje de elongación en niveles bajos para conseguir deformaciones aceptables de intrusión.

Tabla 1. Importancia relativa para criterios

Densidad (ρ)	Precio (\$/kg)	E Modulo Elástico (GPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
Mínimo	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo
↓	↓	↑	↑	↑	↓

Fuente: Autor

Para conseguir un mejoramiento en la elección de materiales, se emplean una serie de técnicas empleando sistemas de valoración con ecuaciones de control, que se denominan “índice de material”, mediante estos es posible conseguir una alternativa de solución adecuada en función de las necesidades propuestas (maximizar-minimizar).

En este caso de estudio se establece como objetivo reducir los valores de masa por lo que se utilizan las siguientes ecuaciones (Ashby M. F., 2011).

Minimizando la masa en función del área y longitud.

$$m_1 = m_2 = \rho V = AL_o\rho \quad (47)$$

Donde:

m_1 y m_2 son las masas del material en función de requerimientos geométricos.

A representa el área de la sección transversal

L_o representa la longitud del elemento

ρ representa la densidad del material

Utilizando la fórmula de esfuerzo en una determinada área

$$\sigma_f = \frac{F}{A} \quad (48)$$

Donde:

F representan una fuerza aplicada.

A representa el área de sección transversal

Reemplazando el área

$$m_1 = FL_o \left(\frac{\rho}{\sigma_f} \right) \quad (49)$$

Donde:

FL_o corresponde a un valor constante

$\frac{\rho}{\sigma_f}$ corresponde al índice de material

Nuevamente minimizando la masa en función del área y longitud.

Utilizando la fórmula de una constante de rigidez

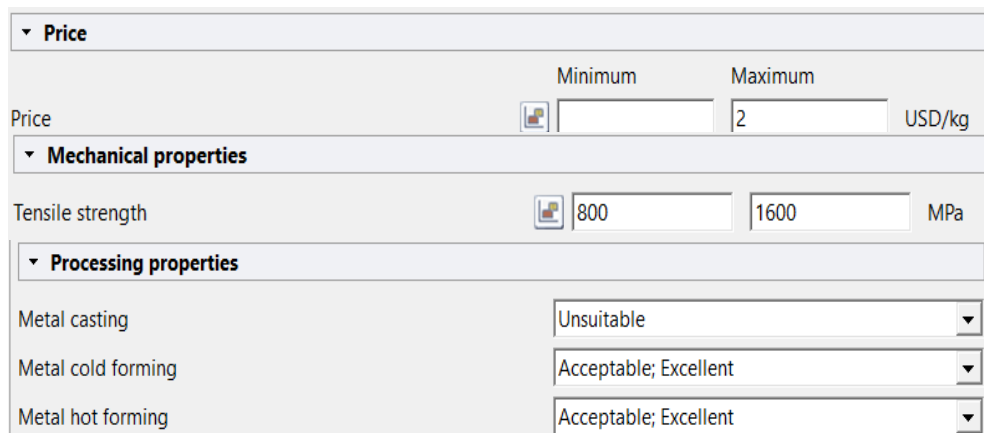
$$S = \frac{EA}{L} \quad (50)$$

Reemplazando el área de la formula anterior

$$m_2 = \frac{\rho}{E} \quad (51)$$

Para la selección de una serie de materiales adecuados para el diseño de una estructura autoportante, se empleó la utilización del software CES EDUPACK, este consta de una biblioteca actualizada y completa de materiales, y posee herramientas de control para evaluar el potencial de cada uno de ellos.

Entre las cuales se halla la herramienta limite, la cual permite establecer rangos de valores de un determinado criterio a considerar y reducir la muestra de valores.



▼ Price	
	Minimum Maximum
Price	USD/kg
▼ Mechanical properties	
Tensile strength	MPa
▼ Processing properties	
Metal casting	
Metal cold forming	
Metal hot forming	

Figura 20. Límites fijados para la selección de materiales.

Fuente: Autor

Posterior a esto, se genera un gráfico de las opciones consideradas con el objetivo de reducir la masa de los materiales, mediante las ecuaciones mencionadas anteriormente se implementan en el entorno del programa, de manera que realice un cálculo automático de las masas generadas, como se muestra en la siguiente figura, un conjunto de burbujas se agrupa sobre un sistema cartesiano representando cada una de estas a los materiales considerados, obteniéndose 100 materiales de 3078.

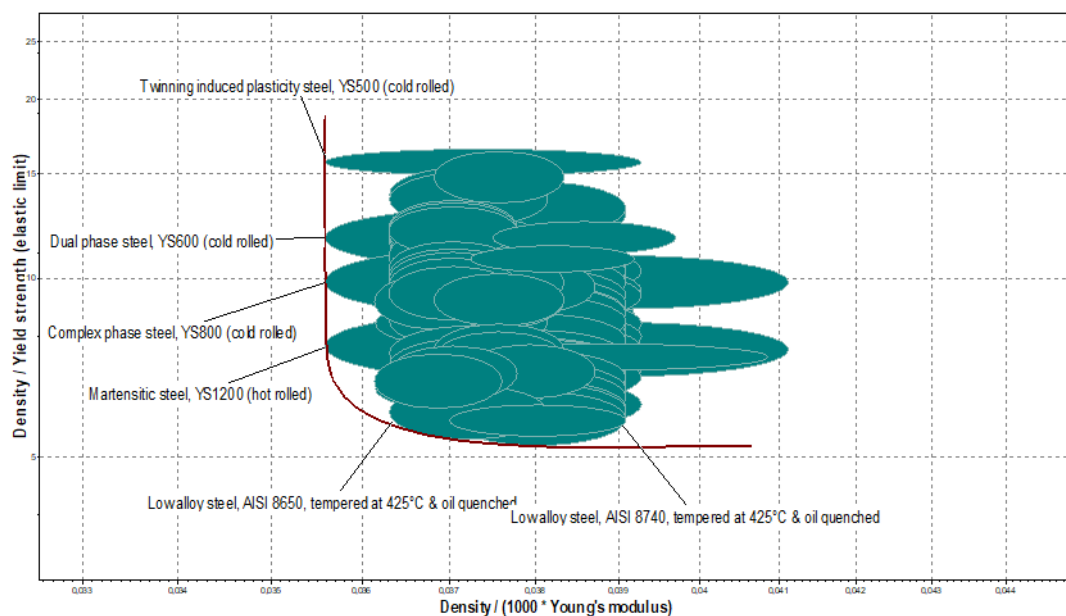


Figura 21. Aplicación de Pareto en selección de materiales

Fuente: Autor

No obstante, el evaluar una muestra grande resulta ineficiente, en vista a ello se emplea el método de Pareto, el cual establece la aproximación de valores hacia aquellos que se acerquen hacia los ejes de coordenadas, correspondiendo estos a los mínimos para los valores de masa. La línea que atraviesa las burbujas corresponde a la aproximación de Pareto, siendo estas burbujas aquellas alternativas que responden a las necesidades establecidas para este estudio.

Tabla 2. Materiales candidatos obtenidos en CES Edupack.

Material	Código
Acero de Plasticidad inducida TS500	F1
Acero de Fase doble YS600	F2
Acero de Fase compleja YS800	F3
Acero Martensítico YS1200	F4
Baja aleación AISI 8650	F5
Baja aleación AISI 8740	F6

Fuente: Autor

Se ha colocado un código a cada material para facilitar su identificación, detallando los criterios de cada material empleado se tienen que:

Tabla 3. Criterios asignados a cada material

Código	Densidad (Kg/m ³)	Precio (\$/kg)	E Modulo Elástico (GPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
F1	7850	1,325	210,5	500,5	981,5	55,0
F2	7850	0,645	210,5	675,0	1055,0	13,5
F3	7850	1,265	210,5	800,0	1090,0	10,0
F4	7850	0,780	210,5	1025,0	1300,0	5,5
F5	7850	0,735	211,0	1325,0	1450,0	12,0
F6	7850	0,745	206,5	1360,0	1435,0	13,0

Fuente: Autor

Desarrollo de métodos multicriterios

Construcción de la matriz de decisión

De los materiales determinados anteriormente se tiene que el valor de densidad es el mismo para todos los casos, por lo que dentro del análisis multicriterio no tiene mayor implicación y relevancia y se descartara de la matriz de decisión.

Tabla 4. Matriz estándar de decisión empleada

Código	Precio (\$/kg)	E Modulo Elástico (GPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
F1	1,325	210,5	500,5	981,5	55,0
F2	0,645	210,5	675,0	1055,0	13,5
F3	1,265	210,5	800,0	1090,0	10,0
F4	0,780	210,5	1025,0	1300,0	5,5
F5	0,735	211,0	1325,0	1450,0	12,0
F6	0,745	206,5	1360,0	1435,0	13,0

Fuente: Autor

$$X = \begin{bmatrix} 1,325 & 210,5 & 500,5 & 981,5 & 55,0 \\ 0,645 & 210,5 & 675,0 & 1055,0 & 13,5 \\ 1,265 & 210,5 & 800,0 & 1090,0 & 10,0 \\ 0,780 & 210,5 & 1025,0 & 1300,0 & 5,5 \\ 0,735 & 211,0 & 1325,0 & 1450,0 & 12,0 \\ 0,745 & 206,5 & 1360,0 & 1435,0 & 13,0 \end{bmatrix}$$

Métodos de ponderación

Para determinar el valor de importancia de cada criterio, así como la influencia que posee dentro del análisis multicriterio, se emplean diferentes métodos de ponderación, entre los métodos empleados en este estudio están: entropía, CRITIC, pesos medios, desviación estándar, y varianza estadística. A continuación, se realiza el cálculo de cada uno de estos:

Método de entropía

1. Normalización de matriz de decisión

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i1} = 1,325 + 0,645 + 1,265 + 0,780 + 0,735 + 0,745 = 5,495$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i2} = 210,5 + 210,5 + 210,5 + 210,5 + 211,0 + 206,5 = 1259,5$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i3} = 500,5 + 675,0 + 800,0 + 1025,0 + 1325,0 + 1360,0 = 5685,5$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i4} = 981,5 + 1055,0 + 1090,0 + 1300,0 + 1450,0 + 1435,0 = 7311,5$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i5} = 55,0 + 13,5 + 10,0 + 5,5 + 12,0 + 13,0 = 109$$

$P_{11} = \frac{1,325}{5,495} = 0,2411$	$P_{12} = \frac{210,5}{1259,5} = 0,1671$	$P_{13} = \frac{500,5}{5685,5} = 0,0880$
$P_{21} = \frac{0,645}{5,495} = 0,1174$	$P_{22} = \frac{210,5}{1259,5} = 0,1671$	$P_{23} = \frac{675,0}{5685,5} = 0,1187$
$P_{31} = \frac{1,265}{5,495} = 0,2302$	$P_{32} = \frac{210,5}{1259,5} = 0,1671$	$P_{33} = \frac{800,0}{5685,5} = 0,1407$
$P_{41} = \frac{0,780}{5,495} = 0,1419$	$P_{42} = \frac{210,5}{1259,5} = 0,1671$	$P_{43} = \frac{1025,0}{5685,5} = 0,1803$
$P_{51} = \frac{0,735}{5,495} = 0,1338$	$P_{52} = \frac{211,0}{1259,5} = 0,1675$	$P_{53} = \frac{1325,0}{5685,5} = 0,2330$
$P_{61} = \frac{0,745}{5,495} = 0,1356$	$P_{62} = \frac{206,5}{1259,5} = 0,1640$	$P_{63} = \frac{1360,0}{5685,5} = 0,2392$
$P_{14} = \frac{981,5}{7311,5} = 0,1342$	$P_{15} = \frac{55,0}{109} = 0,5046$	
$P_{24} = \frac{1055,0}{7311,5} = 0,1443$	$P_{25} = \frac{13,5}{109} = 0,1239$	
$P_{34} = \frac{1090,0}{7311,5} = 0,1491$	$P_{35} = \frac{10,0}{109} = 0,0917$	
$P_{44} = \frac{1300,0}{7311,5} = 0,1778$	$P_{45} = \frac{5,5}{109} = 0,0505$	
$P_{54} = \frac{1450,0}{7311,5} = 0,1983$	$P_{55} = \frac{12,0}{109} = 0,1101$	
$P_{64} = \frac{1435,0}{7311,5} = 0,1963$	$P_{65} = \frac{13,0}{109} = 0,1193$	

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0,2411 & 0,1671 & 0,0880 & 0,1342 & 0,5046 \\ 0,1174 & 0,1671 & 0,1187 & 0,1443 & 0,1239 \\ 0,2302 & 0,1671 & 0,1407 & 0,1491 & 0,0917 \\ 0,1419 & 0,1671 & 0,1803 & 0,1778 & 0,0505 \\ 0,1338 & 0,1675 & 0,2330 & 0,1983 & 0,1101 \\ 0,1356 & 0,1640 & 0,2392 & 0,1963 & 0,1193 \end{bmatrix}$$

2. Cálculo de valor de entropía

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}$$

$$k = \frac{1}{\ln m} = \frac{1}{\ln 6} = 0,5581$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 P_{i1} \ln P_{i1} &= 0,2411 * \ln(0,2411) + 0,1174 * \ln(0,1174) + 0,2302 * \ln(0,2302) \\ &\quad + 0,1419 * \ln(0,1419) + 0,1338 * \ln(0,1338) + 0,1356 * \ln(0,1356) \\ &= -1,7497 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 P_{i2} \ln P_{i2} &= 0,1671 * \ln(0,1671) + 0,1671 * \ln(0,1671) + 0,1671 * \ln(0,1671) \\ &\quad + 0,1671 * \ln(0,1671) + 0,1675 * \ln(0,1675) + 0,1640 * \ln(0,1640) \\ &= -1,7917 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 P_{i3} \ln P_{i3} &= 0,0880 * \ln(0,0880) + 0,1187 * \ln(0,1187) + 0,1407 * \ln(0,1407) \\ &\quad + 0,1803 * \ln(0,1803) + 0,2330 * \ln(0,2330) + 0,2392 * \ln(0,2392) \\ &= -1,7333 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 P_{i4} \ln P_{i4} &= 0,1342 * \ln(0,1342) + 0,1443 * \ln(0,1443) + 0,1491 * \ln(0,1491) \\ &\quad + 0,1778 * \ln(0,1778) + 0,1983 * \ln(0,1983) + 0,1963 * \ln(0,1963) \\ &= -1,7802 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 P_{i5} \ln P_{i5} &= 0,5046 * \ln(0,5046) + 0,1239 * \ln(0,1239) + 0,0917 * \ln(0,0917) \\ &\quad + 0,0505 * \ln(0,0505) + 0,1101 * \ln(0,1101) + 0,1193 * \ln(0,1193) \\ &= -1,4702 \end{aligned}$$

$$e_1 = -(0,5581)(-1,7497) = 0,9765$$

$$e_2 = -(0,5581)(-1,7917) = 0,999985$$

$$e_3 = -(0,5581)(-1,7333) = 0,9674$$

$$e_4 = -(0,5581)(-1,7802) = 0,9935$$

$$e_5 = -(0,5581)(-1,4702) = 0,8205$$

3. Cálculo del grado de divergencia

$$d_j = 1 - e_j$$

$$d_1 = 1 - 0,9765 = 0,0235$$

$$d_2 = 1 - 0,999985 = 0,000015$$

$$d_3 = 1 - 0,9674 = 0,0326$$

$$d_4 = 1 - 0,9935 = 0,0065$$

$$d_5 = 1 - 0,8205 = 0,1795$$

4. Obtención de los pesos para criterio

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}$$

$$\sum_{j=1}^m d_j = 0,0235 + 0,000015 + 0,0326 + 0,0065 + 0,1795 = 0,2420$$

$$w_1 = \frac{0,0235}{0,2420} = 0,0970$$

$$w_2 = \frac{0,000015}{0,2420} = 0,0001$$

$$w_3 = \frac{0,0326}{0,2420} = 0,1347$$

$$w_4 = \frac{0,0065}{0,2420} = 0,0267$$

$$w_5 = \frac{0,1795}{0,2420} = 0,7415$$

Tabla 5. Pesos obtenidos mediante entropía

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0,0970	0,0001	0,1347	0,0267	0,7415

Fuente: Autor

Método CRITIC

1. Normalización de matriz de decisión

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}$$

$p_{11} = \frac{1,325 - 0,645}{1,325 - 0,645} = 1$ $p_{21} = \frac{0,645 - 0,645}{1,325 - 0,645} = 0$ $p_{31} = \frac{1,265 - 0,645}{1,325 - 0,645} = 0,9118$ $p_{41} = \frac{0,780 - 0,645}{1,325 - 0,645} = 0,1985$ $p_{51} = \frac{0,735 - 0,645}{1,325 - 0,645} = 0,1324$ $p_{51} = \frac{0,745 - 0,645}{1,325 - 0,645} = 0,1471$	$p_{12} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $p_{22} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $p_{32} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $p_{42} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $p_{52} = \frac{211,0 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 1$ $p_{62} = \frac{206,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0$
$p_{13} = \frac{500,5 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0$ $p_{23} = \frac{675,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0,2030$ $p_{33} = \frac{800,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0,3485$ $p_{43} = \frac{1025,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0,6102$	$p_{14} = \frac{981,5 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0$ $p_{24} = \frac{1055,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,1569$ $p_{34} = \frac{1090,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,2316$ $p_{44} = \frac{1300,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,6798$

$p_{53} = \frac{1325,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0,9593$ $p_{63} = \frac{1360,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 1$	$p_{54} = \frac{1450,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 1$ $p_{64} = \frac{1435,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,9680$
$p_{15} = \frac{55,0 - 5,5}{55,0 - 5,5} = 1$ $p_{25} = \frac{13,5 - 5,5}{55,0 - 5,5} = 0,1616$ $p_{35} = \frac{10,0 - 5,5}{55,0 - 5,5} = 0,0909$ $p_{45} = \frac{5,5 - 5,5}{55,0 - 5,5} = 0$ $p_{55} = \frac{12,0 - 5,5}{55,0 - 5,5} = 0,1313$ $p_{65} = \frac{13,0 - 5,5}{55,0 - 5,5} = 0,1515$	

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0,8889 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,8889 & 0,2030 & 0,1569 & 0,1616 \\ 0,9118 & 0,8889 & 0,3485 & 0,2316 & 0,0909 \\ 0,1985 & 0,8889 & 0,6102 & 0,6798 & 0 \\ 0,1324 & 1 & 0,9593 & 1 & 0,1313 \\ 0,1471 & 0 & 1 & 0,9680 & 0,1515 \end{bmatrix}$$

2. Cálculo de la correlación entre criterios

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)(p_{ik} - \bar{p}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2 \sum_{i=1}^m (p_{ik} - \bar{p}_k)^2}}$$

$$\bar{p}_1 = \frac{1 + 0 + 0,9118 + 0,1985 + 0,1324 + 0,1471}{6} = 0,3983$$

$$\bar{p}_2 = \frac{0,8889 + 0,8889 + 0,8889 + 0,8889 + 1 + 0}{6} = 0,7593$$

$$\bar{p}_3 = \frac{0 + 0,2030 + 0,3485 + 0,6102 + 0,9593 + 1}{6} = 0,5202$$

$$\overline{p_4} = \frac{0 + 0,1569 + 0,2316 + 0,6798 + 1 + 0,9680}{6} = 0,5060$$

$$\overline{p_5} = \frac{1 + 0,1616 + 0,0909 + 0 + 0,1313 + 0,1515}{6} = 0,2559$$

Debido al largo proceso de cálculo de cada uno de los elementos de la correlación se empleó una hoja de cálculo diseñada en el entorno de Excel, y mediante el uso de la función “COEF.DE.CORREL”, se determinaron dichos coeficientes de correlación de una manera mucho más rápida.

$$\rho_{jk} = \begin{bmatrix} 1 & 0,2363 & -0,5938 & -0,6198 & 0,6323 \\ 0,2363 & 1 & -0,4944 & -0,4378 & 0,1141 \\ -0,5938 & -0,4944 & 1 & 0,9894 & -0,6064 \\ -0,6198 & -0,4378 & 0,9894 & 1 & -0,5651 \\ 0,6323 & 0,1141 & -0,6064 & -0,5651 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Cálculo de la desviación estándar

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \overline{p_j})^2}{m - 1}}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m (p_{i1} - \overline{p_1})^2 &= (1 - 0,3983)^2 + (0 - 0,3983)^2 + (0,9118 - 0,3983)^2 \\ &+ (0,1985 - 0,3983)^2 + (0,1324 - 0,3983)^2 + (0,1471 - 0,3983)^2 \\ &= 0,9581 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m (p_{i2} - \overline{p_2})^2 &= (0,8889 - 0,7593)^2 + (0,8889 - 0,7593)^2 + (0,8889 - 0,7593)^2 \\ &+ (0,8889 - 0,7593)^2 + (1 - 0,7593)^2 + (0 - 0,7593)^2 = 0,7017 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m (p_{i3} - \overline{p_3})^2 \\
&= (0 - 0,5202)^2 + (0,2030 - 0,5202)^2 + (0,3485 - 0,5202)^2 \\
&+ (0,6102 - 0,5202)^2 + (0,9593 - 0,5202)^2 + (1 - 0,5202)^2 = 0,8318
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m (p_{i4} - \overline{p_4})^2 = (0 - 0,5060)^2 + (0,1569 - 0,5060)^2 + (0,2316 - 0,5060)^2 \\
&+ (0,6798 - 0,5060)^2 + (1 - 0,5060)^2 + (0,9680 - 0,5060)^2 = 0,9409
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m (p_{i5} - \overline{p_5})^2 \\
&= (1 - 0,2559)^2 + (0,1616 - 0,2559)^2 + (0,0909 - 0,2559)^2 \\
&+ (0 - 0,2559)^2 + (0,1313 - 0,2559)^2 + (0,1515 - 0,2559)^2 = 0,6817
\end{aligned}$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{0,9581}{6-1}} = 0,4377$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{0,7017}{6-1}} = 0,3746$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{0,8318}{6-1}} = 0,4079$$

$$\sigma_4 = \sqrt{\frac{0,9409}{6-1}} = 0,4338$$

$$\sigma_5 = \sqrt{\frac{0,6817}{6-1}} = 0,3692$$

4. Obtención de los pesos para criterio

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^m (1 - \overline{\rho_{jk}})$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m (1 - \overline{\rho_{j1}}) &= (1 - 1) + (1 - 0,2363) + (1 - (-0,5938)) + (1 - (-0,6198)) \\ &\quad + (1 - 0,6323) = 4,3450 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m (1 - \overline{\rho_{j2}}) &= (1 - 0,2363) + (1 - 1) + (1 - (-0,4944)) + (1 - (-0,4378)) \\ &\quad + (1 - 0,1141) = 4,5818 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m (1 - \overline{\rho_{j3}}) &= (1 - (-0,5938)) + (1 - (-0,4944)) + (1 - 1) + (1 - 0,9893) \\ &\quad + (1 - (-0,6064)) = 4,7054 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m (1 - \overline{\rho_{j4}}) &= (1 - (-0,6198)) + (1 - (-0,4378)) + (1 - 0,9893) + (1 - 1) \\ &\quad + (1 - (-0,5650)) = 4,6333 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m (1 - \overline{\rho_{j5}}) &= (1 - 0,6323) + (1 - 0,1141) + (1 - (-0,6064)) + (1 - (-0,5650)) \\ &\quad + (1 - 1) = 4,4251 \end{aligned}$$

$$C_1 = 0,4377 * 4,3450 = 1,9020$$

$$C_2 = 0,3746 * 4,5818 = 1,7164$$

$$C_3 = 0,4079 * 4,7054 = 1,9191$$

$$C_4 = 0,4338 * 4,6333 = 2,0099$$

$$C_5 = 0,3692 * 4,4251 = 1,6339$$

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}$$

$$\sum_{j=1}^n C_j = 1,9020 + 1,7164 + 1,9191 + 2,0099 + 1,6339 = 9,1814$$

$$w_1 = \frac{1,9020}{9,1814} = 0,2072$$

$$w_2 = \frac{1,7164}{9,1814} = 0,1869$$

$$w_3 = \frac{1,9191}{9,1814} = 0,2090$$

$$w_4 = \frac{2,0099}{9,1814} = 0,2189$$

$$w_5 = \frac{1,6339}{9,1814} = 0,1780$$

Tabla 6. Pesos obtenidos mediante método CRITIC

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0,2072	0,1869	0,2090	0,2189	0,1780

Fuente: Autor

Método de Pesos medios

1. Obtención de los pesos para criterio

$$w_j = \frac{1}{m} = \frac{1}{5} = 0,2$$

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 0,2$$

Tabla 7. Pesos obtenidos mediante pesos medios

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000

*Fuente: Autor***Método de Desviación estándar****1. Cálculo de la desviación estándar**

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m}}$$

$$\bar{x}_1 = \frac{1,325 + 0,645 + 1,265 + 0,780 + 0,735 + 0,745}{6} = 0,9158$$

$$\bar{x}_2 = \frac{210,5 + 210,5 + 210,5 + 210,5 + 211,0 + 206,5}{6} = 209,91$$

$$\bar{x}_3 = \frac{500,5 + 675,0 + 800,0 + 1025,0 + 1325,0 + 1360,0}{6} = 947,58$$

$$\bar{x}_4 = \frac{981,5 + 1055,0 + 1090,0 + 1300,0 + 1450,0 + 1435,0}{6} = 1218,58$$

$$\bar{x}_5 = \frac{55,0 + 13,5 + 10,0 + 5,5 + 12,0 + 13,0}{6} = 18,17$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 &= (1,325 - 0,9158)^2 + (0,645 - 0,9158)^2 + (1,265 - 0,9158)^2 \\ &+ (0,780 - 0,9158)^2 + (0,735 - 0,9158)^2 + (0,745 - 0,9158)^2 = 0,4430 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 &= (210,5 - 209,91)^2 + (210,5 - 209,91)^2 + (210,5 - 209,91)^2 \\ &+ (210,5 - 209,91)^2 + (211,0 - 209,91)^2 + (206,5 - 209,91)^2 = 14,21 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^m (x_{i3} - \bar{x}_3)^2 &= (500,5 - 947,58)^2 + (675,0 - 947,58)^2 + (800,0 - 947,58)^2 \\ &\quad + (1025,0 - 947,58)^2 + (1325,0 - 947,58)^2 + (1360,0 - 947,58)^2 \\ &= 614490,21\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^m (x_{i4} - \bar{x}_4)^2 &= (981,5 - 1218,58)^2 + (1055,0 - 1218,58)^2 + (1090,0 - 1218,58)^2 \\ &\quad + (1300,0 - 1218,58)^2 + (1450,0 - 1218,58)^2 + (1435,0 - 1218,58)^2 \\ &= 206520,21\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^m (x_{i5} - \bar{x}_5)^2 &= (55,0 - 18,17)^2 + (13,5 - 18,17)^2 + (10,0 - 18,17)^2 + (5,5 - 18,17)^2 \\ &\quad + (12,0 - 18,17)^2 + (13,0 - 18,17)^2 = 1670,33\end{aligned}$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{0,4430}{6}} = 0,2717$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{14,21}{6}} = 1,5388$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{614490,21}{6}} = 320,02$$

$$\sigma_4 = \sqrt{\frac{206520,21}{6}} = 185,53$$

$$\sigma_5 = \sqrt{\frac{1670,33}{6}} = 16,68$$

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j}$$

$$\sum_{j=1}^n \sigma_j = 0,2717 + 1,5388 + 320,02 + 185,53 + 16,65 = 524,05$$

$$w_1 = \frac{0,2717}{524,05} = 0,0005$$

$$w_2 = \frac{1,5388}{524,05} = 0,0029$$

$$w_3 = \frac{320,02}{524,05} = 0,6107$$

$$w_4 = \frac{185,53}{524,05} = 0,3540$$

$$w_5 = \frac{16,65}{524,05} = 0,0318$$

Tabla 8. Pesos obtenidos mediante desviación estándar

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0,0005	0,0029	0,6107	0,3540	0,0318

Fuente: Autor

Método de Variación estadística

1. Normalización de matriz de decisión

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij_{max}}}$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij_{min}}}{x_{ij}}$$

$P_{11} = \frac{0,6450}{1,325} = 0,4868$	$P_{12} = \frac{210,5}{211} = 0,9976$	$P_{13} = \frac{500,5}{1360} = 0,3680$
$P_{21} = \frac{0,6450}{0,645} = 1$	$P_{22} = \frac{210,5}{211} = 0,9976$	$P_{23} = \frac{675,0}{1360} = 0,4963$
$P_{31} = \frac{0,6450}{1,265} = 0,5099$	$P_{32} = \frac{210,5}{211} = 0,9976$	$P_{33} = \frac{800,0}{1360} = 0,5882$
$P_{41} = \frac{0,6450}{0,780} = 0,8269$	$P_{42} = \frac{210,5}{211} = 0,9976$	$P_{43} = \frac{1025,0}{1360} = 0,7537$

$P_{51} = \frac{0,6450}{0,735} = 0,8776$ $P_{61} = \frac{0,6450}{0,745} = 0,8658$	$P_{52} = \frac{211,0}{211} = 1$ $P_{62} = \frac{206,5}{211} = 0,9787$	$P_{53} = \frac{1325,0}{1360} = 0,9743$ $P_{63} = \frac{1360,0}{1360} = 1$
$P_{14} = \frac{981,5}{1450} = 0,6769$ $P_{24} = \frac{1055,0}{1450} = 0,7276$ $P_{34} = \frac{1090,0}{1450} = 0,7517$ $P_{44} = \frac{1300,0}{1450} = 0,8966$ $P_{54} = \frac{1450,0}{1450} = 1$ $P_{64} = \frac{1435,0}{1450} = 0,9897$	$P_{15} = \frac{55,0}{109} = 1$ $P_{25} = \frac{13,5}{109} = 0,2455$ $P_{35} = \frac{10,0}{109} = 0,1818$ $P_{45} = \frac{5,5}{109} = 0,1$ $P_{55} = \frac{12,0}{109} = 0,2182$ $P_{65} = \frac{13,0}{109} = 0,2364$	

2. Cálculo de la variación estadística

$$V_j = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2}{m}$$

$$\bar{p}_1 = \frac{0,4868 + 1 + 0,5099 + 0,8269 + 0,8776 + 0,8658}{6} = 0,7612$$

$$\bar{p}_2 = \frac{0,9976 + 0,9976 + 0,9976 + 0,9976 + 1 + 0,9787}{6} = 0,9949$$

$$\bar{p}_3 = \frac{0,3680 + 0,4963 + 0,5882 + 0,7537 + 0,9743 + 1}{6} = 0,6968$$

$$\bar{p}_4 = \frac{0,6769 + 0,7276 + 0,7517 + 0,8966 + 1 + 0,9897}{6} = 0,8404$$

$$\bar{p}_5 = \frac{1 + 0,2455 + 0,1818 + 0,1 + 0,2182 + 0,2364}{6} = 0,3303$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m (p_{i1} - \bar{p}_1)^2 &= (0,4868 - 0,7612)^2 + (1 - 0,7612)^2 + (0,5099 - 0,7612)^2 \\ &\quad + (0,8269 - 0,7612)^2 + (0,8776 - 0,7612)^2 + (0,8658 - 0,7612)^2 \\ &= 0,2243 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m (p_{i2} - \overline{p_2})^2 \\
&= (0,9976 - 0,9949)^2 + (0,9976 - 0,9949)^2 + (0,9976 - 0,9949)^2 \\
&+ (0,9976 - 0,9949)^2 + (1 - 0,9949)^2 + (0,9787 - 0,9949)^2 = 0,00031
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m (p_{i3} - \overline{p_3})^2 \\
&= (0,3680 - 0,6968)^2 + (0,4963 - 0,6968)^2 + (0,5882 - 0,6968)^2 \\
&+ (0,7537 - 0,6968)^2 + (0,9743 - 0,6968)^2 + (1 - 0,6968)^2 = 0,3323
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m (p_{i4} - \overline{p_4})^2 = (0,6769 - 0,8404)^2 + (0,7276 - 0,8404)^2 + (0,7517 - 0,8404)^2 \\
&+ (0,8966 - 0,8404)^2 + (1 - 0,8404)^2 + (0,9897 - 0,8404)^2 = 0,0982
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m (p_{i5} - \overline{p_5})^2 \\
&= (1 - 0,3303)^2 + (0,2455 - 0,3303)^2 + (0,1818 - 0,3303)^2 \\
&+ (0,1 - 0,3303)^2 + (0,2182 - 0,3303)^2 + (0,2364 - 0,3303)^2 = 0,5522
\end{aligned}$$

$$V_1 = \frac{0,2243}{6} = 0,0374$$

$$V_2 = \frac{0,00031}{6} = 0,000053$$

$$V_3 = \frac{0,3323}{6} = 0,0554$$

$$V_4 = \frac{0,0982}{6} = 0,0164$$

$$V_5 = \frac{0,5522}{6} = 0,0920$$

$$w_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j}$$

$$\sum_{j=1}^m V_j = 0,0374 + 0,000053 + 0,0554 + 0,0164 + 0,0920 = 0,2012$$

$$w_1 = \frac{0,0374}{0,2012} = 0,1858$$

$$w_2 = \frac{0,000053}{0,2012} = 0,00026$$

$$w_3 = \frac{0,0554}{0,2012} = 0,2753$$

$$w_4 = \frac{0,0164}{0,2012} = 0,0815$$

$$w_5 = \frac{0,0920}{0,2012} = 0,4573$$

Tabla 9. Pesos obtenidos mediante varianza

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0,1858	0,0003	0,2752	0,0814	0,4574

Fuente: Autor

Aplicación de métodos multicriterio

En el desarrollo de análisis multicriterio, se emplearon 4 métodos: Topsis, Copras, Promethee II, Vikor. Se empleó en el sistema de ponderación el método de entropía, en vista de la convergencia en la importancia de criterios con el método de variación estadística, teniendo un margen alto de confianza entre estas 2 alternativas, sin embargo, se aplican los demás métodos a modo de comparación, pero solo se incluye el cálculo mediante entropía, para los demás casos se emplea una hoja de cálculo para conseguir los resultados pertinentes.

TOPSIS

1. Matriz de Decisión Normalizada

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}}$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{i1}^2} = \sqrt{1,325^2 + 0,645^2 + 1,265^2 + 0,780^2 + 0,735^2 + 0,745^2} = 2,34$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{i2}^2} = \sqrt{210,5^2 + 210,5^2 + 210,5^2 + 210,5^2 + 211,0^2 + 206,5^2} = 514,20$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{i3}^2} = \sqrt{500,5^2 + 675,0^2 + 800,0^2 + 1025,0^2 + 1325,0^2 + 1360,0^2} = 2449,89$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{i4}^2} = \sqrt{981,5^2 + 1055,0^2 + 1090,0^2 + 1300,0^2 + 1450,0^2 + 1435,0^2} = 3019,30$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{i5}^2} = \sqrt{55,0^2 + 13,5^2 + 10,0^2 + 5,5^2 + 12,0^2 + 13,0^2} = 60,42$$

$r_{11} = 1 - \frac{1,325}{2,34} = 0,4338$	$r_{12} = \frac{210,5}{514,20} = 0,4094$	$r_{13} = \frac{500,5}{2449,89} = 0,2043$
$r_{21} = 1 - \frac{0,645}{2,34} = 0,7244$	$r_{22} = \frac{210,5}{514,20} = 0,4094$	$r_{23} = \frac{675,0}{2449,89} = 0,2755$
$r_{31} = 1 - \frac{1,265}{2,34} = 0,4594$	$r_{32} = \frac{210,5}{514,20} = 0,4094$	$r_{33} = \frac{800,0}{2449,89} = 0,3265$
$r_{41} = 1 - \frac{0,780}{2,34} = 0,6667$	$r_{42} = \frac{210,5}{514,20} = 0,4094$	$r_{43} = \frac{1025,0}{2449,89} = 0,4184$
$r_{51} = 1 - \frac{0,735}{2,34} = 0,6859$	$r_{52} = \frac{211,0}{514,20} = 0,4103$	$r_{53} = \frac{1325,0}{2449,89} = 0,5408$
$r_{61} = 1 - \frac{0,745}{2,34} = 0,6816$	$r_{62} = \frac{206,5}{514,20} = 0,4016$	$r_{63} = \frac{1360,0}{2449,89} = 0,5551$

$r_{14} = \frac{981,5}{3019,30} = 0,3251$	$r_{15} = 1 - \frac{55,0}{60,42} = 0,0897$	
$r_{24} = \frac{1055,0}{3019,30} = 0,3494$	$r_{25} = 1 - \frac{13,5}{60,42} = 0,7766$	
$r_{34} = \frac{1090,0}{3019,30} = 0,3610$	$r_{35} = 1 - \frac{10,0}{60,42} = 0,8345$	
$r_{44} = \frac{1300,0}{3019,30} = 0,4306$	$r_{45} = 1 - \frac{5,5}{60,42} = 0,9090$	
$r_{54} = \frac{1450,0}{3019,30} = 0,4802$	$r_{55} = 1 - \frac{12,0}{60,42} = 0,8014$	
$r_{64} = \frac{1435,0}{3019,30} = 0,4753$	$r_{65} = 1 - \frac{13,0}{60,42} = 0,7848$	

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0,4338 & 0,4094 & 0,2043 & 0,3251 & 0,0897 \\ 0,7244 & 0,4094 & 0,2755 & 0,3494 & 0,7766 \\ 0,4594 & 0,4094 & 0,3265 & 0,3610 & 0,8345 \\ 0,6667 & 0,4094 & 0,4184 & 0,4306 & 0,9090 \\ 0,6859 & 0,4103 & 0,5408 & 0,4802 & 0,8014 \\ 0,6816 & 0,4016 & 0,5551 & 0,4753 & 0,7848 \end{bmatrix}$$

Tabla 10.Matriz normalizada de decisión (Topsis)

Código	Precio (\$/kg)	E Modulo Elástico (GPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
F1	0,4338	0,4094	0,2043	0,3251	0,0897
F2	0,7244	0,4094	0,2755	0,3494	0,7766
F3	0,4594	0,4094	0,3265	0,3610	0,8345
F4	0,6667	0,4094	0,4184	0,4306	0,9090
F5	0,6859	0,4103	0,5408	0,4802	0,8014
F6	0,6816	0,4016	0,5551	0,4753	0,7848

Fuente: Autor

2. Construcción de matriz estandarizada de pesos.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 0,0970 * 0,4338 & 0,0001 * 0,4094 & 0,1347 * 0,2043 & 0,0267 * 0,3251 & 0,7415 * 0,0897 \\ 0,0970 * 0,7244 & 0,0001 * 0,4094 & 0,1347 * 0,2755 & 0,0267 * 0,3494 & 0,7415 * 0,7766 \\ 0,0970 * 0,4594 & 0,0001 * 0,4094 & 0,1347 * 0,3265 & 0,0267 * 0,3610 & 0,7415 * 0,8345 \\ 0,0970 * 0,6667 & 0,0001 * 0,4094 & 0,1347 * 0,4184 & 0,0267 * 0,4306 & 0,7415 * 0,9090 \\ 0,0970 * 0,6859 & 0,0001 * 0,4103 & 0,1347 * 0,5408 & 0,0267 * 0,4802 & 0,7415 * 0,8014 \\ 0,0970 * 0,6816 & 0,0001 * 0,4016 & 0,1347 * 0,5551 & 0,0267 * 0,4753 & 0,7415 * 0,7848 \end{bmatrix}$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 0,0421 & 0,00002547 & 0,0275 & 0,0087 & 0,0665 \\ 0,0703 & 0,00002547 & 0,0371 & 0,0093 & 0,5758 \\ 0,0446 & 0,00002547 & 0,0440 & 0,0097 & 0,6187 \\ 0,0647 & 0,00002547 & 0,0564 & 0,0115 & 0,6740 \\ 0,0665 & 0,00002553 & 0,0729 & 0,0128 & 0,5942 \\ 0,0661 & 0,00002499 & 0,0748 & 0,0127 & 0,5819 \end{bmatrix}$$

Tabla 11. Matriz estandarizada de pesos obtenidos (Topsis)

Código	Precio (\$/kg)	E Modulo Elástico (GPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
F1	0,0421	0,00002547	0,0275	0,0087	0,0665
F2	0,0703	0,00002547	0,0371	0,0093	0,5758
F3	0,0446	0,00002547	0,0440	0,0097	0,6187
F4	0,0647	0,00002547	0,0564	0,0115	0,6740
F5	0,0665	0,00002553	0,0729	0,0128	0,5942
F6	0,0661	0,00002499	0,0748	0,0127	0,5819

Fuente: Autor

3. Determinación de soluciones positivas y negativas ideales

$$A^* = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J), (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}$$

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, v_3^*, v_4^*, v_5^*, v_6^*\}$$

$$A^* = \{0,0421; 0,00002553; 0,0748; 0,0128; 0,6740\}$$

$$A^- = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J), (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, v_3^-, v_4^-, v_5^-, v_6^-\}$$

$$A^- = \{0,0703; 0,00002499; 0,0275; 0,0087; 0,0665\}$$

Tabla 12. Solución ideal positivas y negativas

Solución Positiva ideal	0,0421	0,00002553	0,0748	0,0128	0,6740
Solución Negativa ideal	0,0703	0,00002499	0,0275	0,0087	0,0665

Fuente: Autor

4. Diferencias entre mediciones

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}$$

$$S_1^*$$

$$= \sqrt{(v_{11} - v_1^*)^2 + (v_{12} - v_2^*)^2 + (v_{13} - v_3^*)^2 + (v_{14} - v_4^*)^2 + (v_{15} - v_5^*)^2 + (v_{16} - v_6^*)^2}$$

$$S_1^* = \sqrt{(0,0421 - 0,0421)^2 + (0,00002547 - 0,00002553)^2 + (0,0275 - 0,0748)^2 +$$

$$(0,0087 - 0,0128)^2 + (0,0665 - 0,6740)^2}$$

$$S_1^* = 0,6093$$

$$S_2^*$$

$$= \sqrt{(v_{21} - v_1^*)^2 + (v_{22} - v_2^*)^2 + (v_{23} - v_3^*)^2 + (v_{24} - v_4^*)^2 + (v_{25} - v_5^*)^2 + (v_{26} - v_6^*)^2}$$

$$S_2^* = \sqrt{(0,0703 - 0,0421)^2 + (0,00002547 - 0,00002553)^2 + (0,0371 - 0,0748)^2 +$$

$$(0,0093 - 0,0128)^2 + (0,5758 - 0,6740)^2}$$

$$S_2^* = 0,1089$$

$$S_3^*$$

$$= \sqrt{(v_{31} - v_1^*)^2 + (v_{32} - v_2^*)^2 + (v_{33} - v_3^*)^2 + (v_{34} - v_4^*)^2 + (v_{35} - v_5^*)^2 + (v_{36} - v_6^*)^2}$$

$$S_3^* = \sqrt{(0,0446 - 0,0421)^2 + (0,00002547 - 0,00002553)^2 + (0,0440 - 0,0748)^2 +$$

$$(0,0097 - 0,0128)^2 + (0,6187 - 0,6740)^2}$$

$$S_3^* = 0,0634$$

$$S_4^*$$

$$= \sqrt{(v_{41} - v_1^*)^2 + (v_{42} - v_2^*)^2 + (v_{43} - v_3^*)^2 + (v_{44} - v_4^*)^2 + (v_{45} - v_5^*)^2 + (v_{46} - v_6^*)^2}$$

$$S_4^* = \sqrt{(0,0647 - 0,0421)^2 + (0,00002547 - 0,00002553)^2 + (0,0564 - 0,0748)^2 +$$

$$(0,0115 - 0,0128)^2 + (0,6740 - 0,6740)^2}$$

$$S_4^* = 0,0292$$

$$S_5^*$$

$$= \sqrt{(v_{51} - v_1^*)^2 + (v_{52} - v_2^*)^2 + (v_{53} - v_3^*)^2 + (v_{54} - v_4^*)^2 + (v_{55} - v_5^*)^2 + (v_{56} - v_6^*)^2}$$

$$S_5^* = \sqrt{(0,0665 - 0,0421)^2 + (0,00002553 - 0,00002553)^2 + (0,0729 - 0,0748)^2 +$$

$$(0,0128 - 0,0128)^2 + (0,5942 - 0,6740)^2}$$

$$S_5^* = 0,0835$$

$$S_6^*$$

$$= \sqrt{(v_{61} - v_1^*)^2 + (v_{62} - v_2^*)^2 + (v_{63} - v_3^*)^2 + (v_{64} - v_4^*)^2 + (v_{65} - v_5^*)^2 + (v_{66} - v_6^*)^2}$$

$$S_6^* = \sqrt{(0,0661 - 0,0421)^2 + (0,00002499 - 0,00002553)^2 + (0,0748 - 0,0748)^2 +$$

$$(0,0127 - 0,0128)^2 + (0,5819 - 0,6740)^2}$$

$$S_6^* = 0,0951$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

$$S_i^-$$

$$= \sqrt{(v_{11} - v_1^-)^2 + (v_{12} - v_2^-)^2 + (v_{13} - v_3^-)^2 + (v_{14} - v_4^-)^2 + (v_{15} - v_5^-)^2 + (v_{16} - v_6^-)^2}$$

$$S_1^- = \sqrt{(0,0421 - 0,0703)^2 + (0,00002547 - 0,00002499)^2 + (0,0275 - 0,0275)^2 +$$

$$(0,0087 - 0,0087)^2 + (0,0665 - 0,0665)^2}$$

$$S_1^- = 0,0282$$

$$S_2^-$$

$$= \sqrt{(v_{21} - v_1^-)^2 + (v_{22} - v_2^-)^2 + (v_{23} - v_3^-)^2 + (v_{24} - v_4^-)^2 + (v_{25} - v_5^-)^2 + (v_{26} - v_6^-)^2}$$

$$S_2^- = \sqrt{(0,0703 - 0,0703)^2 + (0,00002547 - 0,00002499)^2 + (0,0371 - 0,0275)^2 + (0,0093 - 0,0087)^2 + (0,5758 - 0,0665)^2}$$

$$S_2^- = 0,5094$$

$$S_3^-$$

$$= \sqrt{(v_{31} - v_1^-)^2 + (v_{32} - v_2^-)^2 + (v_{33} - v_3^-)^2 + (v_{34} - v_4^-)^2 + (v_{35} - v_5^-)^2 + (v_{36} - v_6^-)^2}$$

$$S_3^- = \sqrt{(0,0446 - 0,0703)^2 + (0,00002547 - 0,00002499)^2 + (0,0440 - 0,0275)^2 + (0,0097 - 0,0087)^2 + (0,6187 - 0,0665)^2}$$

$$S_3^- = 0,5531$$

$$S_4^-$$

$$= \sqrt{(v_{41} - v_1^-)^2 + (v_{42} - v_2^-)^2 + (v_{43} - v_3^-)^2 + (v_{44} - v_4^-)^2 + (v_{45} - v_5^-)^2 + (v_{46} - v_6^-)^2}$$

$$S_4^- = \sqrt{(0,0647 - 0,0703)^2 + (0,00002547 - 0,00002499)^2 + (0,0564 - 0,0275)^2 + (0,0115 - 0,0087)^2 + (0,6740 - 0,0665)^2}$$

$$S_4^- = 0,6082$$

$$S_5^-$$

$$= \sqrt{(v_{51} - v_1^-)^2 + (v_{52} - v_2^-)^2 + (v_{53} - v_3^-)^2 + (v_{54} - v_4^-)^2 + (v_{55} - v_5^-)^2 + (v_{56} - v_6^-)^2}$$

$$S_5^- = \sqrt{(0,0665 - 0,0703)^2 + (0,00002553 - 0,00002499)^2 + (0,0729 - 0,0275)^2 + (0,0128 - 0,0087)^2 + (0,5942 - 0,0665)^2}$$

$$S_5^- = 0,5297$$

$$S_6^-$$

$$= \sqrt{(v_{61} - v_1^-)^2 + (v_{62} - v_2^-)^2 + (v_{63} - v_3^-)^2 + (v_{64} - v_4^-)^2 + (v_{65} - v_5^-)^2 + (v_{66} - v_6^-)^2}$$

$$S_6^- = \sqrt{(0,0661 - 0,0703)^2 + (0,00002499 - 0,00002499)^2 + (0,0748 - 0,0275)^2 + (0,0127 - 0,0087)^2 + (0,5819 - 0,0665)^2}$$

$$S_6^- = 0,5176$$

Tabla 13. Distancias entre soluciones positivas y negativas ideales

Código	Distancia hacia Solución Positiva ideal	Distancia hacia Solución Negativa ideal
F1	0,6093	0,0282
F2	0,1089	0,5094
F3	0,0634	0,5531
F4	0,0292	0,6082
F5	0,0835	0,5297
F6	0,0951	0,5176

Fuente: Autor

5. Proximidad a la solución ideal

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*}$$

$$C_1^* = \frac{S_1^-}{S_1^- + S_1^*} = \frac{0,0282}{0,0282 + 0,6093} = 0,0442$$

$$C_2^* = \frac{S_2^-}{S_2^- + S_2^*} = \frac{0,5094}{0,5094 + 0,1089} = 0,8238$$

$$C_3^* = \frac{S_3^-}{S_3^- + S_3^*} = \frac{0,5531}{0,5531 + 0,0634} = 0,8972$$

$$C_4^* = \frac{S_4^-}{S_4^- + S_4^*} = \frac{0,6082}{0,6082 + 0,0292} = 0,9542$$

$$C_5^* = \frac{S_5^-}{S_5^- + S_5^*} = \frac{0,5297}{0,5297 + 0,0835} = 0,8639$$

$$C_6^* = \frac{S_6^-}{S_6^- + S_6^*} = \frac{0,5176}{0,5176 + 0,0951} = 0,8448$$

Tabla 14. Proximidad relativa a solución ideal y ranking (Topsis)

Código	Distancia hacia Solución Positiva ideal	Ranking
F1	0,0442	6
F2	0,8238	5
F3	0,8972	2
F4	0,9542	1
F5	0,8639	3
F6	0,8448	4

Fuente: Autor

COPRAS

1. Matriz de Decisión Normalizada

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}$$

$$\sum_{i=1}^m a_{i1} = 1,325 + 0,645 + 1,265 + 0,780 + 0,735 + 0,745 = 5,50$$

$$\sum_{i=1}^m a_{i2} = 210,5 + 210,5 + 210,5 + 210,5 + 211,0 + 206,5 = 1259,50$$

$$\sum_{i=1}^m a_{i3} = 500,5 + 675,0 + 800,0 + 1025,0 + 1325,0 + 1360,0 = 5685,50$$

$$\sum_{i=1}^m a_{i4} = 981,5 + 1055,0 + 1090,0 + 1300,0 + 1450,0 + 1435,0 = 7311,50$$

$$\sum_{i=1}^m a_{i5} = 55,0 + 13,5 + 10,0 + 5,5 + 12,0 + 13,0 = 109$$

$r_{11} = \frac{1,325}{5,50} = 0,2411$	$r_{12} = \frac{210,5}{1259,50} = 0,1671$	$r_{13} = \frac{500,5}{5685,50} = 0,0880$
$r_{21} = \frac{0,645}{5,50} = 0,1174$	$r_{22} = \frac{210,5}{1259,50} = 0,1671$	$r_{23} = \frac{675,0}{5685,50} = 0,1187$
$r_{31} = \frac{1,265}{5,50} = 0,2302$	$r_{32} = \frac{210,5}{1259,50} = 0,1671$	$r_{33} = \frac{800,0}{5685,50} = 0,1407$

$r_{41} = \frac{0,780}{5,50} = 0,1419$ $r_{51} = \frac{0,735}{5,50} = 0,1338$ $r_{61} = \frac{0,745}{5,50} = 0,1356$	$r_{42} = \frac{210,5}{1259,50} = 0,1671$ $r_{52} = \frac{211,0}{1259,50} = 0,1675$ $r_{62} = \frac{206,5}{1259,50} = 0,1640$	$r_{43} = \frac{1025,0}{5685,50} = 0,1803$ $r_{53} = \frac{1325,0}{5685,50} = 0,2330$ $r_{63} = \frac{1360,0}{5685,50} = 0,2392$
$r_{14} = \frac{981,5}{7311,50} = 0,1342$ $r_{24} = \frac{1055,0}{7311,50} = 0,1443$ $r_{34} = \frac{1090,0}{7311,50} = 0,1491$ $r_{44} = \frac{1300,0}{7311,50} = 0,1778$ $r_{54} = \frac{1450,0}{7311,50} = 0,1983$ $r_{64} = \frac{1435,0}{7311,50} = 0,1963$	$r_{15} = \frac{55,0}{109} = 0,5046$ $r_{25} = \frac{13,5}{109} = 0,1239$ $r_{35} = \frac{10,0}{109} = 0,0917$ $r_{45} = \frac{5,5}{109} = 0,0505$ $r_{55} = \frac{12,0}{109} = 0,1101$ $r_{65} = \frac{13,0}{109} = 0,1193$	

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0,2411 & 0,1671 & 0,0880 & 0,1342 & 0,5046 \\ 0,1174 & 0,1671 & 0,1187 & 0,1443 & 0,1239 \\ 0,2302 & 0,1671 & 0,1407 & 0,1491 & 0,0917 \\ 0,1419 & 0,1671 & 0,1803 & 0,1778 & 0,0505 \\ 0,1338 & 0,1675 & 0,2330 & 0,1983 & 0,1101 \\ 0,1356 & 0,1640 & 0,2392 & 0,1963 & 0,1193 \end{bmatrix}$$

Tabla 15. Matriz normalizada de decisión (Copras)

Código	Precio (\$/kg)	E Modulo Elástico (GPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
F1	0,2411	0,1671	0,0880	0,1342	0,5046
F2	0,1174	0,1671	0,1187	0,1443	0,1239
F3	0,2302	0,1671	0,1407	0,1491	0,0917
F4	0,1419	0,1671	0,1803	0,1778	0,0505
F5	0,1338	0,1675	0,2330	0,1983	0,1101
F6	0,1356	0,1640	0,2392	0,1963	0,1193

Fuente: Autor

2. Construcción de matriz estandarizada de pesos.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$V_{ij}$$

$$= \begin{bmatrix} 0,0970 * 0,2411 & 0,0001 * 0,1671 & 0,1347 * 0,0880 & 0,0267 * 0,1342 & 0,7415 * 0,5046 \\ 0,0970 * 0,1174 & 0,0001 * 0,1671 & 0,1347 * 0,1187 & 0,0267 * 0,1443 & 0,7415 * 0,1239 \\ 0,0970 * 0,2302 & 0,0001 * 0,1671 & 0,1347 * 0,1407 & 0,0267 * 0,1491 & 0,7415 * 0,0917 \\ 0,0970 * 0,1419 & 0,0001 * 0,1671 & 0,1347 * 0,1803 & 0,0267 * 0,1778 & 0,7415 * 0,0505 \\ 0,0970 * 0,1338 & 0,0001 * 0,1675 & 0,1347 * 0,2330 & 0,0267 * 0,1983 & 0,7415 * 0,1101 \\ 0,0970 * 0,1356 & 0,0001 * 0,1640 & 0,1347 * 0,2392 & 0,0267 * 0,1963 & 0,7415 * 0,1193 \end{bmatrix}$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 0,0234 & 0,00001 & 0,0119 & 0,0036 & 0,3741 \\ 0,0114 & 0,00001 & 0,0160 & 0,0039 & 0,0918 \\ 0,0223 & 0,00001 & 0,0190 & 0,0040 & 0,0680 \\ 0,0138 & 0,00001 & 0,0243 & 0,0048 & 0,0374 \\ 0,0130 & 0,00001 & 0,0314 & 0,0053 & 0,0816 \\ 0,0131 & 0,00001 & 0,0322 & 0,0052 & 0,0884 \end{bmatrix}$$

Tabla 16. Matriz estandarizada de pesos obtenidos (CRITIC)

Código	Precio (\$/kg)	E Modulo Elástico (GPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
F1	0,0234	0,00001040	0,0119	0,0036	0,3741
F2	0,0114	0,00001040	0,0160	0,0039	0,0918
F3	0,0223	0,00001040	0,0190	0,0040	0,0680
F4	0,0138	0,00001040	0,0243	0,0048	0,0374
F5	0,0130	0,00001042	0,0314	0,0053	0,0816
F6	0,0131	0,00001020	0,0322	0,0052	0,0884

Fuente: Autor

3. Determinación de valores de pesos normalizadas para criterios beneficiosos y no beneficiosos

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^m y_{+ij}$$

$$S_{+1} = \sum_{j=1}^m y_{+1j} = 0,0001 + 0,0119 + 0,0036 = 0,0155$$

$$S_{+2} = \sum_{j=1}^m y_{+2j} = 0,0001 + 0,0160 + 0,0039 = 0,0199$$

$$S_{+3} = \sum_{j=1}^m y_{+3j} = 0,0001 + 0,0190 + 0,0040 = 0,0230$$

$$S_{+4} = \sum_{j=1}^m y_{+4j} = 0,0001 + 0,0243 + 0,0048 = 0,0291$$

$$S_{+5} = \sum_{j=1}^m y_{+5j} = 0,0001 + 0,0314 + 0,0053 = 0,0367$$

$$S_{+6} = \sum_{j=1}^m y_{+6j} = 0,0001 + 0,0322 + 0,0052 = 0,0375$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^m y_{-ij}$$

$$S_{-1} = \sum_{j=1}^m y_{-1j} = 0,3975$$

$$S_{-2} = \sum_{j=1}^m y_{-2j} = 0,1032$$

$$S_{-3} = \sum_{j=1}^m y_{-3j} = 0,0904$$

$$S_{-4} = \sum_{j=1}^m y_{-4j} = 0,0512$$

$$S_{-5} = \sum_{j=1}^m y_{-5j} = 0,0946$$

$$S_{-6} = \sum_{j=1}^m y_{-6j} = 0,1016$$

Tabla 17. Sumatoria de pesos obtenidos de criterios beneficiosos y no beneficiosos

S+1	S+2	S+3	S+4	S+5	S+6
0,0155	0,0199	0,0230	0,0291	0,0367	0,0375
S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6
0,3975	0,1032	0,0904	0,0512	0,0946	0,1016

Fuente: Autor

4. Obtención de la prioridad relativa de las alternativas

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{j=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}}}$$

$$\sum_{j=1}^m S_{-i} = 0,3975 + 0,1032 + 0,0904 + 0,0512 + 0,0946 + 0,1016 = 0,8385$$

$$\sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}} = \left(\frac{1}{0,3975} + \frac{1}{0,1032} + \frac{1}{0,0904} + \frac{1}{0,0512} + \frac{1}{0,0946} + \frac{1}{0,1016} \right) = 63,23$$

$$Q_i = S_{+i} + \frac{0,8385}{S_{-i}(63,23)}$$

$$Q_1 = 0,0155 + \frac{0,8385}{0,3975(63,23)} = 0,0488$$

$$Q_2 = 0,0199 + \frac{0,8385}{0,1032(63,23)} = 0,1483$$

$$Q_3 = 0,0230 + \frac{0,8385}{0,0904(63,23)} = 0,1697$$

$$Q_4 = 0,0291 + \frac{0,8385}{0,0512(63,23)} = 0,2882$$

$$Q_5 = 0,0367 + \frac{0,8385}{0,0946(63,23)} = 0,1769$$

$$Q_6 = 0,0375 + \frac{0,8385}{0,1016(63,23)} = 0,1680$$

Tabla 18. Prioridades relativas de cada alternativa

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
0,0488	0,1483	0,1697	0,2882	0,1769	0,1680

Fuente: Autor

5. Determinar el nivel de rendimiento

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100$$

$$U_i = \frac{Q_i}{0,2882} * 100$$

$$U_1 = \frac{0,0488}{0,2882} * 100 = 16,94\%$$

$$U_2 = \frac{0,1483}{0,2882} * 100 = 51,48\%$$

$$U_3 = \frac{0,1697}{0,2882} * 100 = 58,90\%$$

$$U_4 = \frac{0,2882}{0,2882} * 100 = 100\%$$

$$U_5 = \frac{0,1769}{0,2882} * 100 = 61,39\%$$

$$U_6 = \frac{0,1680}{0,2882} * 100 = 58,31\%$$

Tabla 19. Proximidad relativa a solución ideal y ranking

Código	Nivel de rendimiento	Ranking
F1	16,94	6
F2	51,48	5
F3	58,90	3

F4	100,00	1
F5	61,39	2
F6	58,31	4

Fuente: Autor

PROMETHEE**1. Matriz de Decisión Normalizada**

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})}$$

$$r_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})}$$

$r_{11} = \frac{1,325 - 1,325}{1,325 - 0,645} = 0$ $r_{21} = \frac{1,325 - 0,645}{1,325 - 1,265} = 1$ $r_{31} = \frac{1,325 - 0,645}{1,325 - 0,780} = 0,0882$ $r_{41} = \frac{1,325 - 0,645}{1,325 - 0,735} = 0,8015$ $r_{51} = \frac{1,325 - 0,645}{1,325 - 0,745} = 0,8676$ $r_{61} = \frac{1,325 - 0,645}{1,325 - 0,645} = 0,8529$	$r_{21} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $r_{22} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $r_{23} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $r_{24} = \frac{210,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0,8889$ $r_{25} = \frac{211,0 - 206,5}{206,5 - 206,5} = 1$ $r_{26} = \frac{206,5 - 206,5}{211,0 - 206,5} = 0$
$r_{31} = \frac{500,5 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0$ $r_{32} = \frac{675,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0,2030$ $r_{33} = \frac{800,0 - 500,5}{1025,0 - 500,5} = 0,3485$ $r_{34} = \frac{1360,0 - 500,5}{1325,0 - 500,5} = 0,6102$ $r_{35} = \frac{1360,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 0,9593$ $r_{36} = \frac{1360,0 - 500,5}{1360,0 - 500,5} = 1$	$r_{41} = \frac{981,5 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0$ $r_{42} = \frac{1055,5 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,1569$ $r_{43} = \frac{1090,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,2316$ $r_{44} = \frac{1450,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,6798$ $r_{45} = \frac{1450,0 - 981,5}{1435,0 - 981,5} = 1$ $r_{46} = \frac{1435,0 - 981,5}{1450,0 - 981,5} = 0,9680$
$r_{51} = \frac{55,0 - 55,5}{55,0 - 5,5} = 0$ $r_{52} = \frac{55,0 - 13,5}{55,0 - 5,5} = 0,8384$ $r_{53} = \frac{55,0 - 10,0}{55,0 - 5,5} = 0,9091$ $r_{54} = \frac{55,0 - 5,5}{55,0 - 5,5} = 1$	

$r_{55} = \frac{55,0 - 12,0}{55,0 - 5,5} = 0,8687$	
$r_{56} = \frac{55,0 - 13,0}{55,0 - 5,5} = 0,8485$	

2. Cálculo de funciones de preferencia

Si $R_{ij} \leq R_{i'j}$ entonces $p_j(i, i')$

Si $R_{ij} > R_{i'j}$ entonces $p_j(i, i')$

$p_1(1,2) = 0$	$p_1(2,1) = 0$	$p_1(3,1) = 0$	$p_1(4,1) = 0$	$p_1(5,1) = 0$
$p_1(1,3) = 0$	$p_1(2,3) = 0$	$p_1(3,2) = 0$	$p_1(4,2) = 0$	$p_1(5,2) = 0$
$p_1(1,4) = 0$	$p_1(2,4) = 0$	$p_1(3,4) = 0$	$p_1(4,3) = 0$	$p_1(5,3) = 0$
$p_1(1,5) = 0$	$p_1(2,5) = 0$	$p_1(3,5) = 0$	$p_1(4,5) = 0$	$p_1(5,4) = 0$
$p_1(1,6) = 0$	$p_1(2,6) = 0,8889$	$p_1(3,6) = 0$	$p_1(4,6) = 0$	$p_1(5,6) = 0$

$p_2(1,2) = 1$	$p_2(2,1) = 0$	$p_2(3,1) = 0,2030$	$p_2(4,1) = 0,1569$	$p_2(5,1) = 0,8384$
$p_2(1,3) = 0,9118$	$p_2(2,3) = 0$	$p_2(3,2) = 0$	$p_2(4,2) = 0$	$p_2(5,2) = 0$
$p_2(1,4) = 0,1985$	$p_2(2,4) = 0$	$p_2(3,4) = 0$	$p_2(4,3) = 0$	$p_2(5,3) = 0$
$p_2(1,5) = 0,1324$	$p_2(2,5) = 0$	$p_2(3,5) = 0$	$p_2(4,5) = 0$	$p_2(5,4) = 0$
$p_2(1,6) = 0,1471$	$p_2(2,6) = 0,8889$	$p_2(3,6) = 0$	$p_2(4,6) = 0$	$p_2(5,6) = 0$

$p_3(1,2) = 0,0882$	$p_3(2,1) = 0$	$p_3(3,1) = 0,3485$	$p_3(4,1) = 0,2316$	$p_3(5,1) = 0,9091$
$p_3(1,3) = 0$	$p_3(2,3) = 0$	$p_3(3,2) = 0,1454$	$p_3(4,2) = 0,0747$	$p_3(5,2) = 0,0707$
$p_3(1,4) = 0$	$p_3(2,4) = 0$	$p_3(3,4) = 0$	$p_3(4,3) = 0$	$p_3(5,3) = 0$
$p_3(1,5) = 0$	$p_3(2,5) = 0$	$p_3(3,5) = 0$	$p_3(4,5) = 0$	$p_3(5,4) = 0$
$p_3(1,6) = 0$	$p_3(2,6) = 0,8889$	$p_3(3,6) = 0$	$p_3(4,6) = 0$	$p_3(5,6) = 0,0606$

$p_4(1,2) = 0,8015$	$p_4(2,1) = 0$	$p_4(3,1) = 0,6102$	$p_4(4,1) = 0,6798$	$p_4(5,1) = 1$
$p_4(1,3) = 0$	$p_4(2,3) = 0$	$p_4(3,2) = 0,4072$	$p_4(4,2) = 0,5229$	$p_4(5,2) = 0,1616$
$p_4(1,4) = 0,7132$	$p_4(2,4) = 0$	$p_4(3,4) = 0$	$p_4(4,3) = 0,4482$	$p_4(5,3) = 0,0909$
$p_4(1,5) = 0$	$p_4(2,5) = 0$	$p_4(3,5) = 0$	$p_4(4,5) = 0$	$p_4(5,4) = 0$
$p_4(1,6) = 0$	$p_4(2,6) = 0,8889$	$p_4(3,6) = 0$	$p_4(4,6) = 0$	$p_4(5,6) = 0,1515$

$p_5(1,2)$ $= 0,8676$ $p_5(1,3) = 0$ $p_5(1,4)$ $= 0,7794$ $p_5(1,5)$ $= 0,0662$ $p_5(1,6)$ $= 0,0147$	$p_5(2,1)$ $= 0,1111$ $p_5(2,3)$ $= 0,1111$ $p_5(2,4)$ $= 0,1111$ $p_5(2,5) = 0$ $p_5(2,6) = 1$	$p_5(3,1)$ $= 0,9593$ $p_5(3,2)$ $= 0,7563$ $p_5(3,4) =$ $0,3490$ $p_5(3,5) = 0$ $p_5(3,6) = 0$	$p_5(4,1) = 1$ $p_5(4,2)$ $= 0,8431$ $p_5(4,3) =$ $0,7684$ $p_5(4,5) = 0$ $p_5(4,6) =$ $0,0320$	$p_5(5,1)$ $= 0,8687$ $p_5(5,2)$ $= 0,0303$ $p_5(5,3) = 0$ $p_5(5,4) = 0$ $p_5(5,6)$ $= 0,0202$
--	--	--	--	--

$p_6(1,2)$ $= 0,8529$ $p_5(1,3) = 0$ $p_5(1,4)$ $= 0,7647$ $p_5(1,5)$ $= 0,0515$ $p_5(1,6) = 0$	$p_6(2,1) = 0$ $p_6(2,3) = 0$ $p_6(2,4) = 0$ $p_6(2,5) = 0$ $p_6(2,6) = 0$	$p_6(3,1) = 1$ $p_6(3,2)$ $= 0,7970$ $p_6(3,4) =$ $0,3898$ $p_6(3,5) =$ $0,0407$ $p_6(3,6) = 0$	$p_6(4,1)$ $= 0,9680$ $p_6(4,2)$ $= 0,8111$ $p_6(4,3)$ $= 0,7364$ $p_6(4,5) = 0$ $p_6(4,6) = 0$	$p_6(5,1)$ $= 0,8725$ $p_6(5,2)$ $= 0,0101$ $p_6(5,3) = 0$ $p_6(5,4) = 0$ $p_6(5,6) = 0$
--	--	--	--	--

ALTERNATIVA	C1	C2	C3	C4	C5
$p_1(1,2)$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_1(1,3)$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_1(1,4)$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_1(1,5)$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_1(1,6)$	0,0000	0,8889	0,0000	0,0000	0,0000
$p_2(2,1)$	1,0000	0,0000	0,2030	0,1569	0,8384
$p_2(2,3)$	0,9118	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_2(2,4)$	0,1985	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_2(2,5)$	0,1324	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_2(2,6)$	0,1471	0,8889	0,0000	0,0000	0,0000
$p_3(3,1)$	0,0882	0,0000	0,3485	0,2316	0,9091
$p_3(3,2)$	0,0000	0,0000	0,1454	0,0747	0,0707
$p_3(3,4)$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$p_3(3,5)$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0404
$p_3(3,6)$	0,0000	0,8889	0,0000	0,0000	0,0606
$p_4(4,1)$	0,8015	0,0000	0,6102	0,6798	1,0000
$p_4(4,2)$	0,0000	0,0000	0,4072	0,5229	0,1616
$p_4(4,3)$	0,7132	0,0000	0,2618	0,4482	0,0909
$p_4(4,5)$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1313
$p_4(4,6)$	0,0000	0,8889	0,0000	0,0000	0,1515
$p_5(5,1)$	0,8676	0,1111	0,9593	1,0000	0,8687
$p_5(5,2)$	0,0000	0,1111	0,7563	0,8431	0,0303
$p_5(5,3)$	0,7794	0,1111	0,6108	0,7684	0,0000
$p_5(5,4)$	0,0662	0,1111	0,3490	0,3202	0,0000
$p_5(5,6)$	0,0147	1,0000	0,0000	0,0320	0,0202
$p_6(6,1)$	0,8529	0,0000	1,0000	0,9680	0,8485
$p_6(6,2)$	0,0000	0,0000	0,7970	0,8111	0,0101

$p_6(6,3)$	0,7647	0,0000	0,6515	0,7364	0,0000
$p_6(6,4)$	0,0515	0,0000	0,3898	0,2882	0,0000
$p_6(6,5)$	0,0000	0,0000	0,0407	0,0000	0,0000

3. Cálculo de funciones agregadas de preferencia

$$\Pi(i, i') = \left[\frac{\sum_{j=1}^m W_j * P_j(i, i')}{\sum_{j=1}^m W_j} \right]$$

$$\sum_{j=1}^m W_j = 0,0970 + 0,0001 + 0,1347 + 0,0267 + 0,7415 = 1$$

$$\Pi(1,1) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\Pi(1,2) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\Pi(1,3) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\Pi(1,4) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\Pi(1,5) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\begin{aligned} \Pi(1,6) &= \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0,8889 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] \\ &= 0,0001 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi(2,1) &= \left[\frac{0,0970 * 1 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,2030 + 0,0267 * 0,1569 + 0,7415 * 0,8384}{1} \right] \\ &= 0,7502 \end{aligned}$$

$$\Pi(2,2) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\begin{aligned} \Pi(2,3) &= \left[\frac{0,0970 * 0,9118 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] \\ &= 0,0884 \end{aligned}$$

$$\Pi(2,4) = \left[\frac{0,0970 * 0,1985 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right]$$

$$= 0,0193$$

$$\Pi(2,5) = \left[\frac{0,0970 * 0,1324 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right]$$

$$= 0,0128$$

$$\Pi(2,6) = \left[\frac{0,0970 * 0,1471 + 0,0001 * 0,8889 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right]$$

$$= 0,0143$$

$$\Pi(3,1)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0,0882 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,3485 + 0,0267 * 0,2316 + 0,7415 * 0,9091}{1} \right]$$

$$= 0,7358$$

$$\Pi(3,2)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,1454 + 0,0267 * 0,0747 + 0,7415 * 0,0707}{1} \right]$$

$$= 0,0740$$

$$\Pi(3,3) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\Pi(3,4) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,3485 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\Pi(3,5) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0,0404}{1} \right]$$

$$= 0,0300$$

$$\Pi(3,6) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0,8889 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0,0606}{1} \right]$$

$$= 0,0450$$

$$\Pi(4,1)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0,8015 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,6102 + 0,0267 * 0,6798 + 0,7415 * 1}{1} \right]$$

$$= 0,9196$$

$$\Pi(4,2)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,4072 + 0,0267 * 0,5229 + 0,7415 * 0,1616}{1} \right]$$

$$= 0,1887$$

$$\Pi(4,3)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0,7132 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,2618 + 0,0267 * 0,4482 + 0,7415 * 0,0909}{1} \right]$$

$$= 0,1838$$

$$\Pi(4,4) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\Pi(4,5) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0,1313}{1} \right]$$

$$= 0,0974$$

$$\Pi(4,6) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0,8889 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0,1515}{1} \right]$$

$$= 0,1124$$

$$\Pi(5,1)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0,8676 + 0,0001 * 0,1111 + 0,1347 * 0,9593 + 0,0267 * 1 + 0,7415 * 0,8687}{1} \right]$$

$$= 0,8843$$

$$\Pi(5,2)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0,1111 + 0,1347 * 0,7563 + 0,0267 * 0,8431 + 0,7415 * 0,0303}{1} \right]$$

$$= 0,1469$$

$$\Pi(5,3)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0,7794 + 0,0001 * 0,1111 + 0,1347 * 0,6108 + 0,0267 * 0,7684 + 0,7415 * 0}{1} \right]$$

$$= 0,1785$$

$$\Pi(5,4)$$

$$= \left[\frac{0,0970 * 0,0662 + 0,0001 * 0,1111 + 0,1347 * 0,3490 + 0,0267 * 0,3202 + 0,7415 * 0}{1} \right]$$

$$= 0,0620$$

$$\Pi(5,5) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$$\begin{aligned} \Pi(5,6) &= \left[\frac{0,0970 * 0,0147 + 0,0001 * 1 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0,0320 + 0,7415 * 0,0202}{1} \right] \\ &= 0,0173 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi(6,1) &= \left[\frac{0,0970 * 0,8529 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 1 + 0,0267 * 0,9680 + 0,7415 * 0,8485}{1} \right] \\ &= 0,8725 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi(6,2) &= \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,7970 + 0,0267 * 0,8111 + 0,7415 * 0,0101}{1} \right] \\ &= 0,1366 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi(6,3) &= \left[\frac{0,0970 * 0,7647 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,6515 + 0,0267 * 0,7364 + 0,7415 * 0}{1} \right] \\ &= 0,1817 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi(6,4) &= \left[\frac{0,0970 * 0,0515 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,3898 + 0,0267 * 0,2882 + 0,7415 * 0}{1} \right] \\ &= 0,0652 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi(6,5) &= \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0,0407 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] \\ &= 0,0055 \end{aligned}$$

$$\Pi(6,6) = \left[\frac{0,0970 * 0 + 0,0001 * 0 + 0,1347 * 0 + 0,0267 * 0 + 0,7415 * 0}{1} \right] = 0$$

$\Pi(1,1) = 0,0000$	$\Pi(2,1) = 0,7502$	$\Pi(3,1) = 0,7358$
$\Pi(1,2) = 0,0000$	$\Pi(2,2) = 0,0000$	$\Pi(3,2) = 0,0740$
$\Pi(1,3) = 0,0000$	$\Pi(2,3) = 0,0884$	$\Pi(3,3) = 0,0000$
$\Pi(1,4) = 0,0000$	$\Pi(2,4) = 0,0193$	$\Pi(3,4) = 0,0000$
$\Pi(1,5) = 0,0000$	$\Pi(2,5) = 0,0128$	$\Pi(3,5) = 0,0300$

$\Pi(1,6) = 0,0001$	$\Pi(2,6) = 0,0143$	$\Pi(3,6) = 0,0450$
$\Pi(4,1) = 0,9196$	$\Pi(5,1) = 0,8843$	$\Pi(6,1) = 0,8725$
$\Pi(4,2) = 0,1887$	$\Pi(5,2) = 0,1469$	$\Pi(6,2) = 0,1366$
$\Pi(4,3) = 0,1838$	$\Pi(5,3) = 0,1785$	$\Pi(6,3) = 0,1817$
$\Pi(4,4) = 0,0000$	$\Pi(5,4) = 0,0620$	$\Pi(6,4) = 0,0652$
$\Pi(4,5) = 0,0974$	$\Pi(5,5) = 0,0000$	$\Pi(6,5) = 0,0055$
$\Pi(4,6) = 0,1124$	$\Pi(5,6) = 0,0173$	$\Pi(6,6) = 0,0000$

$$\Pi_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0001 \\ 0,7502 & 0 & 0,0884 & 0,0193 & 0,0128 & 0,0143 \\ 0,7358 & 0,0740 & 0 & 0 & 0,0300 & 0,0450 \\ 0,9196 & 0,1887 & 0,1838 & 0 & 0,0974 & 0,1124 \\ 0,8843 & 0,1469 & 0,1785 & 0,0620 & 0 & 0,0173 \\ 0,8725 & 0,1366 & 0,1817 & 0,0652 & 0,0055 & 0 \end{bmatrix}$$

4. Determinación de flujos de entrada y salida

$$\phi^+(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \Pi(i, i')$$

$$\phi^+(1) = \frac{1}{6-1} [0 + 0 + 0 + 0 + 0,0001] = 0,0001$$

$$\phi^+(2) = \frac{1}{6-1} [0,7502 + 0,0884 + 0,0193 + 0,0128 + 0,0143] = 0,1770$$

$$\phi^+(3) = \frac{1}{6-1} [0,7358 + 0,0740 + 0 + 0,0300 + 0,0450] = 0,1769$$

$$\phi^+(4) = \frac{1}{6-1} [0,9196 + 0,1887 + 0,1838 + 0,0974 + 0,1124] = 0,3004$$

$$\phi^+(5) = \frac{1}{6-1} [0,8843 + 0,1469 + 0,1785 + 0,0620 + 0,0173] = 0,2578$$

$$\phi^+(6) = \frac{1}{6-1} [0,8725 + 0,1366 + 0,1817 + 0,0652 + 0,0055] = 0,2523$$

$$\phi^{-}(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \Pi(i, i')$$

$$\phi^{-}(1) = \frac{1}{6-1} [0,7502 + 0,7358 + 0,9196 + 0,8843 + 0,8725] = 0,8325$$

$$\phi^{-}(2) = \frac{1}{6-1} [0 + 0,0740 + 0,1887 + 0,1469 + 0,1366] = 0,1092$$

$$\phi^{-}(3) = \frac{1}{6-1} [0 + 0,0884 + 0,1838 + 0,1785 + 0,1817] = 0,1265$$

$$\phi^{-}(4) = \frac{1}{6-1} [0 + 0,0193 + 0 + 0,0620 + 0,0652] = 0,0293$$

$$\phi^{-}(5) = \frac{1}{6-1} [0 + 0,0128 + 0,0300 + 0,0974 + 0,0055] = 0,0291$$

$$\phi^{-}(6) = \frac{1}{6-1} [0,0001 + 0,0143 + 0,0450 + 0,1124 + 0,0173] = 0,0378$$

$$\phi(i) = \phi^{+}(i) - \phi^{-}(i)$$

$$\phi(1) = 0,00001 - 0,8325 = -0,8324$$

$$\phi(2) = 0,1770 - 0,1092 = 0,0678$$

$$\phi(3) = 0,1769 - 0,1265 = 0,0505$$

$$\phi(4) = 0,3004 - 0,0293 = 0,2711$$

$$\phi(5) = 0,2578 - 0,0291 = 0,2287$$

$$\phi(6) = 0,2523 - 0,0378 = 0,2145$$

Tabla 20. Ranking PROMETHEE

Alternativa	ϕ^{+}	ϕ^{-}	$\phi^{+}-\phi^{-}$	Ranking
F1	0,00001	0,8325	-0,8324	6
F2	0,1770	0,1092	0,0678	4
F3	0,1769	0,1265	0,0505	5

F4	0,3004	0,0293	0,2711	1
F5	0,2578	0,0291	0,2287	2
F6	0,2523	0,0378	0,2145	3

Fuente: Autor

VIKOR

1. Matriz de Decisión Normalizada

Se aplica el mismo procedimiento para el método Topsis

Para C1 (menor es mejor)

$$f_1^{max} = 0,0421 \quad f_1^{min} = 0,0703$$

Para C2 (mayor es mejor)

$$f_2^{max} = 0,00002553 \quad f_2^{min} = 0,00002499$$

Para C3 (mayor es mejor)

$$f_3^{max} = 0,0748 \quad f_3^{min} = 0,0275$$

Para C4 (mayor es mejor)

$$f_4^{max} = 0,0128 \quad f_4^{min} = 0,0087$$

Para C5 (mayor es mejor)

$$f_5^{max} = 0,6740 \quad f_5^{min} = 0,0665$$

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_j(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})}$$

$$U_{11} = \frac{0,0970(0,0421 - 0,0421)}{(0,0421 - 0,0703)} = 0$$

$$U_{12} = \frac{0,0001(0,00002553 - 0,00002547)}{(0,00002553 - 0,00002499)} = 0,0000691$$

$$U_{13} = \frac{0,1347(0,0748 - 0,0275)}{(0,0748 - 0,0275)} = 0,1347$$

$$U_{14} = \frac{0,0267(0,0128 - 0,0087)}{(0,0128 - 0,0087)} = 0,026744$$

$$U_{15} = \frac{0,7415(0,6740 - 0,0665)}{(0,6740 - 0,0665)} = 0,7415$$

$$U_{21} = \frac{0,0970(0,0421 - 0,0703)}{(0,0421 - 0,0703)} = 0,0970$$

$$U_{22} = \frac{0,0001(0,00002553 - 0,00002547)}{(0,00002553 - 0,00002499)} = 0,0000691$$

$$U_{23} = \frac{0,1347(0,0748 - 0,0371)}{(0,0748 - 0,0275)} = 0,1074$$

$$U_{24} = \frac{0,0267(0,0128 - 0,0093)}{(0,0128 - 0,0087)} = 0,022548$$

$$U_{25} = \frac{0,7415(0,6740 - 0,5758)}{(0,6740 - 0,0665)} = 0,1198$$

$$U_{31} = \frac{0,0970(0,0421 - 0,0446)}{(0,0421 - 0,0703)} = 0,0086$$

$$U_{32} = \frac{0,0001(0,00002535 - 0,00002547)}{(0,00002553 - 0,00002499)} = 0,0000691$$

$$U_{33} = \frac{0,1347(0,0748 - 0,0440)}{(0,0748 - 0,0275)} = 0,0878$$

$$U_{34} = \frac{0,0267(0,0128 - 0,0097)}{(0,0128 - 0,0087)} = 0,020550$$

$$U_{35} = \frac{0,7415(0,6740 - 0,6187)}{(0,6740 - 0,0665)} = 0,0674$$

$$U_{41} = \frac{0,0970(0,0421 - 0,0647)}{(0,0421 - 0,0703)} = 0,0777$$

$$U_{42} = \frac{0,0001(0,00002553 - 0,00002547)}{(0,00002553 - 0,00002499)} = 0,0000691$$

$$U_{43} = \frac{0,1347(0,0748 - 0,0564)}{(0,0748 - 0,0275)} = 0,0525$$

$$U_{44} = \frac{0,0267(0,0128 - 0,0115)}{(0,0128 - 0,0087)} = 0,008563$$

$$U_{45} = \frac{0,7415(0,6740 - 0,6740)}{(0,6740 - 0,0665)} = 0$$

$$U_{51} = \frac{0,0970(0,0421 - 0,0665)}{(0,0421 - 0,0703)} = 0,0842$$

$$U_{52} = \frac{0,0001(0,00002553 - 0,00002553)}{(0,00002553 - 0,00002499)} = 0$$

$$U_{53} = \frac{0,1347(0,0748 - 0,0729)}{(0,0748 - 0,0275)} = 0,0055$$

$$U_{54} = \frac{0,0267(0,0128 - 0,0128)}{(0,0128 - 0,0087)} = 0$$

$$U_{55} = \frac{0,7415(0,6740 - 0,5942)}{(0,6740 - 0,0665)} = 0,0974$$

$$U_{61} = \frac{0,0970(0,0421 - 0,0661)}{(0,0421 - 0,0703)} = 0,0827$$

$$U_{62} = \frac{0,0001(0,00002553 - 0,00002499)}{(0,00002553 - 0,00002499)} = 0,0000622$$

$$U_{63} = \frac{0,1347(0,0748 - 0,0748)}{(0,0748 - 0,0275)} = 0$$

$$U_{64} = \frac{0,0267(0,0128 - 0,0127)}{(0,0128 - 0,0087)} = 0,000856$$

$$U_{65} = \frac{0,7415(0,6740 - 0,5819)}{(0,6740 - 0,0665)} = 0,1123$$

$$U_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0,0000691 & 0,1347 & 0,026744 & 0,7415 \\ 0,0970 & 0,0000691 & 0,1074 & 0,022548 & 0,1198 \\ 0,0086 & 0,0000691 & 0,0878 & 0,020550 & 0,0674 \\ 0,0777 & 0,0000691 & 0,0525 & 0,008563 & 0 \\ 0,0842 & 0 & 0,0055 & 0 & 0,0974 \\ 0,0827 & 0,0000622 & 0 & 0,000856 & 0,1123 \end{bmatrix}$$

$$U_1 = 0 + 0,0000691 + 0,1347 + 0,026744 + 0,7415 = 0,9030$$

$$U_2 = 0,0970 + 0,0000691 + 0,1074 + 0,022548 + 0,1198 = 0,3468$$

$$U_3 = 0,0086 + 0,0000691 + 0,0878 + 0,020550 + 0,0674 = 0,1843$$

$$U_4 = 0,0777 + 0,0000691 + 0,0525 + 0,008563 + 0 = 0,1388$$

$$U_5 = 0,0842 + 0 + 0,0055 + 0 + 0,0974 = 0,1870$$

$$U_6 = 0,0827 + 0,0000622 + 0 + 0,000856 + 0,1123 = 0,1960$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{W_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right]$$

$$R_1 = 0,7415$$

$$R_2 = 0,1198$$

$$R_3 = 0,0878$$

$$R_4 = 0,0777$$

$$R_5 = 0,0974$$

$$R_6 = 0,1123$$

Generalmente $\alpha = 0,5$

$$V_i = \frac{\alpha(U_i - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} + \frac{(1 - \alpha)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})}$$

$$V_1 = \frac{0,5 * (0,9030 - 0,1388)}{(0,9030 - 0,1388)} + \frac{(1 - 0,5)(0,7415 - 0,0777)}{(0,7415 - 0,0777)} = 1$$

$$V_2 = \frac{0,5 * (0,3468 - 0,1388)}{(0,9030 - 0,1388)} + \frac{(1 - 0,5)(0,1198 - 0,0777)}{(0,7415 - 0,0777)} = 0,1678$$

$$V_3 = \frac{0,5 * (0,1843 - 0,1388)}{(0,9030 - 0,1388)} + \frac{(1 - 0,5)(0,0878 - 0,0777)}{(0,7415 - 0,0777)} = 0,0373$$

$$V_4 = \frac{0,5 * (0,1388 - 0,1388)}{(0,9030 - 0,1388)} + \frac{(1 - 0,5)(0,0777 - 0,0777)}{(0,7415 - 0,0777)} = 0$$

$$V_5 = \frac{0,5 * (0,1870 - 0,1388)}{(0,9030 - 0,1388)} + \frac{(1 - 0,5)(0,0974 - 0,0777)}{(0,7415 - 0,0777)} = 0,0463$$

$$V_6 = \frac{0,5 * (0,1960 - 0,1388)}{(0,9030 - 0,1388)} + \frac{(1 - 0,5)(0,1123 - 0,0777)}{(0,7415 - 0,0777)} = 0,0635$$

Tabla 21. Ranking (VIKOR)

Alternativa	V_i	Ranking
F1	1,0000	6
F2	0,1678	5
F3	0,0373	2
F4	0,0000	1
F5	0,0463	3
F6	0,0635	4

Fuente: Autor

Simulación dinámica de estructura lateral

Para realizar el proceso de simulación, es necesario definir las características geométricas y de forma del objeto de estudio, no hay norma estándar para definir estos parámetros para los segmentos estructurales, esto se debe a que cada vehículo posee un diseño que cada

fabricante de vehículos define en función de los requerimientos técnicos, tecnológicos, económicos, etc., que puedan emplear en cada modelo en el mercado.

Para la simulación de la estructura, se desarrolló un modelado 3D basado en los estudios de (Grabner & Nothhaft, 2006) en el software Solidworks, empleando operaciones de superficie, sobre un bosquejo de líneas en el espacio tridimensional, unidas entre sí, de manera que se entrelacen y parchen los espacios intermedios, obteniendo un patrón de superficies que permiten obtener la forma y geometría del segmento estructural que será objeto del análisis. Se diseñó también una barrera deformable según los requerimientos de seguridad emitidos por la (IIHS, 2014), empleando un elemento cuadrilátero de medidas de 1676 mm x 759 x 381 mm .

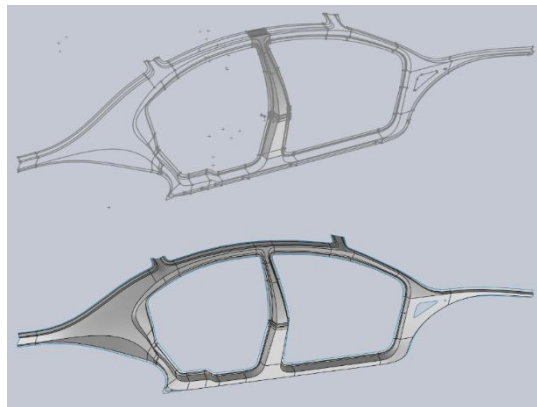


Figura 22. Proceso de recubrimiento mediante operaciones de superficie.

Fuente: Autor

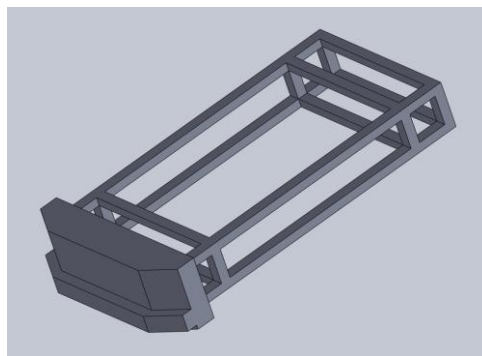


Figura 23. Modelo 3D para la barrera deformable.

Fuente: Autor

Posterior al desarrollo de la geometría de los modelos 3D, se procede a simular en el entorno del software Ansys free Student, para lo cual se exportaron los modelos a formato STEP para facilitar el empleo y reconocimiento de cada una de las superficies y aristas, de manera que se pueda colocar un espesor determinado, además de colocar las propiedades de los materiales determinados mediante los métodos multicriterio, para poder evaluar el comportamiento de los elementos y comprobar si los resultados obtenidos son acertados.

Simulación para Acero de baja aleación 8650 con espesor de 1 mm

Se carga el módulo de Explicit Dynamics para evaluar las condiciones de impacto o contacto de los elementos durante una cantidad de tiempo finita.

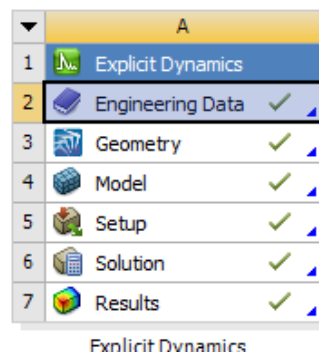


Figura 24. Módulo de Explicit Dynamics

Se asigna el material de Acero de baja aleación 8650 importándolo de CES Edupack directamente en Ansys, dentro del cual ya vienen definidas las propiedades del material, entre las que se encuentran: densidad de $7849.8 \frac{kg}{m^3}$, módulo de Young de $2.1094e^{11}Pa$, módulo de poisson de 0.28996, modulo volumétrico $1.6738e^{11} Pa$, módulo de cizallamiento de $8.1763e^{10} Pa$

Tabla 22. Propiedades del acero de baja aleación 8650

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Low alloy steel, AISI 8650, tempered at 425°C & oil quenched			Granta Material name: Low alloy steel, AISI 8650, tempered at 425°C & oil quenched Model Type: Linear, isotropic, thermal, plastic Assignment made by: Assignment Date/Time: 2016-08-01T00:00:00-05:00 Database key: Table name: MaterialUniverse Record guid:
	A	B	C	
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7849,8	kg m^-3	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus...		
5	Young's Modulus	2,1094E+11	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,28996		
7	Bulk Modulus	1,6738E+11	Pa	
8	Shear Modulus	8,1763E+10	Pa	

Fuente: Autor

Se cargan los modelos 3D dentro del módulo Explicit dynamics, y se procede a configurar el ambiente de simulación.

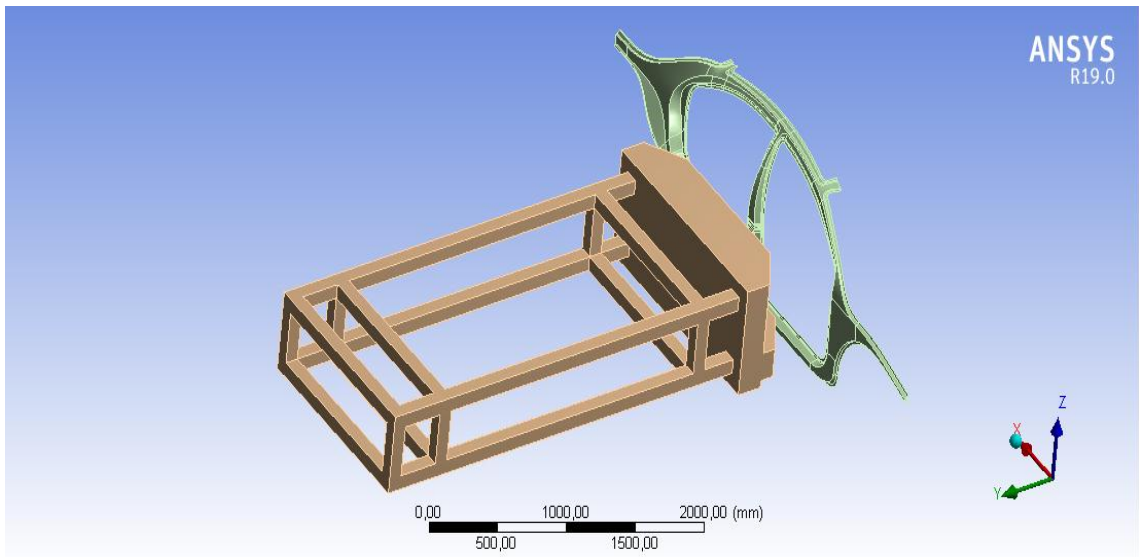


Figura 25. Modelos tridimensionales cargados en el entorno de simulación de Ansys.

Fuente: Autor

Se colocan restricciones en los extremos de la sección lateral, describiendo la condición de amortiguamiento o disipación hacia los elementos más lejanos de la zona de impacto.

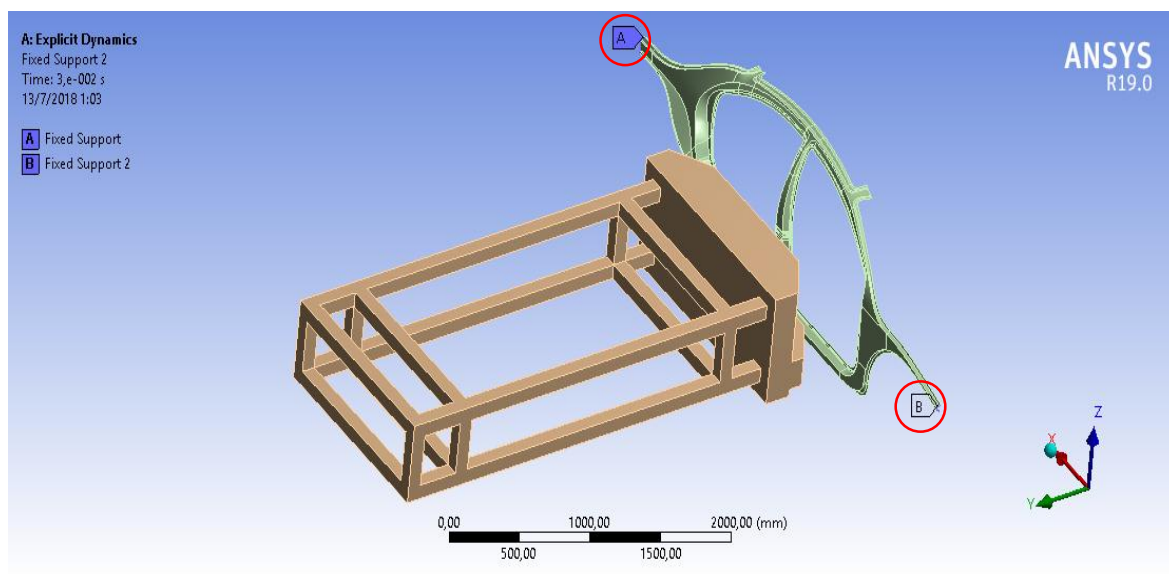


Figura 26. Restricción de elementos en zonas de menor afectación al impacto.

Fuente: Autor

Se ingresa como parámetro de control la velocidad de 50 km/h, la cual actúa en sentido contrario al eje Y, paralelo al segmento estructural.

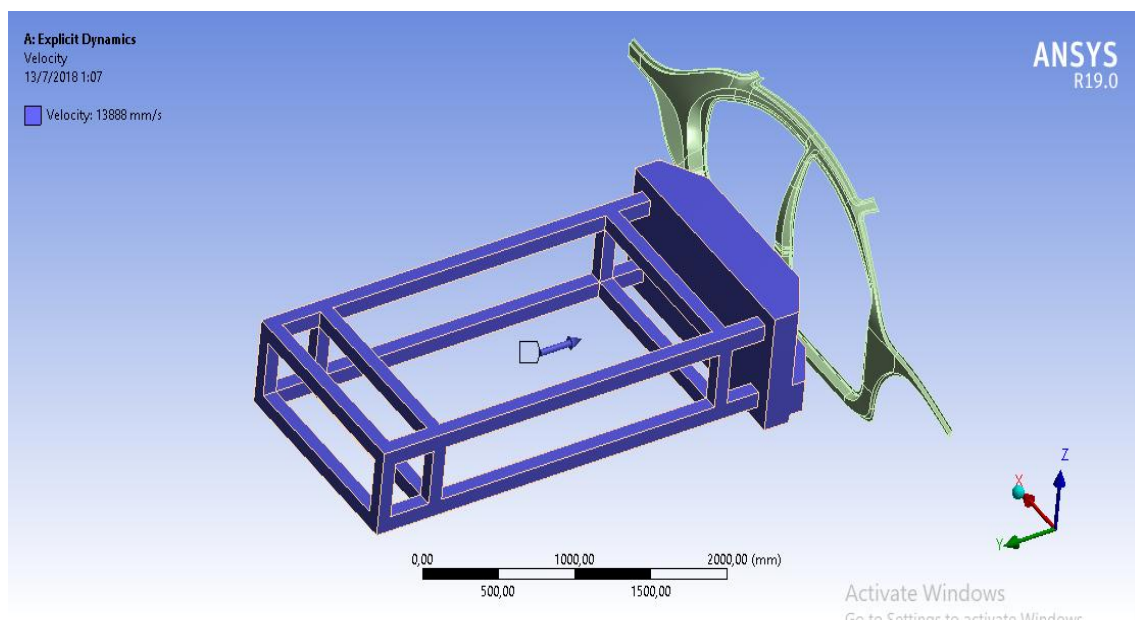


Figura 27. Definición de parámetro de control – velocidad:50 km/h

Fuente: Autor

Para el proceso de mallado se emplearon dos mallas, una de 35 mm correspondiente a la sección estructural, y una de 50 mm perteneciente a la barrera deformable, se estimaron estos valores en función de la capacidad computacional requerida para generar los resultados de la simulación.

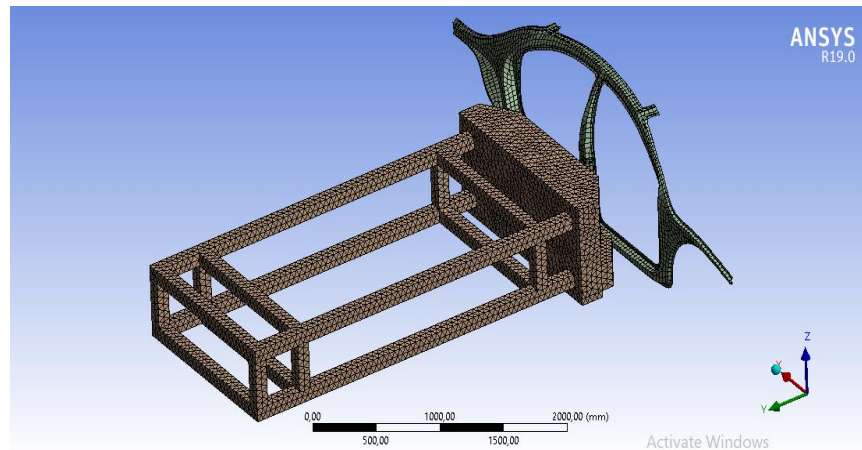


Figura 28. Mallado de modelos 3D

Fuente: Autor

La deformación total del segmento estructural debido a la condición de velocidad de 50 km/h, se comporta de acuerdo a la estimado, donde el segmento central se encarga de absorber la energía produciendo la deformación en esa área, alcanzando un valor máximo de 33 cm.

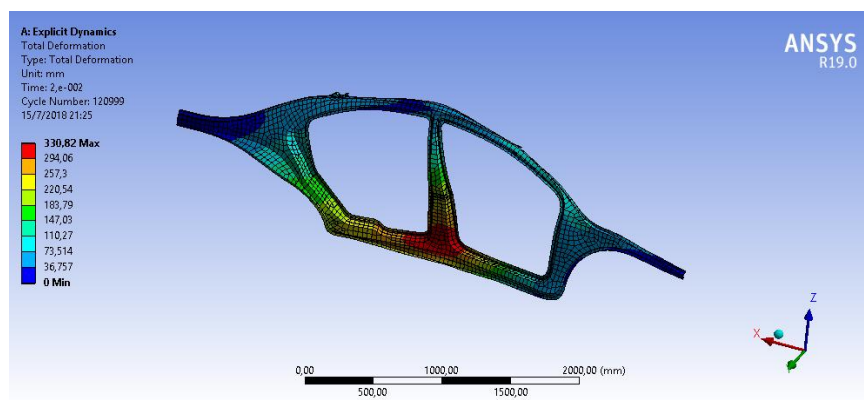


Figura 29. Deformaciones obtenidas en sección lateral (acero de baja aleación 8650)

Fuente: Autor

El esfuerzo máximo es provocado en la unión del pilar central con el segmento inferior lateral, obteniéndose un valor de 1525.5 MPa, el comportamiento no es totalmente crítico, se puede observar que de forma global se mantienen rangos admisibles de tensión entre 600-1000 Mpa, sin producir el fallo del material.

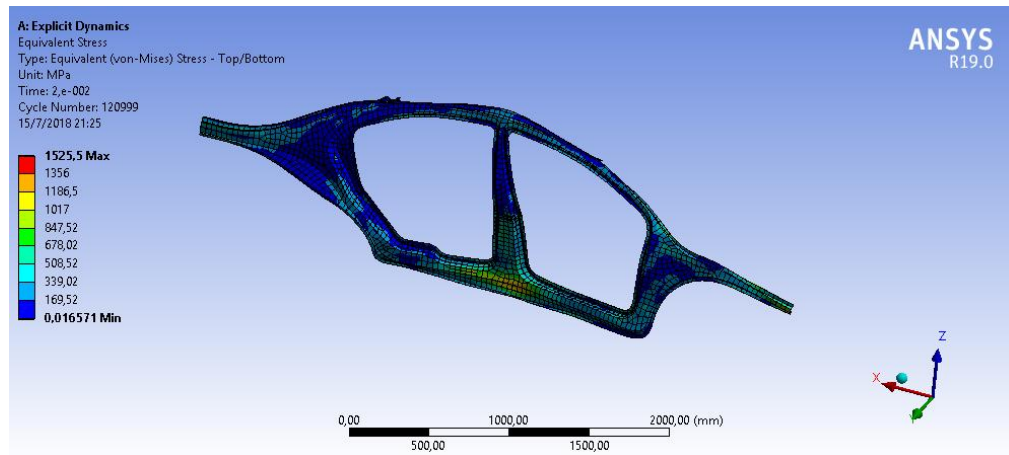


Figura 30. Esfuerzos obtenidos en sección lateral (acero de baja aleación 8650)

Fuente: Autor

Simulación para Acero de baja aleación 8740 con espesor de 1 mm

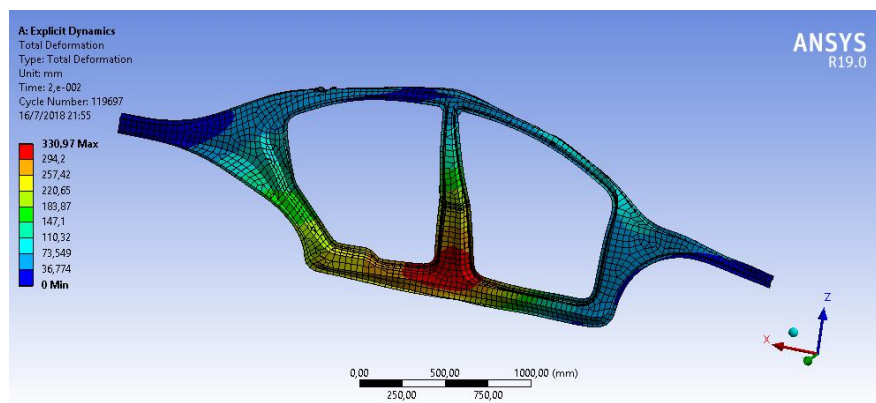
Se asigna el material de Acero de baja aleación 8740 importándolo de CES Edupack directamente en Ansys, dentro del cual ya vienen definidas las propiedades del material, entre las que se encuentran: densidad de $7849.8 \frac{kg}{m^3}$, módulo de Young de $2.0643e^{11}Pa$, módulo de poisson de 0.28996, modulo volumétrico $1.6738e^{11} Pa$, módulo de cizallamiento de $8.0013e^{10} Pa$

Tabla 23. Propiedades del acero de baja aleación 8740

	A	B	C	D
1	Data Source		Location	Description
Outline of LOW ALLOY 8740 6				
	A	B	C	D
1	Contents of LOW ALLOY 8740 6	Add		Source
3	Low alloy steel, AISI 8740, tempered at 425°C & oil quenched			E:\TESIS\MATERIALES CES EDUPACK TESIS\LOW ALLOY 8740 6.xml
	A	B	C	
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7849,8	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Isotropic Elasticity			
6	Derive from	Young's Modulus and Poiss...		
7	Young's Modulus	2,0643E+11	Pa	
8	Poisson's Ratio	0,28996		
9	Bulk Modulus	1,638E+11	Pa	
10	Shear Modulus	8,0013E+10	Pa	
11	Isotropic Thermal Conductivity	43,875	W m ⁻¹ K ⁻¹	
12	Specific Heat, C _p	467,33	J kg ⁻¹ K ⁻¹	

Fuente: Autor

Manteniendo los parámetros de sujeciones, velocidad de impacto y mallado se obtienen que la deformación total del segmento estructural debido a la condición de velocidad de 50 km/h, se comporta de acuerdo a la estimado, donde el segmento central se encarga de absorber la energía produciendo la deformación en esa área, alcanzando un valor máximo de 33 cm.

**Figura 31.** Deformaciones obtenidas en sección lateral (acero de baja aleación 8740)

Fuente: Autor

El esfuerzo máximo es provocado en la unión del pilar central con el segmento superior lateral, obteniéndose un valor de 1489 MPa, el comportamiento se mantiene estable de forma global sin embargo aumenta la concentración de esfuerzos considerablemente en la zona de impacto.

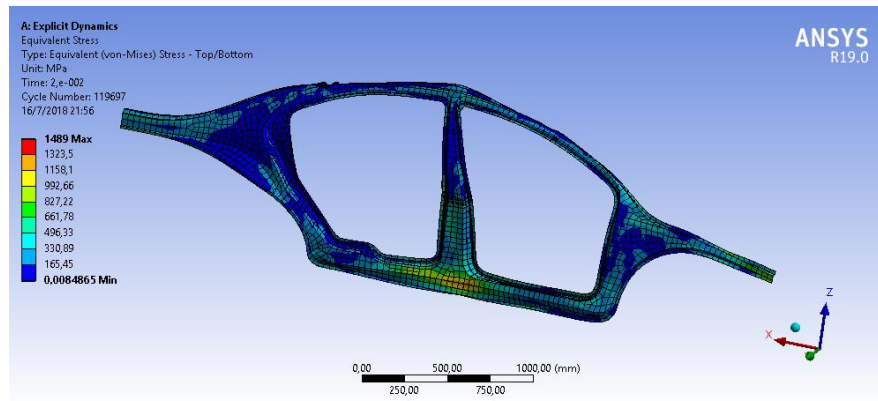


Figura 32. Esfuerzos obtenidos en sección lateral (acero de baja aleación 8740)

Fuente: Autor

Simulación para Acero martensítico, acero de plasticidad inducida, acero de fase doble, acero de fase compleja con espesor de 1 mm

Dentro de la configuración empleada para estos materiales se encuentra que los parámetros empleados para la simulación contiene los mismos valores asignados, por lo que se realizará solo una simulación, obteniéndose valores de: densidad de $7849.8 \frac{kg}{m^3}$, módulo de Young de $2.1e^{11}Pa$, módulo de poisson de 0.3, modulo volumétrico $1.75e^{11} Pa$, módulo de cizallamiento de $8.0769e^{10} Pa$

Tabla 24. Propiedades del acero Martensítico YS1200

	A	B	C	D
1	Contents of MARTENSITIC 4	Add		Source
3	 Martensitic steel, YS1200 (hot rolled)			E:\TESIS\MATERIALES CES EDUPACK TESIS\MARTENS

Properties of Outline Row 11: Martensitic steel, YS1200 (hot rolled)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7849,8	kg m ⁻³
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus an...	
5	Young's Modulus	2,1E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
8	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
9	 Specific Heat, C _p	472,76	J kg ⁻¹ K ⁻¹

Fuente: Autor

Tabla 25. Propiedades del acero de plasticidad inducida YS500

	A	B	C	D
1	Contents of TWINNING INDUCED 1	Add		Source
3	 Twinning induced plasticity steel, YS500 (cold rolled)			E:\TESIS\MATERIALES CES EDUPACK TESIS\TWINNIN

Properties of Outline Row 3: Twinning induced plasticity steel, YS500 (cold rolled)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7849,8	kg m ⁻³
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus an...	
5	Young's Modulus	2,1E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
8	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
9	 Specific Heat, C _p	472,76	J kg ⁻¹ K ⁻¹

Fuente: Autor

Tabla 26. Propiedades del acero de fase doble YS600

	A	B	C	D
1	Contents of DUAL PHASE 2	Add		Source
3	 Dual phase steel, YS600 (cold rolled)			E:\TESIS\MATERIALES CES EDUPACK TESIS\DUAL PHA

Properties of Outline Row 3: Dual phase steel, YS600 (cold rolled)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7849,8	kg m ⁻³
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus an...	
5	Young's Modulus	2,1E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
8	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
9	 Specific Heat, C _p	472,76	J kg ⁻¹ K ⁻¹

Fuente: Autor

Tabla 27. Propiedades del acero fase compleja YS800

	A	B	C	D
1	Contents of COMPLEX 3	Add		Source
3	 Complex phase steel, YS800 (cold rolled)			E:\TESIS\MATERIALES CES EDUPACK TESIS\COMPLEX

Properties of Outline Row 3: Complex phase steel, YS800 (cold rolled)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7849,8	kg m ⁻³
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus an...	
5	Young's Modulus	2,1E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
8	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
9	 Specific Heat, C _p	472,76	J kg ⁻¹ K ⁻¹

Fuente: Autor

La deformación total del segmento estructural debido a la condición de velocidad de 50 km/h, se comporta de acuerdo a la estimado, donde el segmento central se encarga de absorber la energía produciendo la deformación en esa área, alcanzando un valor máximo de 32 cm.

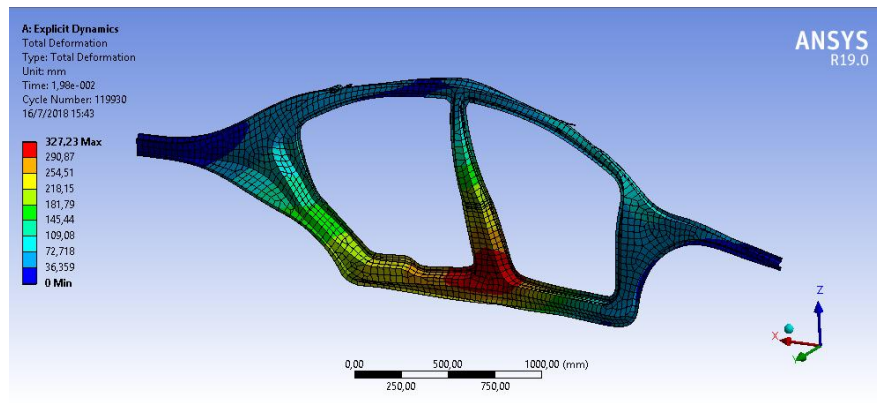


Figura 33. Deformaciones obtenidas en sección lateral (Acero martensítico, de plasticidad inducida, de fase doble, de fase compleja)

Fuente: Autor

El esfuerzo máximo es provocado en la unión del pilar central con el segmento superior lateral, obteniéndose un valor de 1549.3 MPa, el comportamiento no es totalmente crítico, se puede observar que de forma global se mantienen rangos admisibles de tensión entre 600-1000 Mpa, sin producir el fallo del material.

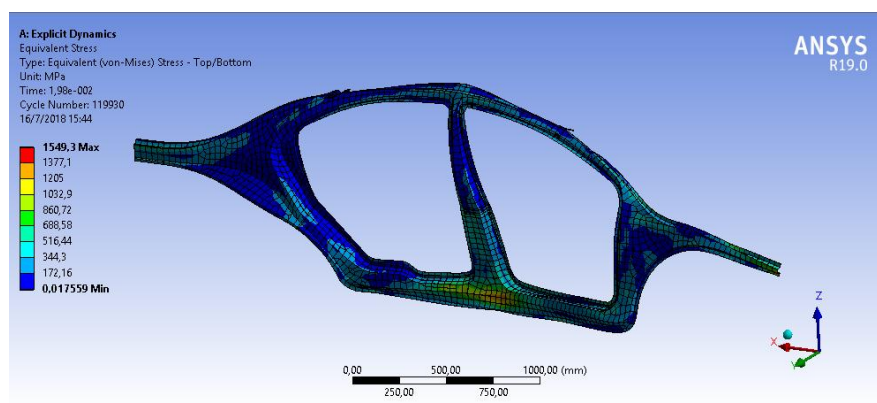


Figura 34. Esfuerzos obtenidos en sección lateral (Acero martensítico, de plasticidad inducida, de fase doble, de fase compleja)

Fuente: Autor

Resultados obtenidos

Análisis Multicriterio

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de los métodos multicriterios, varían en función del método de ponderación empleado, esto se debe a que cada sistema empleado infiere directa e indirectamente con los parámetros evaluados para cada criterio. En la siguiente grafica se pueden observar los cambios significativos que tienen cada uno de los métodos de ponderación empleados y su influencia sobre el caso de estudio.

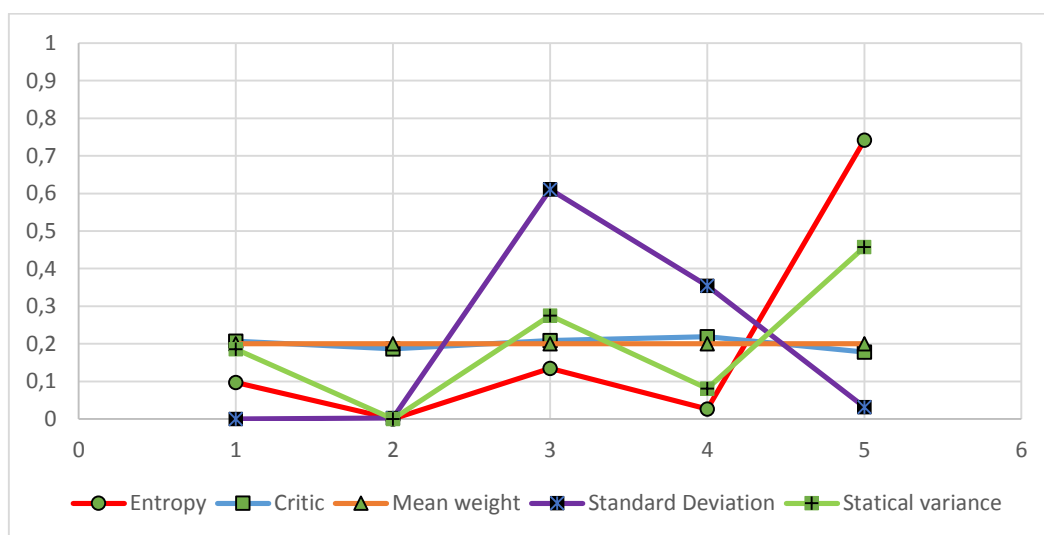


Figura 35 Comparación de resultados obtenidos mediante las ponderaciones

Fuente: Autor

Se puede establecer que el comportamiento de los métodos es similar en algunos casos (CRITIC - Pesos medios) y (Varianza estadística - Entropía), lo cual define un grado de uniformidad en los resultados evaluados lo que permite considerarlos como alternativas aceptables dentro del sistema de decisión. Sin embargo, el método de desviación estándar, no tiene el mismo rendimiento que sus contemporáneos, esto se debe a que no se incluye la normalización dentro del método, lo que provoca discontinuidades en los valores máximos y mínimos a considerar.

Un detalle importante a considerar es que, al realizar una comparación entre los parámetros iniciales de cada criterio, observando que los valores que se mantienen cierta distancia, tienen un grado de importancia mucho mayor, esto es provocado por la interferencia que existe entre cada criterio, resultando ineficiente evaluar elementos que poseen grandes similitudes (se deberían emplear otros métodos de valoración), esto provoca un mayor nivel de imprecisión en los resultados. Esto explica el comportamiento que tienen los valores obtenidos en fluir hacia las alternativas empleadas en este estudio.

Al implementar cada método de ponderación dentro de los métodos multicriterios se pueden evaluar las alternativas de forma cuantitativa, según la importancia que esta conlleve dentro del sistema de decisión. Aplicando el método de entropía, se puede observar que la opción F4 que corresponde al acero Martensítico es la alternativa mas adecuada, en todos los métodos empleados (Topsis, Copras, Vikor y Promethee II).

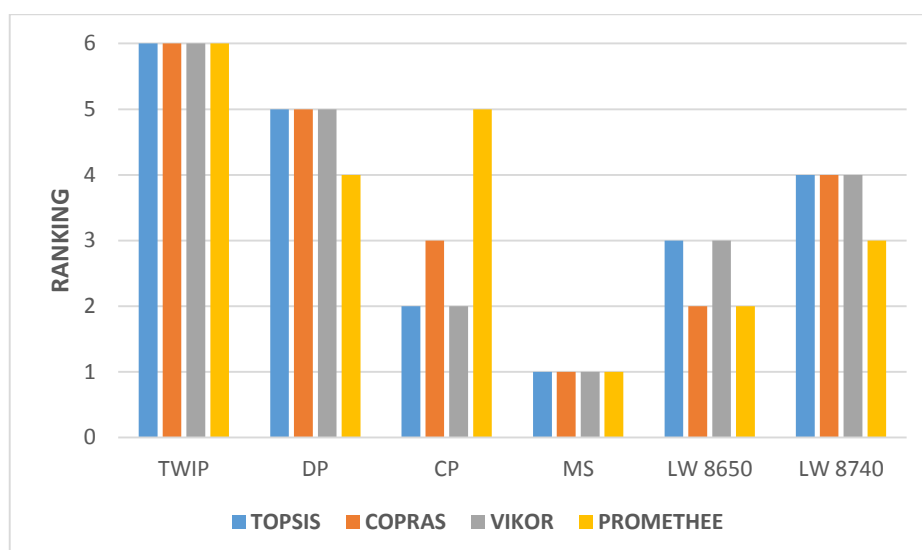


Figura 36. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando entropía

Fuente: Autor

Aplicando el método CRITIC, se puede observar una similitud en la elección de la alternativa F4 para los métodos Topsis y Copras, mientras que la alternativa F5 (acero de baja aleación) es ideal para los métodos Vikor y Promethee.

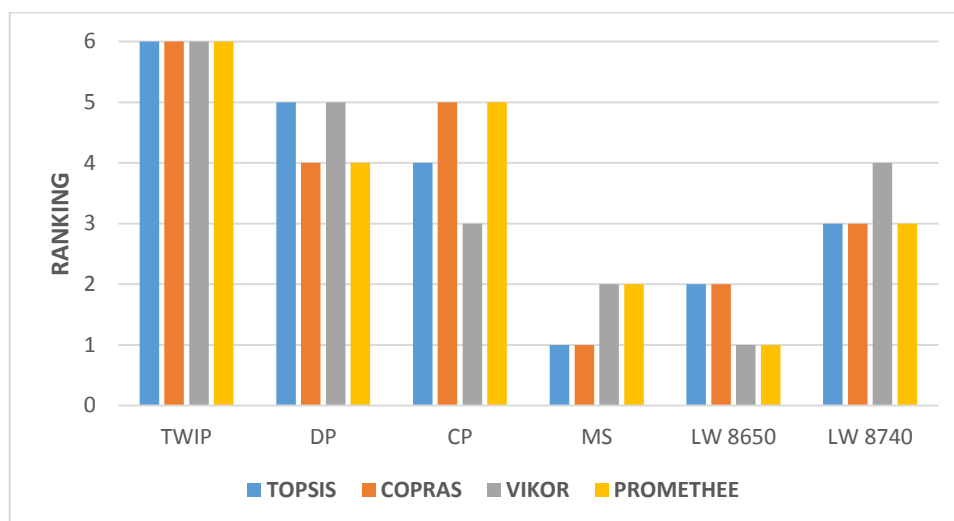


Figura 37. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando CRITIC

Fuente: Autor

Aplicando el método de pesos medios, como el caso anterior la alternativa F4 se mantiene para los métodos Topsis y Copras, igualmente la alternativa F5 para el método Promethee, mientras que para el método Vikor la alternativa F3 (Acero de fase compleja) es la mejor.

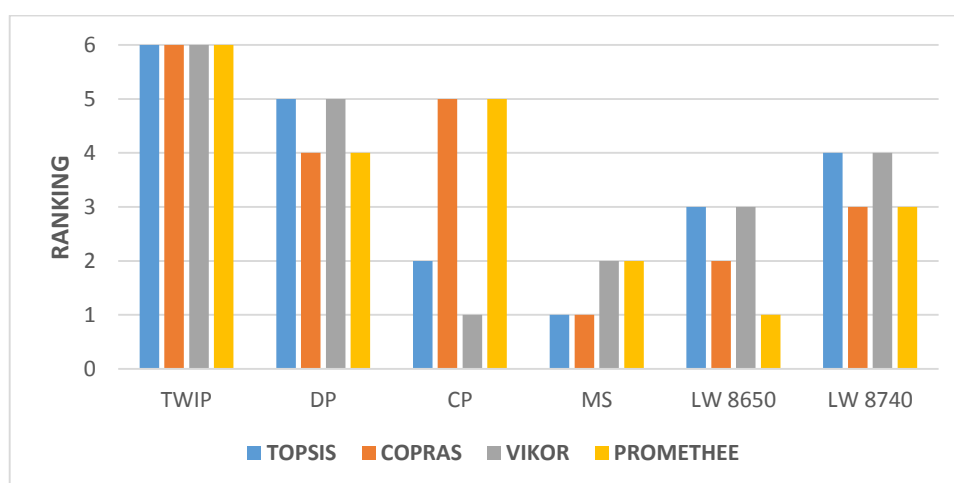


Figura 38. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando pesos medios

Fuente: Autor

Aplicando el método de varianza estándar, se mantiene la alternativa F4 se mantiene para los métodos Topis y Copras, la alternativa F5 para el método Promethee, y cambia la alternativa F6 (acero de baja aleación) para el Vikor.

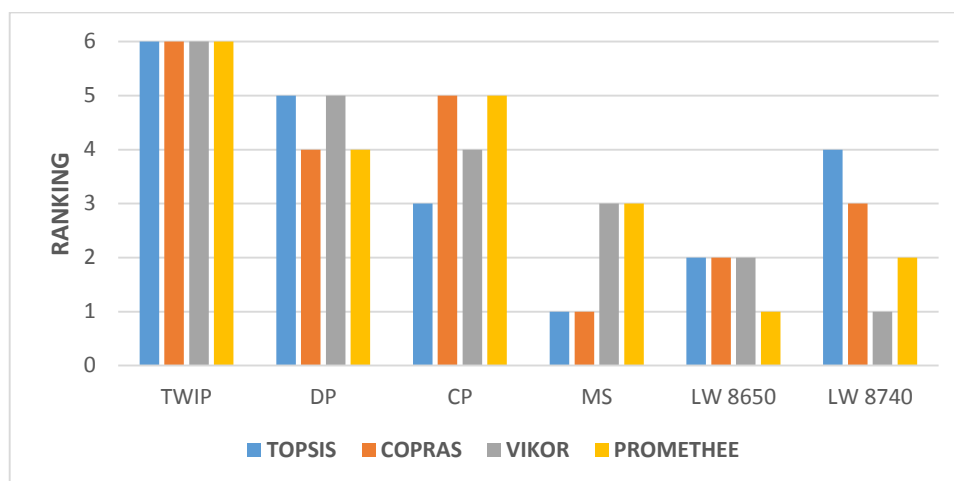


Figura 39. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando varianza estándar

Fuente: Autor

Para el caso de la desviación estándar, la opción F6 es la más influyente, en donde todos los métodos convergen en esta solución, sin embargo, no existe un comportamiento estable del sistema, por lo que el empleo de este método, no influye adecuadamente dentro del estudio.

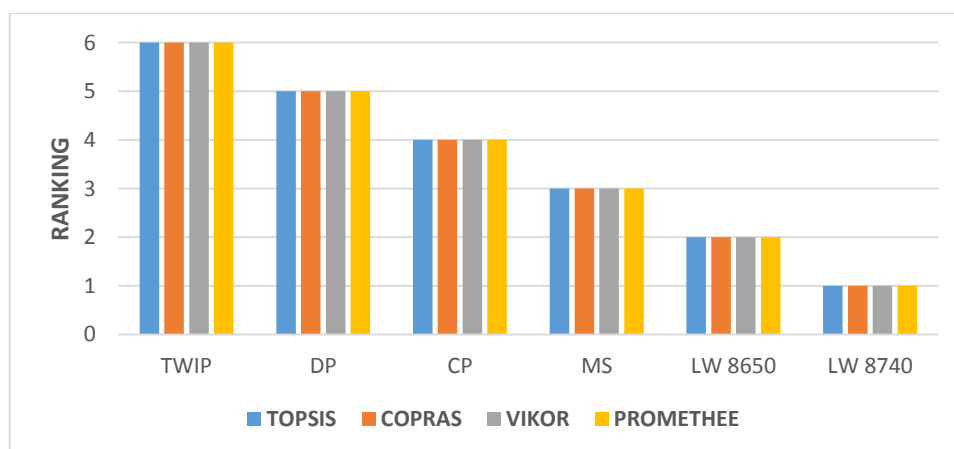


Figura 40. Comparación de resultados en Métodos multicriterio aplicando desviación estándar

Fuente: Autor

La estimación de posiciones en función del porcentaje de aceptación de cada método de ponderación se muestra en la siguiente tabla, donde se observa que el acero martensítico se ubica en la posición 1 con un 63%, siendo este el mejor, en la posición 2, se todavía se encuentra el acero martensítico y el acero de baja aleación 8650 con un 50%, en la posición 3, persisten los materiales ubicados en la posición 2, en la posición 4 se encuentran el acero de fase doble y acero de baja aleación 8740 con un 44%, en la posición 5 se encuentra el acero de fase doble con un 56%, en la posición 6 se encuentra de manera unánime el acero de plasticidad inducida con un 100%, siendo este el peor.

Material	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
TWIP						100%
DP				44%	56%	
CP	25%	38%	25%	25%	44%	
MS	63%	50%	50%			
LW 8650	33%	50%	50%			
LW 8740	25%	25%	44%	44%		

Tabla 28. Porcentaje de aceptación para cada material en función de los Métodos Multicriterio

Fuente: Autor

Dentro del proceso de simulación se encontraron que los valores de deformación y esfuerzo máximo se mantienen en rangos aceptables cercanos a los 30 mm y 1500 MPa respectivamente, en comparación al estudio realizado por (Tandler, et al., 2015), donde se somete un vehículo a pruebas de impacto lateral en periodos de tiempo de 200 ms, considerando velocidades de impacto de 70 km/h, se consiguieron rangos de deformación menores a los 50 mm.

Para el acero de baja aleación AISI 8650 se observa en la figura que las deformaciones en el pilar B, en la zona central (verde) presenta el mayor grado de deformación alcanzando un valor máximo de 33.082 cm en las zonas adyacentes al impacto (verde), se distribuyen los

esfuerzos generados por lo que se reducen a valores cercanos a los 25 cm, en los extremos (rojo), se mantienen en valores mínimos de deformación. Mientras que en la figura se observa los esfuerzos alcanzados hasta un valor máximo de 1947.1 MPa, sin embargo, debido a la desaceleración de la barrera deformable se reduce hasta un valor de 1525.5 MPa en el tiempo de 200ms.

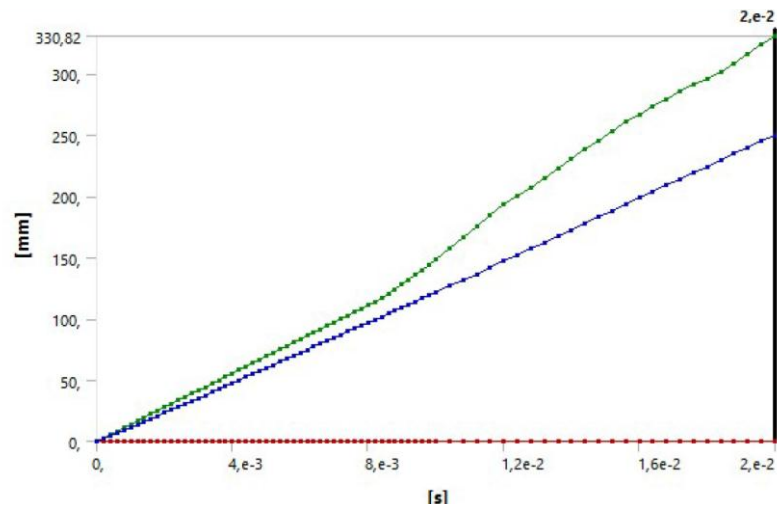


Figura 41. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 50km/h.

Fuente: Autor

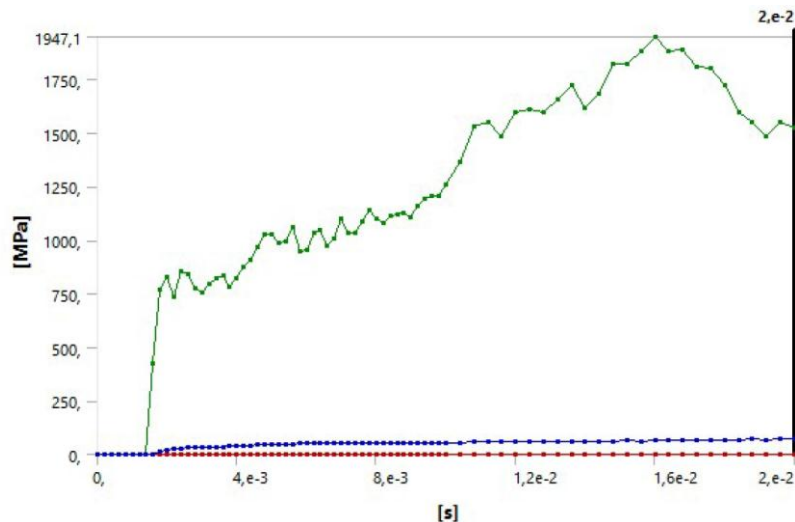


Figura 42. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 50km/h.

Fuente: Autor

Para el acero de baja aleación 8740 se obtienen valores de deformación alcanzando un valor máximo de 33.097 cm, en las zonas adyacentes al impacto (verde) valores cercanos a los 25 cm, en los extremos (rojo), se mantienen en valores mínimos de deformación. Mientras que en la figura se observa los esfuerzos alcanzados hasta un valor máximo de 1884.2 MPa, reduciéndose hasta 1489 MPa en el tiempo de 200ms.

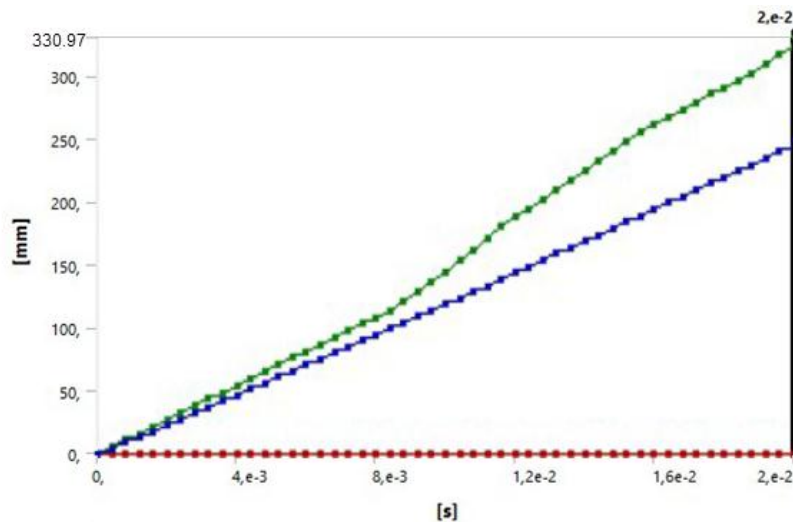


Figura 43. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 50km/h.

Fuente: Autor

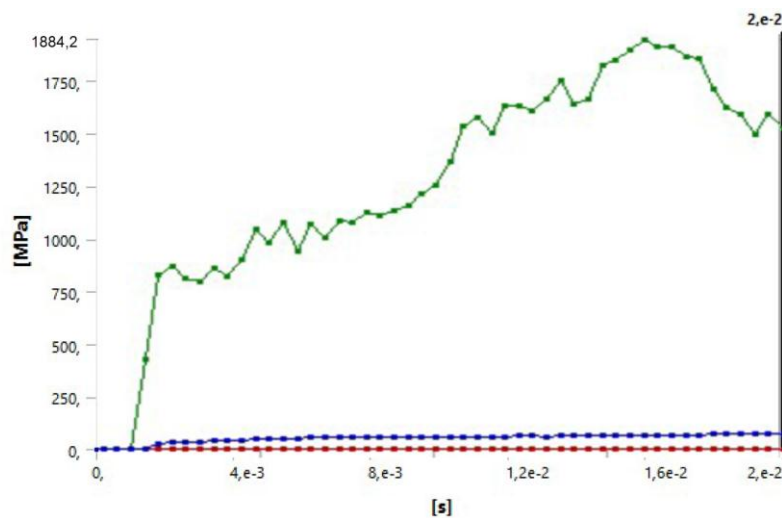


Figura 44. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 50km/h.

Fuente: Autor

De manera similar para el grupo de materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) se obtienen valores de deformación alcanzando un valor máximo de 327.23 mm, en las zonas adyacentes al impacto (verde) valores cercanos a los 250 mm, en los extremos (rojo), se mantienen en valores mínimos de deformación. Mientras que en la figura se observa los esfuerzos alcanzados hasta un valor máximo de 1549.3 MPa, reduciéndose hasta 1549.3 MPa en el tiempo de 200ms.

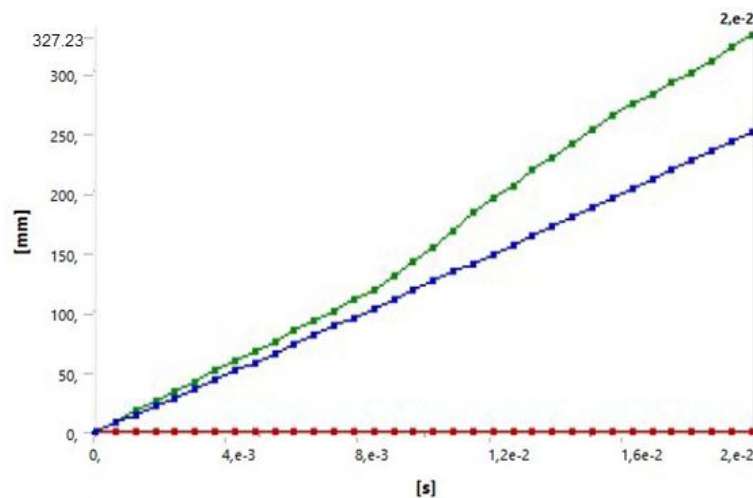


Figura 45. Deformación total de segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 50km/h.

Fuente: Autor

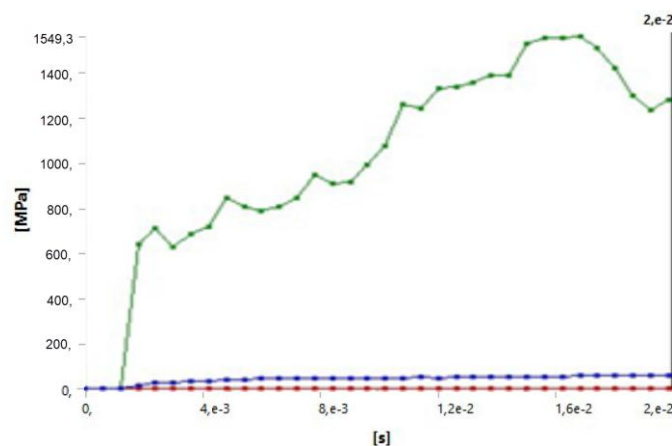


Figura 46. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 50km/h.

Fuente: Autor

Adicional a esto se determinaron los valores de deformación y esfuerzo para los perfiles de velocidades a 55 y 64 km/h a modo de comparación con otros estudios de impacto realizados. Aplicando los mismos procedimientos empleados en la simulación lateral, con la diferencia del cambio en el parámetro de velocidad de 55 km/h se obtiene: para el acero de baja aleación AISI 8650 se alcanzan valores 1991,1 Mpa de esfuerzo máximo, y de deformación de 37 cm.

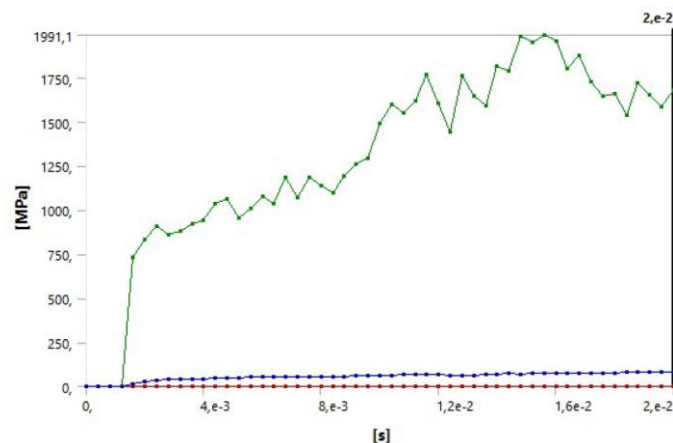


Figura 47. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 55km/h.

Fuente: Autor

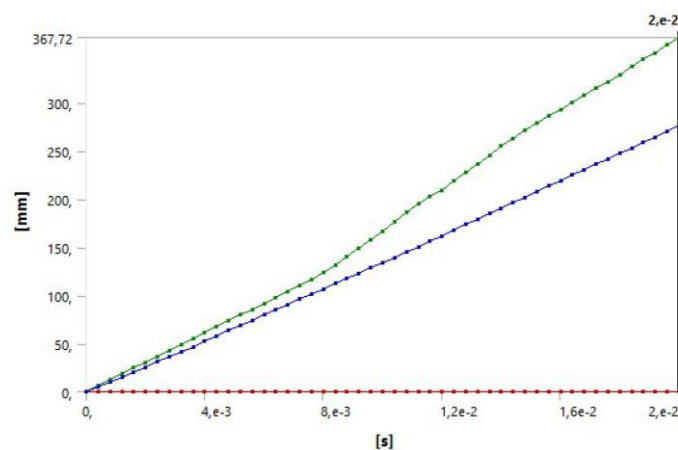


Figura 48. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 55km/h.

Fuente: Autor

Para el acero de baja aleación AISI 8740 se alcanzan valores 2001,7 Mpa de esfuerzo máximo, y de deformación de 37 cm.

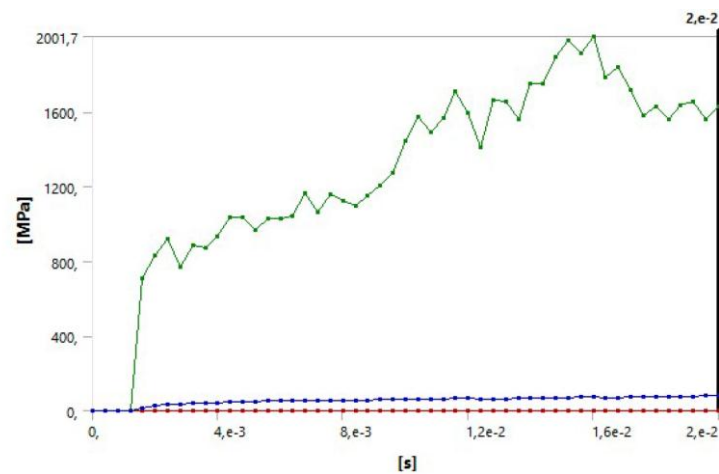


Figura 49. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 55km/h.

Fuente: Autor

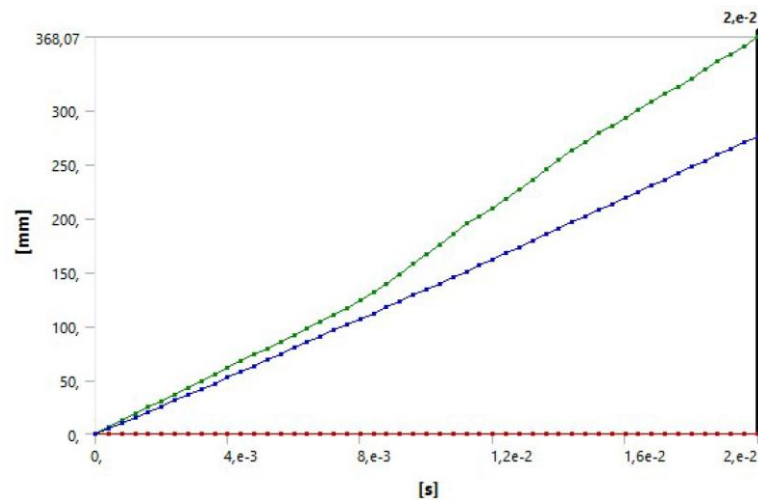


Figura 50. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 55km/h.

Fuente: Autor

Para los materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) se alcanzan valores 1982,3 Mpa de esfuerzo máximo, y de deformación de 37 cm.

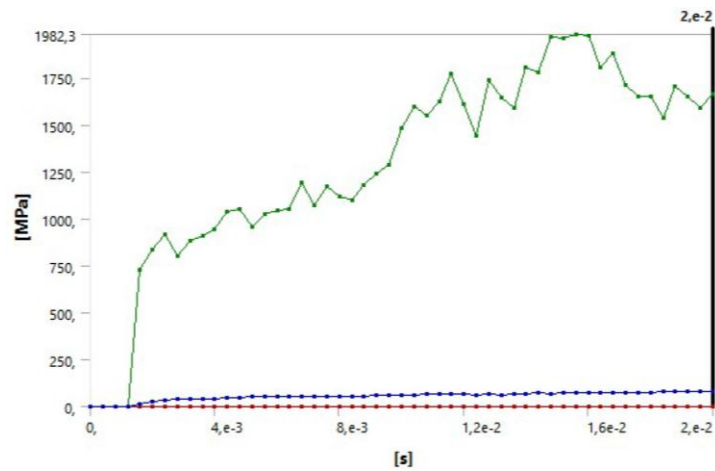


Figura 51. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 55km/h.

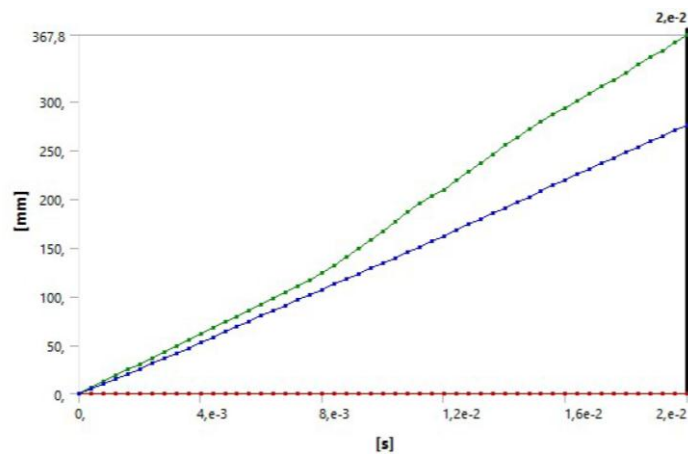


Figura 52. Deformación total de segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 55km/h.

Fuente: Autor

Aplicando una velocidad de 64 km/h se obtiene que para el acero de baja aleación AISI 8650 se alcanzan valores 2155,5 Mpa de esfuerzo máximo, y de deformación de 44 cm.

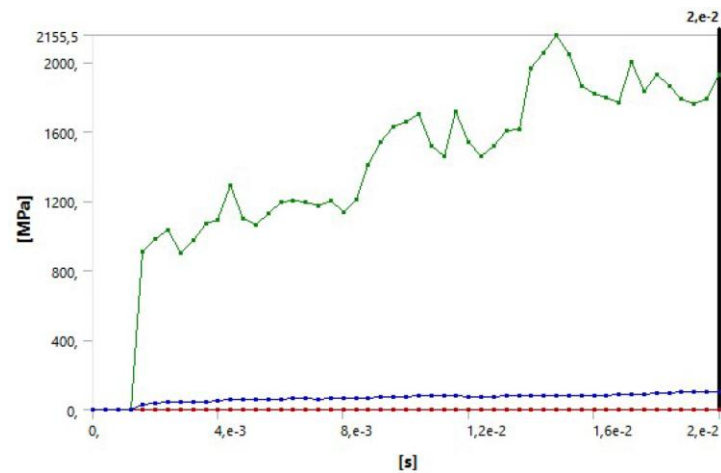


Figura 53. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 64km/h.

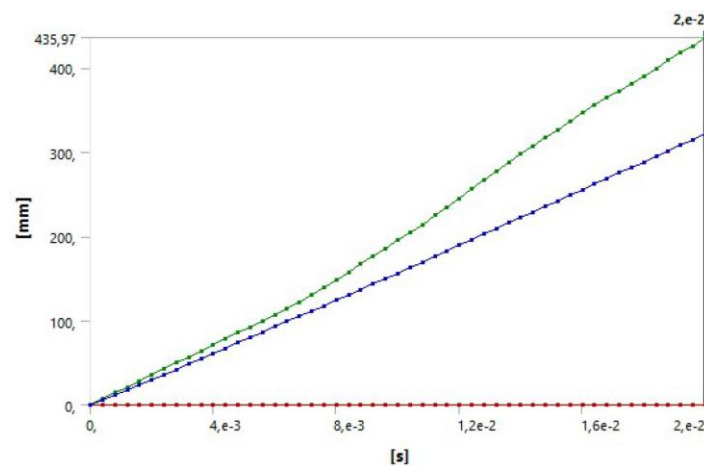


Figura 54. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8650 en microsegundos a velocidad de 64km/h.

Fuente: Autor

Aplicando una velocidad de 64 km/h se obtiene que para el acero de baja aleación AISI 8740 se alcanzan valores 2128,2 Mpa de esfuerzo máximo, y de deformación de 44 cm.

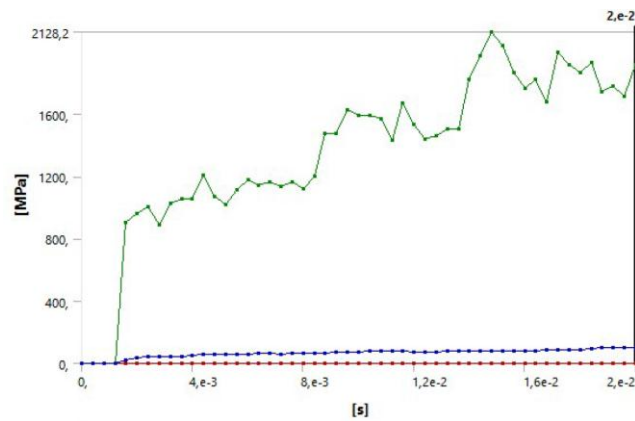


Figura 55. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 64km/h.

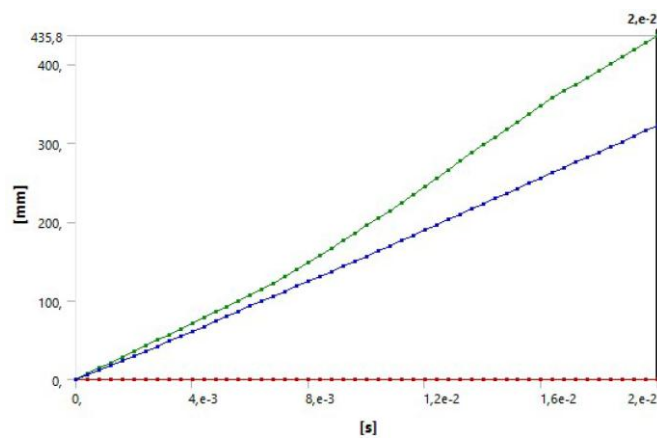


Figura 56. Deformación total de segmento estructural empleando el acero de baja aleación AISI 8740 en microsegundos a velocidad de 64km/h.

Fuente: Autor

Para los materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) se alcanzan valores 2167,9 Mpa de esfuerzo máximo, y de deformación de 44 cm.

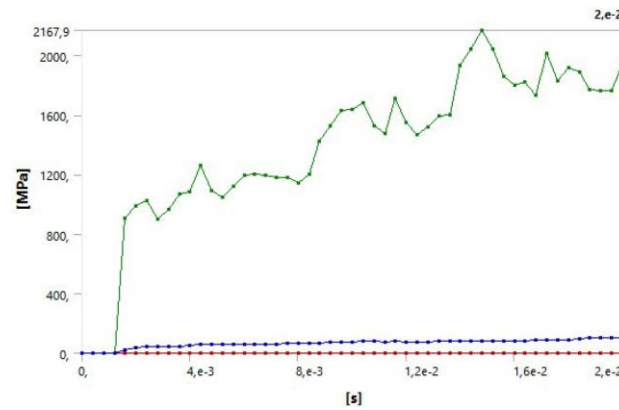


Figura 57. Esfuerzos obtenidos en segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 64km/h.

Fuente: Autor

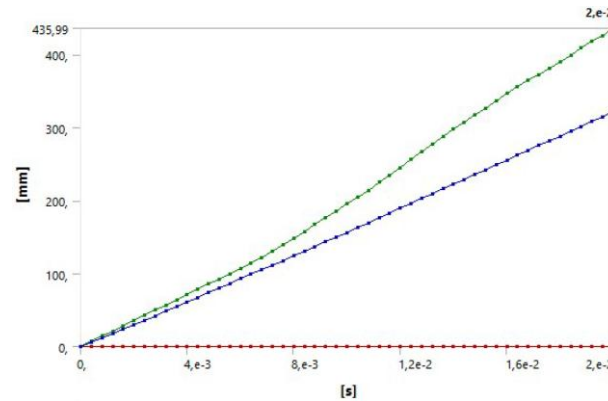


Figura 58. Deformación total de segmento estructural empleando materiales (acero martensítico, fase compleja, doble fase y plasticidad inducida) en microsegundos a velocidad de 64km/h.

A continuación, se expresan los cambios ocurridos en la sección lateral debido a la deformación presentada medida en microsegundos, para cada uno de los perfiles de velocidad establecidos de 50, 55 y 64 km/h respectivamente como se detallan en las figuras 65 a 73, donde se aprecia que la deformación adquirida es directamente proporcional a la velocidad, por lo que a mayor velocidad mayor deformación presentara la sección lateral.

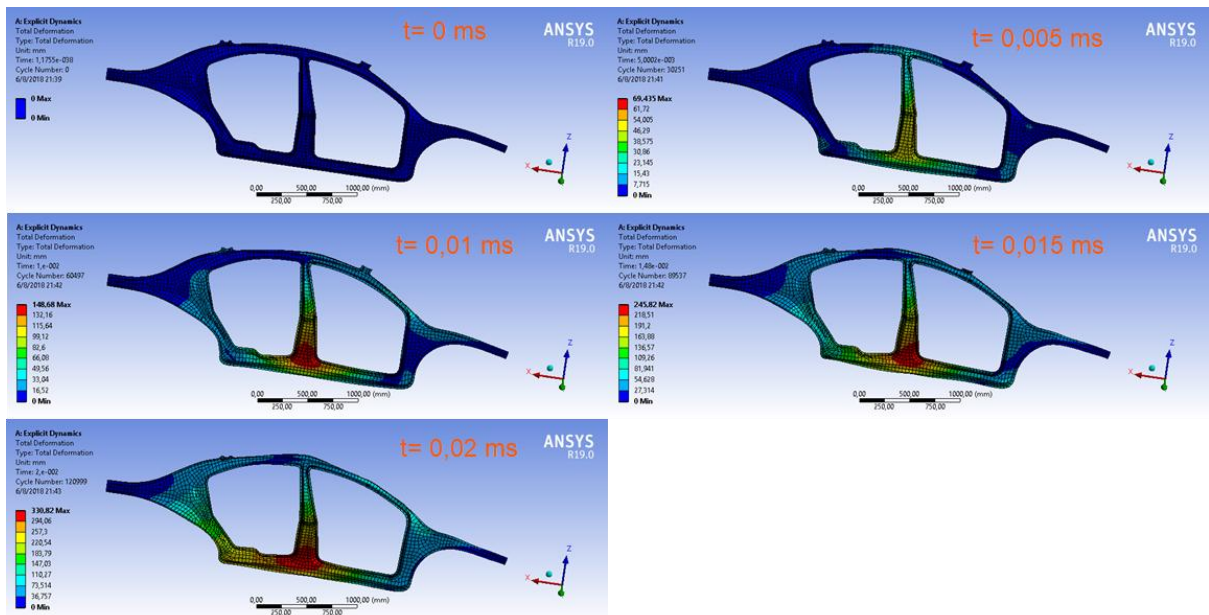


Figura 59. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8650 a velocidad de 50 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

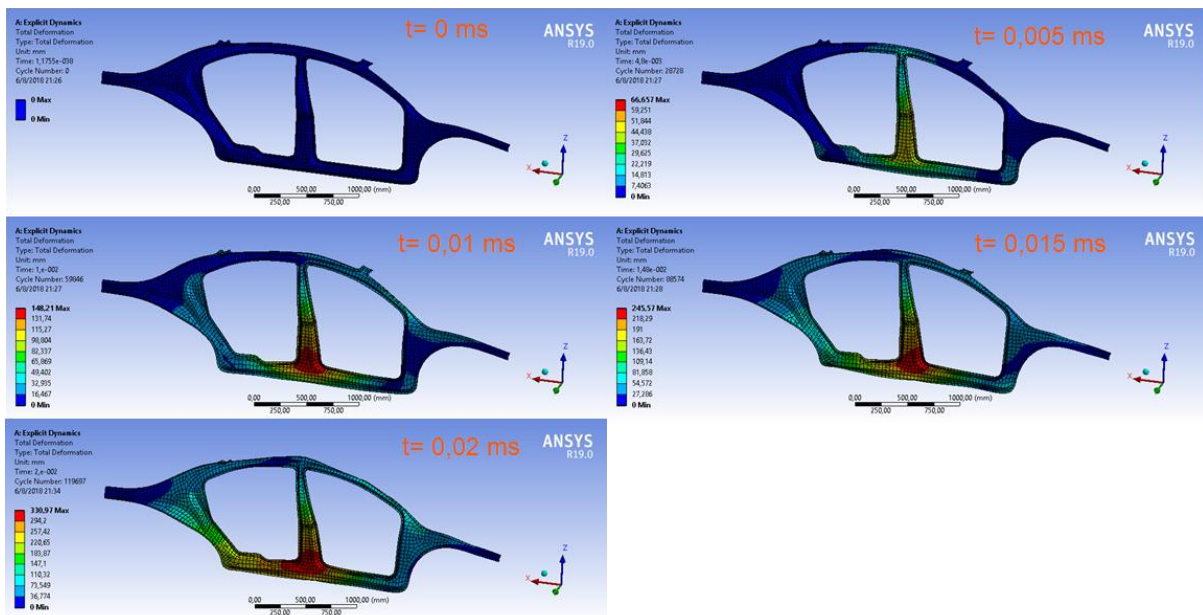


Figura 60. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8740 a velocidad de 50 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

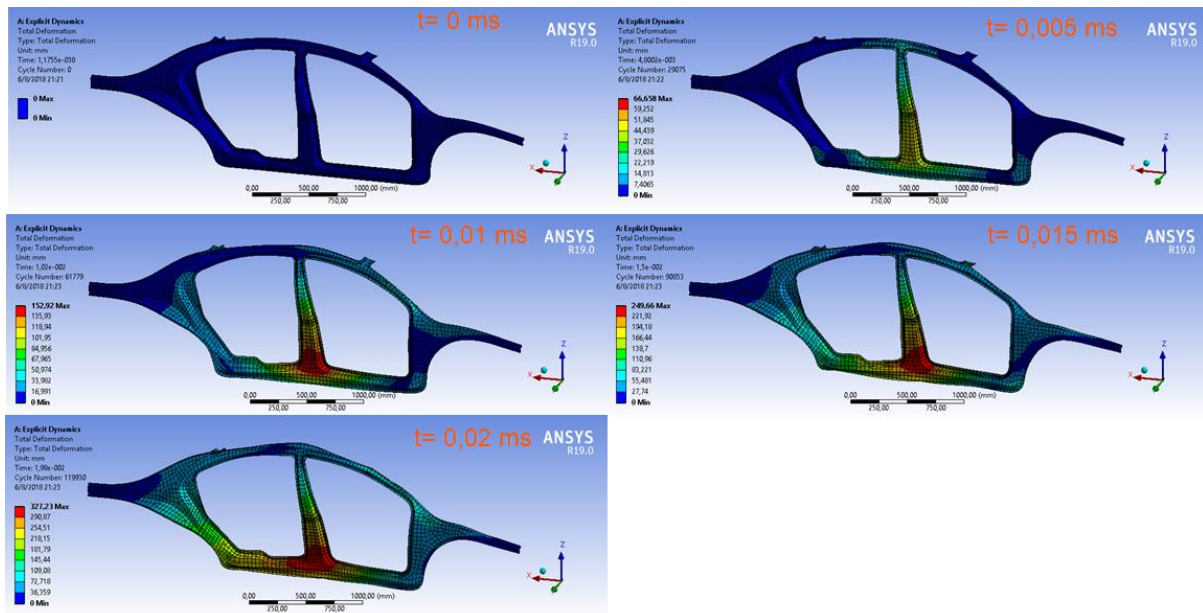


Figura 61. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero martensítico a velocidad de 50 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

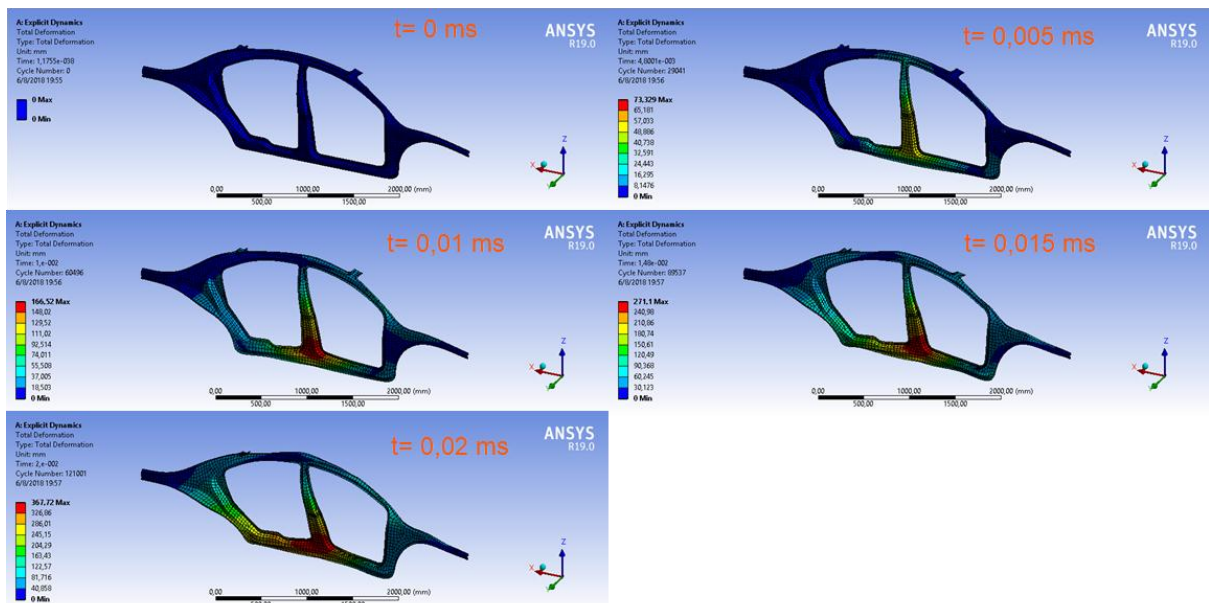


Figura 62. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8650 a velocidad de 55 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

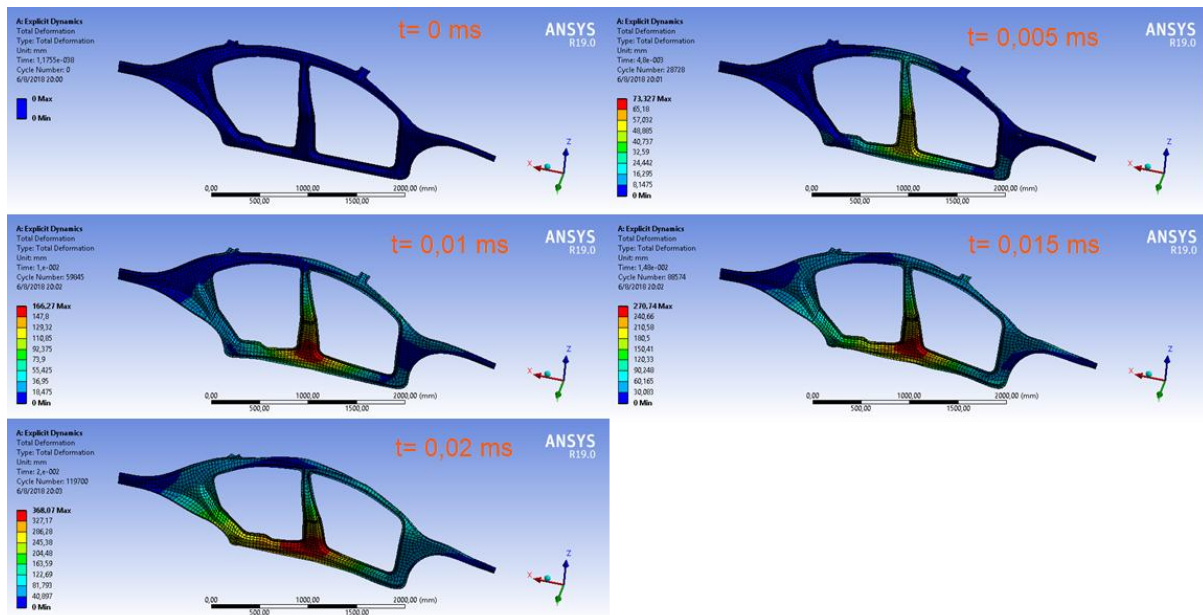


Figura 63. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8740 a velocidad de 55 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

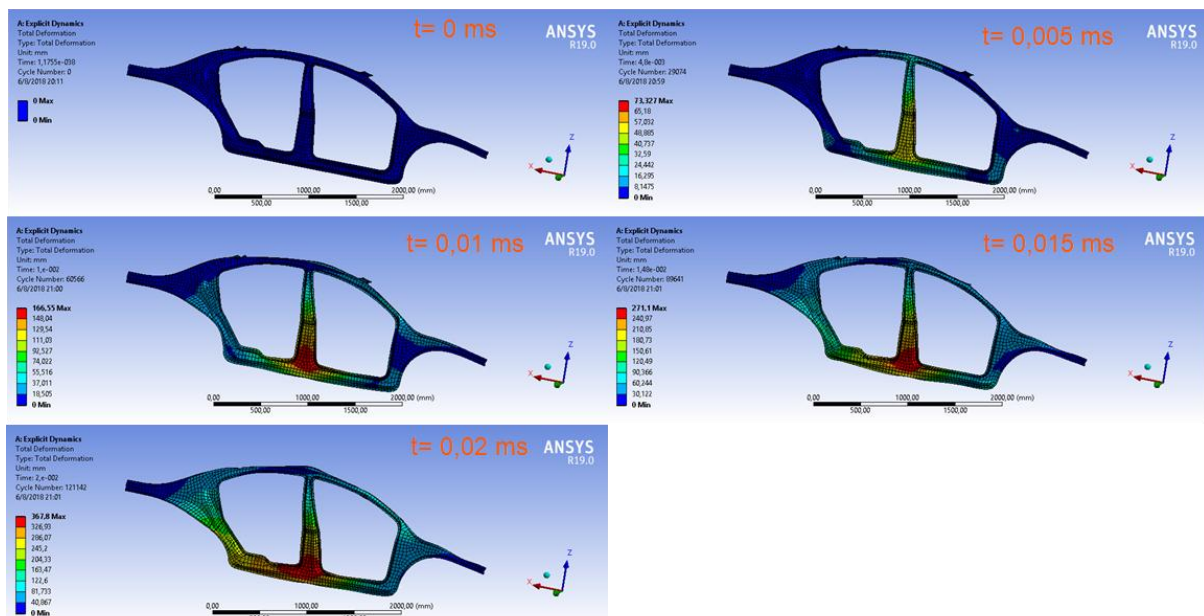


Figura 64. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero martensítico a velocidad de 55 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

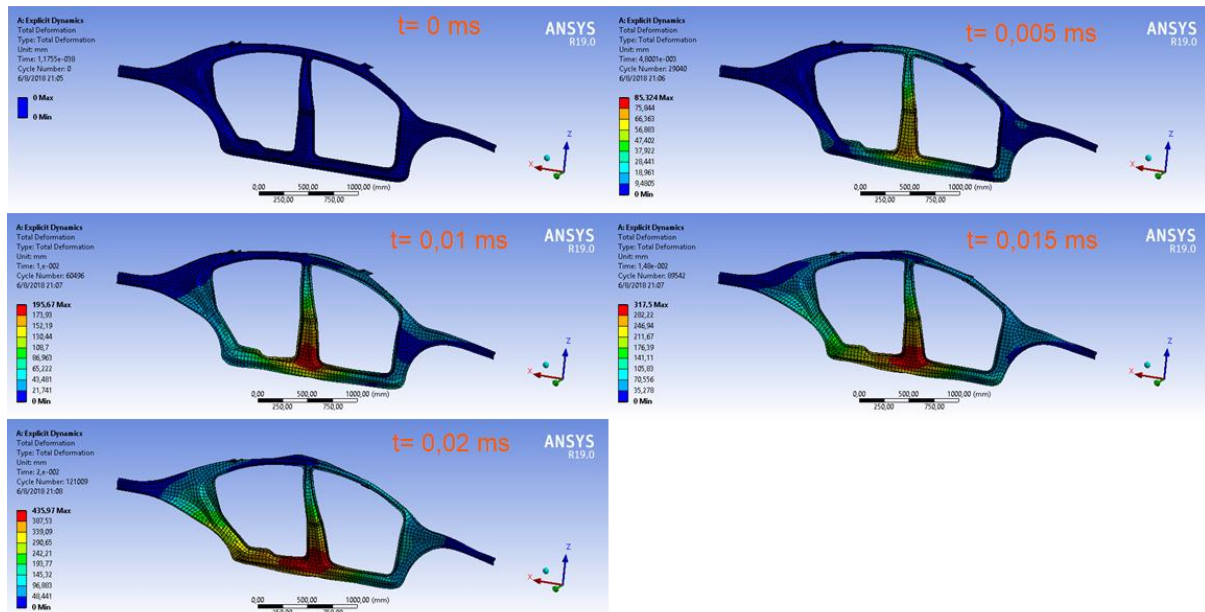


Figura 65. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8650 a velocidad de 64 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

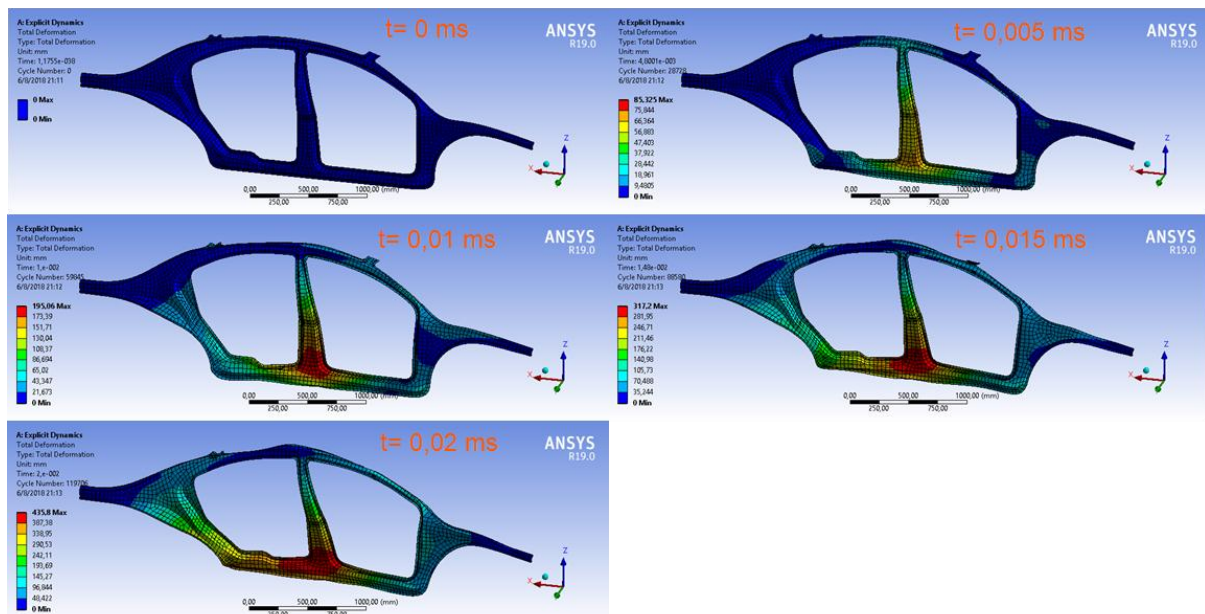


Figura 66. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero de baja aleación 8740 a velocidad de 64 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

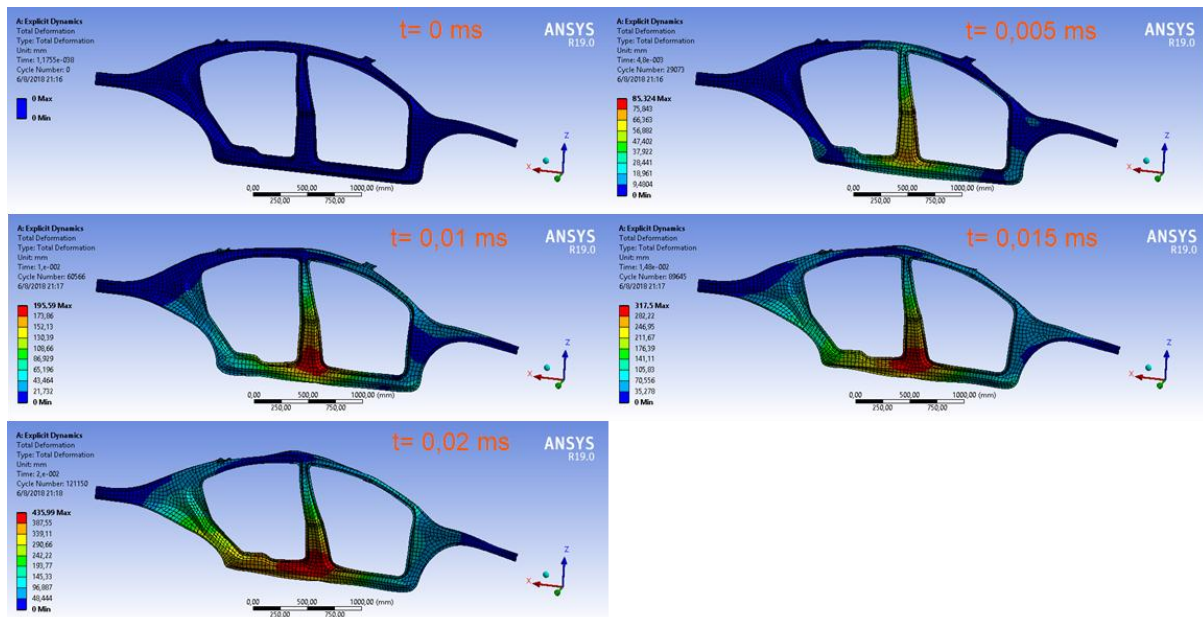


Figura 67. Comportamiento de la deformación total del segmento lateral para el material de acero martensítico a velocidad de 64 km/h medido desde 0 a 0,02 microsegundos.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el desarrollo e implementación de los métodos multicriterios mediante estrategias de discretización enfocadas hacia la reducción del peso de los elementos estructurales y conservación de un nivel alto de resistencia mecánica, se obtuvo una muestra de materiales correspondientes a los aceros de fase doble, plasticidad inducida, fase compleja, martensítico, baja aleación 8650 y 8740, de manera similar en un estudio reciente realizado por (Pu, Ma, Zhang, & Yang, 2018) se desarrolló una evaluación de criterios para la optimización del peso de los vehículos aplicado métodos multicriterios, obteniéndose que los aceros avanzados de alta resistencia se ubican como la mejor opción (los cuatro primeros materiales empleados respectivamente corresponden a esta categoría), y los aceros de alta resistencia presentan un buen rendimiento (los dos últimos materiales empleados respectivamente corresponden a esta categoría) de un total de 17 materiales.

En cuanto a la eficiencia obtenida en los métodos multicriterio se encontró que los métodos (TOPSIS, COPRAS, PROMETHEE II, VIKOR) ofrecen resultados satisfactorios en la búsqueda de soluciones únicas para la selección de materiales, tal como se indica en las tablas 42-45, uno de los métodos que demostró mayor potencial fue el TOPSIS, teniendo un índice de aceptación del 100 % de los casos para el acero martensítico, de hecho se ha empleado en algunos estudios relacionados con la reducción del peso de elementos en (Xiong, et al., 2018) y (Pu, Ma, Zhang, & Yang, 2018). El método COPRAS mantiene de igual manera un índice de aceptación del 100% de los casos para el acero martensítico, estableciéndose como consistente y fiable, se ha empleado esta metodología para el desarrollo de estructuras superligeras en la industria automotriz (Bhattacharjee, Mandal, Dey, & Biswas, 2017). Los métodos PROMETHEE II y VIKOR no son del todo consistentes en el empleo de diferentes métodos de ponderación, mantienen su estabilidad en el método de

entropía para el acero martensítico, pero en el resto de casos las estimaciones son imprecisas e inexactas.

En la simulación lateral sometida a velocidades de 50 km/h para todos los materiales se encontraron valores de deformaciones cercanas a los 33 cm, siendo este un valor aceptable a un valor límite de unos 50 cm que provocaría daños en la integridad del conductor y ocupantes, en el estudio de (Darwish, Gemeal, & Hussein, 2013) se realizó una simulación similar para la implementación en el mercado de un vehículo de fabricación saudí el “Gazal-1”, obteniéndose un valor de 47 cm de deformación, resultando muy peligroso el desempeño ante un colisión, requiriendo cambios en su diseño y empleo de materiales. Mientras que en (Reichter & Rudolf, 2017) se consiguieron valores admisibles para deformaciones de 12,5 cm del centro del asiento de conductor hacia fuera, conservando un rango de seguridad para los ocupantes y evitar lesiones.

Para los valores de velocidad de 55 km/h se obtuvieron valores de deformación de 37 cm, presentando un ligero incremento en comparación al apartado anterior, se han realizado ensayos a esta velocidad en (Miley, 2017) para el modelo X desarrollado por Tesla, con una respuesta excelente der respuesta a la colisión. Para los valores de 64 km/h se encontraron deformaciones de 44 cm, siendo un nivel considerable de deformación, posiblemente causaría ciertos daños a nivel de las costillas del ocupante, similares resultados se han obtenido (Edwards, et al., 2010) en donde se alcanzaron deformaciones de alrededor de 40 cm en la zona de impacto central lateral para el modelo Golf V, en el cual se evidencian de igual manera posibilidad de daños en la región torácica.

En cuanto al resultado de los esfuerzos de von Mises se consiguieron valores que rondan alrededor de los 2000 Mpa, existen estudios de segmentos estructurales de soporte como en (Suneeth, Reddy, Hussain, Reddy, & Babu, 2016) para el diseño de parachoques en la

sección delantera, alcanzando esfuerzos de unos 1800 N/mm² ante condiciones de impacto de choque frontal para aceros de resistencia alcanzando resultados aceptables en el diseño. Se puede establecer que los parámetros de diseño evaluados en este estudio en relación a la literatura revisada, presenta un índice de confianza en la aplicación de materiales de aceros de alta resistencia, así como en los valores obtenidos en la simulación por lo que puede resultar como una alternativa interesante en el diseño de carrocerías.

CONCLUSIONES

Se determinó que los métodos de análisis multicriterio empleados (TOPSIS, COPRAS, PROMETHEE II, VIKOR), ofrecen índices de respuesta aceptables para la selección de los materiales aplicados al segmento estructural lateral, sin embargo, dependiendo del método de ponderación aplicado, puede presentarse interferencias en la interacción de algunas o de cada una de las variables numéricas consideradas conllevando a un mayor margen de error significativo durante la selección.

Se determinó que el método de entropía es el método más adecuado para este caso de estudio, las aproximaciones y estimaciones que se definen para cada peso, son aplicables para cada método multicriterio, obteniendo uniformidad en los resultados.

Se estableció que el método más aproximado a una solución fiable es el TOPSIS, debido a que la metodología de aproximación de soluciones ideales y no ideales, permite evaluar la información de manera precisa descartando aquellos valores que no se encuentren en la zona de intersección de soluciones aceptables, obteniendo solo aquellas alternativas que mantengan este comportamiento dual.

Se determinó que el material de acero martensítico posee un mayor índice de aceptación dentro de los análisis multicriterio, sobreponiéndose más de 50%, por sobre el resto de los materiales evaluados.

Se determinó que durante la simulación se consiguen deformaciones de los segmentos estructurales que no sobrepasan un nivel de intrusión excesivo, conservándose la integridad de los elementos laterales y garantizando la seguridad de los ocupantes del vehículo. Mientras que el comportamiento mecánico se encuentra que los valores más altos de concentración de esfuerzos se desarrollan en el punto de impacto, mas no comprometen los segmentos adyacentes, sin llevar al material al fallo.

RECOMENDACIONES

En vista que los materiales utilizados en la investigación mostraron potencial como alternativas en la implementación del segmento estructural, se recomienda realizar futuras investigaciones y proyectos que los involucren directa o indirectamente el comportamiento de dichos materiales como medio de protección y seguridad de los ocupantes, conservando las prestaciones necesarias para su diseño y fabricación.

Se recomienda también emplear combinaciones de materiales similares e identificar su comportamiento de respuesta frente a colisiones.

BIBLIOGRAFÍA

- Adali, A. E., & Igik, T. A. (2016). Air Conditioner Selection Problem with Copras and Aras Methods. *Manas Journal of Social Studies*, 124-138.
- AL-Oqla, M. F., & Salit, S. M. (2017). *Materials Selection for Natural Fiber Composites*. Cambridge: Woodhead Publishing an imprint of Elsevier.
- ANAND, S. (2014). A COMPARATIVE STUDY OF MULTI ATTRIBUTE RANKING MECHANISMS FOR P2P NETWORKS. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*.
- Aparicio, A., Infantes, E. N., Lagner, T., A., L., M., W., T., U., . . . Schaub, S. (2011). Description of the impact conditions for the crash performance evaluation of the pre-crash systems and the possible means to evaluate them. *Assessment of Integrated Vehicle Safety Systems for improved vehicle safety*, 1-50.
- Arbelaez, R. A., Baker, B. C., & Nolan, J. M. (2005). Delta Vs for IIHS side impact crash tests and their relationship to real world crash severity. *Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, paper. Citeseer.
- ArcelorMittal. (24 de Diciembre de 2014). ArcelorMittal. Obtenido de <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/AHSS/CP/EN>
- Artiga, R. M. (2013). *Reparación en bancada*. Malaga: IC Editorial.
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M. F. (2012). *Materials and the environment: eco-informed material choice*. Elsevier.
- Balali, V., Mottaghi, A., Shoghli, O., & Golabchi, M. (2014). Selection of appropriate material, construction technique, and structural system of bridges by use of multicriteria decision-making method. *Transportation research record*, 79-87.
- Barnabas, S. G., Ezhilvannan, R., Kumar, V. A., Rajan, V., & Pandiyan, M. S. (2012). Warehouse layout selection using PROMETHEE II method. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 927-939.
- Bhattacharjee, P., Mandal, U., Dey, V. C., & Biswas, N. (2017). An Eclectic Decision for Selection of Aluminium Alloy for Aerospace and Automotive Industries.

PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT
INNOVATIONS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY, (pp. 5-9).

- Blas, P., & David, T. (2017). Análisis de las importaciones de partes y piezas automotrices desde Perú. Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Administrativas.
- Cabria, A. P. (12 de 12 de 2016). Estructuras y carrocerías de vehículos. Obtenido de <http://alves-pabloamov2016.blogspot.com/2016/12/estructuras-y-carrocerias-de-vehiculos.html>
- Casado, A. E., Jimenez, G. L., Morales, G. T., Gracia, G. J., & Navarro, M. J. (2010). Carrocería: elementos fijos. Madrid: Thomson Paraninfo.
- Casado, A. E., Jimenez, G. L., Morales, G. T., Gracia, G. J., & Navarro, M. J. (2016). Elementos estructurales del vehículo. Madrid: Paraninfo.
- CES-EDUPACK. (2013). Software para selección de materiales.
- Chatterjee, P. (2013). Applications of preference ranking based methods for decision making in manufacturing environment.
- Chatterjee, P., & Chakraborty, S. (2014). Investigating the Effect of Normalization Norms in Flexible Manufacturing System Selection Using Multi-Criteria Decision-Making Methods. *Journal of Engineering Science & Technology Review*.
- Chatterjee, P., Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2009). Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. *Materials & Design*, 4043-4053.
- Chhaya, U. K. (2018). Decision support using Multi-Criteria Decision Making for Reverse Logistics Networks (Disertacion Doctoral). Gujarat Technological University.
- Choo, E. U., Schoner, B., & Wedley, W. C. (1999). Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. *Computers & Industrial Engineering*, 527-541.
- Darwish, S., Gemeal, A., & Hussein, H. (2013). Finite Element Side Crash Test for First Saudi Car. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 65-66.
- Davoodi, M., Sapuan, S., Ahmad, D., Aidy, A., Khalina, A., & Jonoobi, M. (2011). Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material. *Materials & Design*, 4857-4865.

- Deng, H., Yeh, C.-H., & Willis, R. J. (2000). Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights. *Computers & Operations Research*, 963-973.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method. *Computers & Operations Research*, 763-770.
- Edwards, M. J., Hynd, D., Cuerden, R., Thompson, A., Carrol, J., & Broughton, J. (2010). Side impact safety. Transport Research Laboratory.
- Elmarakbi, A. (2013). Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness. John Wiley & Sons.
- Euro NCAP. (2008). Euro NCAP. Obtenido de http://www.wikiwand.com/cs/Euro_NCAP
- Fiebig, S. (2014). Improving the development of sheet structures with optimization and simulation methods. *Proceedings* , 349-359.
- Galarza Molina, S. L. (2011). Desarrollo de una herramienta de análisis multi-criterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Facultad de Ingeniería.
- Gao, R., Nam, H. O., Ko, W. I., & Jang, H. (2017). National Options for a Sustainable Nuclear Energy System: MCDM Evaluation Using an Improved Integrated Weighting Approach. *Energies*.
- Grabner, J., & Nothhaft, R. (2006). *Konstruieren von Pkw-Karosserien*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Granell, A. (12 de Agosto de 2016). RODES. Obtenido de <https://www.ro-des.com/blog/que-piezas-del-coche-se-deforman-en-un-accidente-para-aumentar-la-seguridad-del-conductor/>
- Grantadesign. (2016). CES Edupack. Obtenido de <http://www.grantadesign.com/education/edupack/index.htm>
- Hwang, S.-N., Lee, H.-S., Tang, S.-C., & Hsu, S.-S. (2013). Measuring quality of life using DEA-AR: focusing on undesirable factors. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 84-91.

- IIHS. (Mayo de 2014). INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY. Obtenido de http://www.iihs.org/media/765f3e95-46c9-40b5-a4b6-a3dc374e36d9/2nCFXQ/Ratings/Protocols/archive/test_protocol_side_vVII_0514.pdf
- Işık, A. T., & Adalı, E. A. (2017). The decision-making approach based on the combination of entropy and ROV methods for the apple selection problem. *European Journal of Interdisciplinary Studies*, 80-86.
- Ito, D., Yokoi, Y., & Mizuno, K. (2015). Crash pulse optimization for occupant protection at various impact velocities. *Traffic Injury Prevention*, 260-267.
- Jahan, A., Edwards, K. L., & Bahraminasab, M. (2016). Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design. Butterworth-Heinemann.
- Jahan, A., Mustapha, F., Sapuan, S., Ismail, M. Y., & Bahraminasab, M. (2012). A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 411-420.
- Josselin, J.-M., & Maux, B. L. (2017). *Statistical Tools for Program Evaluation*. Cham, Switzerland: Springer.
- Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K., Raslanas, S., Ginevicius, R., Komka, A., & Malinauskas, P. (2006). Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case. *Energy and buildings*, 454-462.
- Kershaw, J., & VanGelder, K. (2018). *Automotive steering and suspension*. Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning.
- Li, L., & Mo, R. (2014). A Comprehensive Decision-Making Approach Based on Hierarchical Attribute Model for Information Fusion Algorithms' Performance Evaluation. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Mayyas, A., Omar, A. ., & Hayajneh, T. . (2016). Eco-material selection using fuzzy TOPSIS method. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1-13.
- Melchor, R. C. (2012). *Reparación de elementos metálicos*. Antequera, Málaga: IC Editorial.

- Miley, J. (13 de Junio de 2017). Interesting Engineering. Obtenido de <https://interestingengineering.com/tesla-model-x-highest-safety-rated-suv-5-stars>
- Mladineo, N., Mladineo, M., & Knezic, S. (2017). Web MCA-based decision support system for incident situations in maritime traffic: Case study of Adriatic Sea. *The Journal of Navigation*, 1312-1334.
- Mohd Ishak, N., Dhar Malingam, S., & Mansor, M. R. (2017). Weighting of Natural Fibre Criteria for Fibre Metal Laminate Using Entropy Method for Car Front Hood Utilization. *Key Engineering Materials* (págs. 75-80). Trans Tech Publ.
- Pons. (1999). *Mecanica Vehiculos Pesados*. Madrid: Pons.
- Pu, Y., Ma, F., Zhang, J., & Yang, M. (2018). Optimal Lightweight Material Selection for Automobile Applications Considering Multi-Perspective Indices. *IEEE Access*, 8591-8598.
- Rao, R. V. (2007). *Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods*. Springer Science & Business Media.
- Reichter, & Rudolf, K. S. (2017). Development of a 2015 Mid-Size Sedan Vehicle Model. 11th Europea LS-DYNA Conference 2017 (págs. 1-10). Austria: DYNAmore GmbH.
- Rui, W., & Li-Xiao, Y. (2017). The Electricity Customer Satisfaction Weight Study Based on Comprehensive Weight Determination. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*.
- Sanchez Gutierrez, M. (2012). *Metodos de union y desunion de elementos fijos estructurales (MF0124_2)*. e-libro, Corp.
- Segui-Gomez, M., Lopez-Valdes, F. J., & Frampton, R. (2007). An evaluation of the EuroNCAP crash test safety ratings in the real world. *Annual Proceedings/Association for the Advancement of Automotive Medicine* (pág. 28). Association for the Advancement of Automotive Medicine.
- Snoline. (2008). TAU Redirective Crash Cushion System. Snoline, 1-30.

- Suneeth, K., Reddy, A. R., Hussain, P., Reddy, B. S., & Babu, S. S. (2016). DESIGN AND ANALYSIS OF CAR BUMPER. *International Journal of Mechanical Engineering Research and Technology*, 30-43.
- Tandler, J., Zimmerman, E., Muntean, V., Seipel, B., Koch, T., Willersinn, D., . . . Diez, M. (2015). A new pre-crash system for side impact protection. *International Journal of Crashworthiness*, 679-692.
- Teng, T.-L., Chang, K.-C., & Wu, C.-H. (2007). Development and validation of side-impact crash and sled testing finite-element models. *Vehicle System Dynamics*, 925-937.
- Vatansever, K., & Akgül, Y. (2018). Performance evaluation of websites using entropy and grey relational analysis methods: The case of airline companies. *Decision Science Letters*, 119-130.
- Vidal, J. F., Mas, J. J., & Gonzalez, M. A. (2013). *Sistemas de seguridad y confortabilidad*. Madrid: Editex.
- Viñas, V. G. (2014). *Elementos estructurales del vehículo*. Pozuelo de Alarcón, Madrid: Editex.
- Vujičić, M. D., Papić, M. Z., & Blagojević, M. D. (2017). Comparative analysis of objective techniques for criteria weighing in two MCDM methods on example of an air conditioner selection. *Tehnika*, 422-429.
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., & Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2263-2278.
- Xiong, F., Wang, D., Zhang, S., Cai, K., Wang, S., & Lu, F. (2018). Lightweight optimization of the side structure of automobile body using combined grey relational and principal component analysis. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 441-461.
- Yalçın, N., & Ünlü, U. (2017). A multi-criteria performance analysis of Initial Public Offering (IPO) firms using CRITIC and VIKOR methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 1-27.
- Yilmaz, B., & Harmancioglu, B. N. (2010). Multi-criteria decision making for water resource management:.. *WATER SA*, 563-576.

Zardari, N. H. (2014). Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management. Springer.

ANEXOS

Información técnica de materiales

Twinning induced plasticity steel, YS500 (cold rolled)

General information

Designation

TWIP 500/980

Condition

Cold rolled

Tradenames

World Auto Steel: TWIP 500/980

Typical uses

Automotive: safety components, body panels

Composition overview

Compositional summary

Fe78-82 / Mn16-20 / Al1.2-1.4 / C0.53-0.65 / Cr0.33-0.4 / Si0.2-0.24 / Ni0.091-0.11

Material family

Metal (ferrous)

Base material

Fe (Iron)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)

1,18 - 1,44 %

C (carbon)

0,533 - 0,651 %

Cr (chromium)

0,331 - 0,405 %

Fe (iron)

77,5 - 81,6 %

Mn (manganese)

16,1 - 19,6 %

Ni (nickel)

0,0909 - 0,111 %

Si (silicon)

0,201 - 0,245 %

Price

Price

* 1,3 - 1,35 USD/kg

Physical properties

Density

7,8e3 - 7,9e3 kg/m³

Mechanical properties

Young's modulus

200 - 221 GPa

Yield strength (elastic limit)

476 - 525 MPa

Tensile strength

933 - 1,03e3 MPa

Elongation

50 - 60 % strain

Compressive strength

* 476 - 525 MPa

Flexural modulus

* 200 - 221 GPa

Flexural strength (modulus of rupture)

* 476 - 525 MPa

Shear modulus

* 77,1 - 85,1 GPa

Bulk modulus

* 167 - 184 GPa

Poisson's ratio

0,286 - 0,315

Shape factor

48

Hardness - Vickers

* 266 - 317 HV

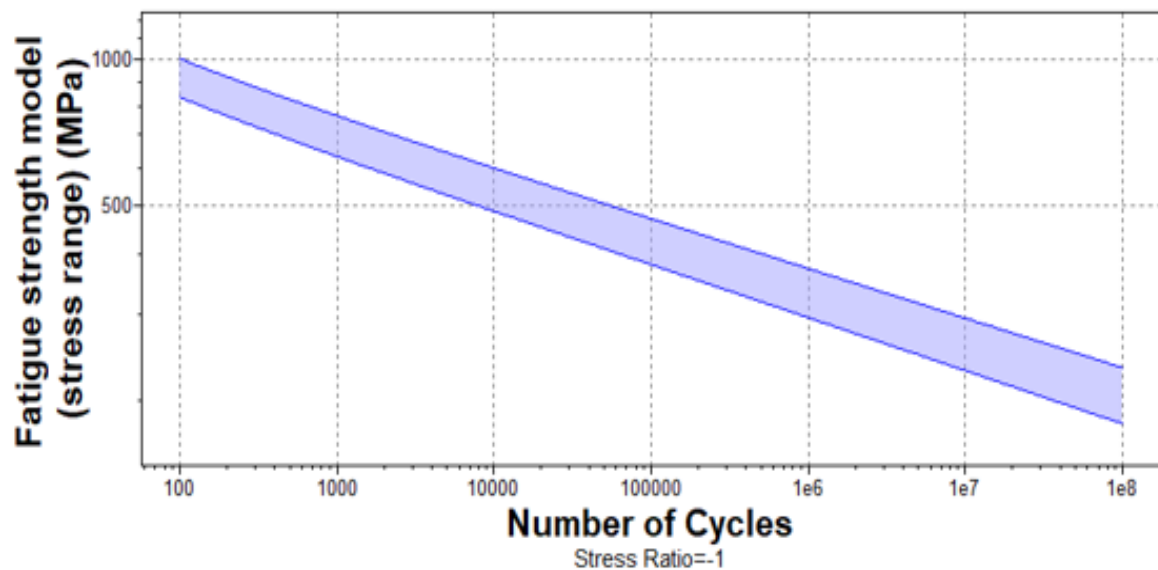
Fatigue strength at 10⁷ cycles

* 244 - 280 MPa

Fatigue strength model (stress range)

* 231 - 296 MPa

Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles



Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 4,4e-4 - 5,5e-4	
Impact & fracture properties		
Fracture toughness	* 55 - 80	MPa.m ^{0.5}
Thermal properties		
Melting point	* 1,42e3 - 1,51e3	°C
Maximum service temperature	* 473 - 502	°C
Minimum service temperature	* -63 - -35	°C
Thermal conductivity	* 42 - 50	W/m.°C
Specific heat capacity	* 447 - 500	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 11 - 13	µstrain/°C
Electrical properties		
Electrical resistivity	* 19 - 29	µohm.cm
Galvanic potential	* -0,63 - -0,55	V
Magnetic properties		
Magnetic type		Magnetic
Optical properties		
Transparency		Opaque
Processing properties		
Metal casting		Unsuitable
Metal cold forming		Excellent
Metal hot forming		Excellent
Metal press forming		Excellent
Metal deep drawing		Acceptable
Work hardening exponent, n	0,38 - 0,46	
Carbon equivalency	3,28 - 4,01	
Durability		
Water (fresh)		Acceptable
Water (salt)		Limited use
Weak acids		Limited use
Strong acids		Unacceptable
Weak alkalis		Acceptable
Strong alkalis		Limited use
Organic solvents		Excellent

Oxidation at 500C	Acceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Acceptable			
Flammability	Non-flammable			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 25,6	-	28,2	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 2,01	-	2,22	kg/kg
Water usage	22,9	-	68,6	l/kg
Processing energy, CO2 footprint & water				
Rough rolling, forging energy	* 4,52	-	4,57	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	* 0,339	-	0,343	kg/kg
Rough rolling, forging water	* 3,4	-	5,1	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 8,74	-	8,85	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 0,655	-	0,664	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 5,12	-	7,68	l/kg
Wire drawing energy	* 31,9	-	32,4	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 2,4	-	2,43	kg/kg
Wire drawing water	* 11,5	-	17,3	l/kg
Metal powder forming energy	* 37,2	-	41,7	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 2,97	-	3,34	kg/kg
Metal powder forming water	* 40,9	-	61,3	l/kg
Vaporization energy	* 1,11e4	-	1,18e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 835	-	882	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,8e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1,13	-	1,14	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,085	-	0,0856	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 6,83	-	6,91	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,512	-	0,518	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 13,2	-	13,3	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,987	-	0,999	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)		*	111	- 118
	MJ/kg			
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed) *		8,35	-	8,82
	kg/kg			
Recycling and end of life				
Recycle	False			
Embodied energy, recycling	* 7,04	-	7,79	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,553	-	0,611	kg/kg
Recycle fraction in current supply	* 39,9	-	44	%
Downcycle	False			
Combust for energy recovery	Combust for energy recovery			
Landfill	False			
Biodegrade	Biodegrade			
Notes				
Other notes				

TWIP steels contain 17 to 20 % manganese resulting in a fully austenitic and non-magnetic microstructure, without any phase transformation. Due to the twinning mechanism, TWIP-steels are able to satisfy a number of the latest technical requirements of the automotive industry. TWIP steels show high tensile strengths (600-1100 MPa) and extreme ductility

(60% to 90%). High production costs due to the high Mn content make commercialization of TWIP steels challenging.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Values marked * are estimates.

No warranty is given for the accuracy of this data

Dual phase steel, YS600 (cold rolled)

General information

Designation

EN 10336:2007 HCT980X

Condition

Cold rolled

EN name

HCT980X

EN number

1.0944

Tradenames

World Auto Steel: DP 700/1000, ArcelorMittal: Dual Phase 980 LCE Y600

Typical uses

Automotive: front and rear rails, crush cans, rocker reinforcements, b/c pillar reinforcements, cowl inner/outer, back panels, cross members, bumpers, door intrusion beams, closures

Composition overview

Compositional summary

Fe91-97 / Al1.8-2.2 / Mn0.4-2.9 / Si0.4-1.4 / C0.06-0.23 (impurities: Cr<1, Mo<1, V<0.2, Nb<0.15, Ti<0.15, P<0.08, S<0.015, B<0.005)

Material family

Metal (ferrous)

Base material

Fe (Iron)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)

1,8 - 2,2 %

B (boron)

0 - 0,005 %

C (carbon)

0,06 - 0,23 %

Cr (chromium)

0 - 1 %

Fe (iron)

90,7 - 97,3 %

Mn (manganese)

0,4 - 2,9 %

Mo (molybdenum)

0 - 1 %

Nb (niobium)

0 - 0,15 %

P (phosphorus)

0 - 0,08 %

S (sulfur)

0 - 0,015 %

Si (silicon)

0,4 - 1,4 %

Ti (titanium)

0 - 0,15 %

V (vanadium)

0 - 0,2 %

Price

Price

* 0,63 - 0,66 USD/kg

Physical properties

Density

7,8e3 - 7,9e3 kg/m³

Mechanical properties

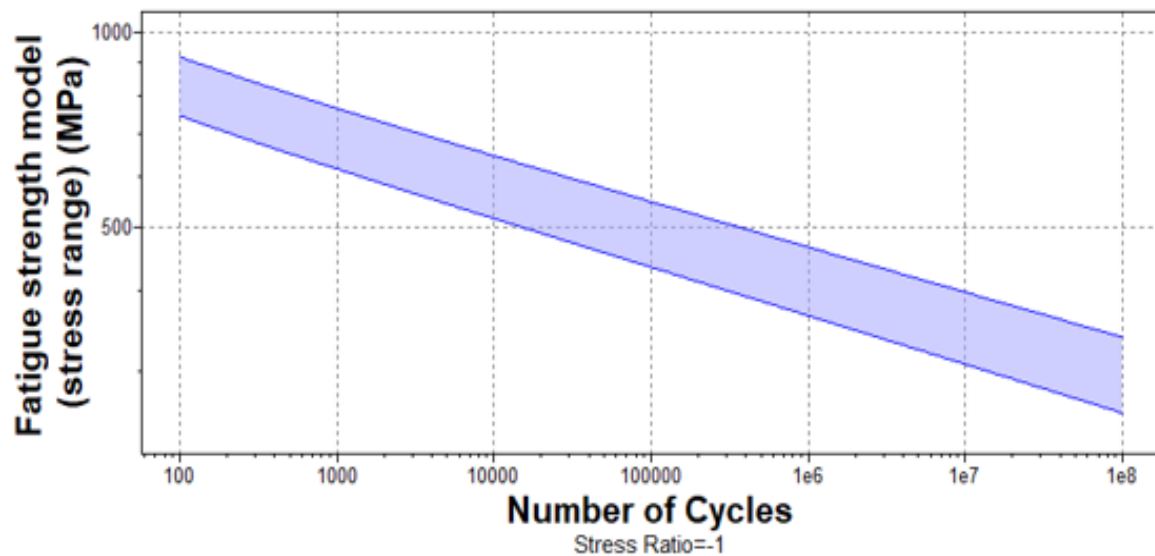
Young's modulus

200 - 221 GPa

Yield strength (elastic limit)

600 - 750 MPa

Tensile strength	980	-	1,1e3	MPa
Elongation	10	-	17	% strain
Compressive strength	* 600	-	750	MPa
Flexural modulus	* 200	-	221	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 600	-	750	MPa
Shear modulus	* 76,9	-	84,8	GPa
Bulk modulus	* 167	-	184	GPa
Poisson's ratio	0,286	-	0,315	
Shape factor	37			
Hardness - Vickers	* 290	-	323	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	333	-	368	MPa
Fatigue strength model (stress range)	308	-	398	MPa
Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles				



Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 4,3e-4	-	4,9e-4	
Impact & fracture properties				
Fracture toughness	* 74	-	107	MPa.m ^{0.5}
Thermal properties				
Melting point	* 1,42e3	-	1,51e3	°C
Maximum service temperature	* 473	-	502	°C
Minimum service temperature	* -63	-	-35	°C
Thermal conductivity	* 42	-	50	W/m.°C
Specific heat capacity	* 447	-	500	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 11	-	13	μstrain/°C
Electrical properties				
Electrical resistivity	* 19	-	29	μohm.cm
Galvanic potential	* -0,52	-	-0,44	V
Magnetic properties				
Magnetic type	Magnetic			
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Processing properties				
Metal casting	Unsuitable			
Metal cold forming	Excellent			

Metal hot forming	Excellent			
Metal press forming	Excellent			
Metal deep drawing	Acceptable			
Work hardening exponent, n	* 0,11	-	0,12	
Carbon equivalency	0,127	-	1,15	
Durability				
Water (fresh)	Acceptable			
Water (salt)	Limited use			
Weak acids	Limited use			
Strong acids	Unacceptable			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Limited use			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Acceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use			
Flammability	Non-flammable			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 33,1	-	36,5	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 2,73	-	3,01	kg/kg
Water usage	* 71,5	-	79	l/kg
Processing energy, CO2 footprint & water				
Rough rolling, forging energy	* 5,43	-	6,63	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	* 0,407	-	0,497	kg/kg
Rough rolling, forging water	* 4	-	6	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 10,6	-	13	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 0,792	-	0,972	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 6,33	-	9,49	l/kg
Wire drawing energy	* 38,8	-	47,8	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 2,91	-	3,58	kg/kg
Wire drawing water	* 15,5	-	23,2	l/kg
Metal powder forming energy	* 37,2	-	41,7	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 2,97	-	3,34	kg/kg
Metal powder forming water	* 40,9	-	61,3	l/kg
Vaporization energy	* 1,11e4	-	1,18e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 835	-	882	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,8e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1,27	-	1,45	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,0952	-	0,109	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 8,19	-	9,99	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,614	-	0,75	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 15,9	-	19,5	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 1,19	-	1,46	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)		*	111	- 118 MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)*			8,35	- 8,82 kg/kg
Recycling and end of life				
Recycle	False			
Embodied energy, recycling	* 8,57	-	9,47	MJ/kg

CO2 footprint, recycling	* 0,673	-	0,743	kg/kg
Recycle fraction in current supply	* 39,9	-	44	%
Downcycle	False			
Combust for energy recovery	Combust for energy recovery			
Landfill	False			
Biodegrade	Biodegrade			

Notes

Other notes

As a result of their microstructure (hard martentic/bainitic phase dispersed in soft ferrite), Dual Phase (DP) steels offer an outstanding combination of strength and drawability. The strain hardening behavior of these steels combined with a strong bake h

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.

No warranty is given for the accuracy of this data

Complex phase steel, YS800 (cold rolled)

General information

Designation

EN 10336:2007 HCT980C

Condition

Cold rolled

EN name

HCT980C

EN number

1.0955

Tradenames

World Auto Steel List: CP 800/1000, ArcelorMittal: Complex phase 1000, ThyssenKrupp: CP-K 72/100

Typical uses

Automotive: safety components, suspension systems, seat flange, door bar, tunnel stiffener, fender beam and suspension arm.

Composition overview

Compositional summary

Fe94-100 (impurities: Mn<2.2, Al<2, Si<0.8, C<0.23, V<0.22, P<0.08, S<0.015, B<0.005)

Material family

Metal (ferrous)

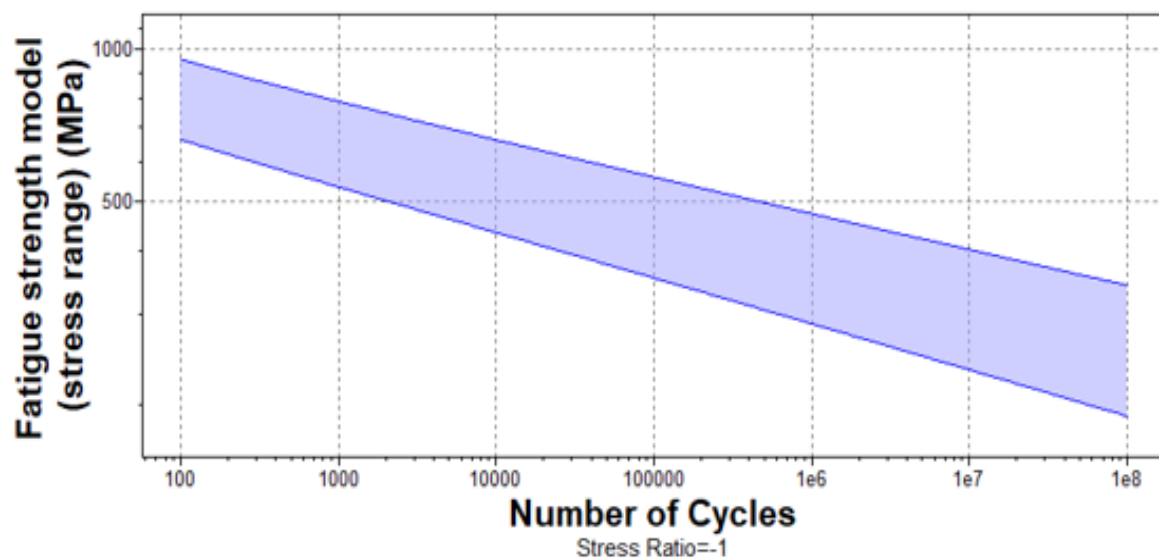
Base material

Fe (Iron)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)	1,8	-	2,2	%
B (boron)	0	-	0,005	%
C (carbon)	0,05	-	0,23	%
Cr (chromium)	0	-	1,2	%
Fe (iron)	91,4	-	95,8	%
Mn (manganese)	1,76	-	2,4	%
Mo (molybdenum)	0	-	1,2	%
Nb (niobium)	0	-	0,15	%
P (phosphorus)	0	-	0,08	%
S (sulfur)	0	-	0,015	%

Si (silicon)	0,6	-	0,8	%
Ti (titanium)	0	-	0,15	%
V (vanadium)	0	-	0,22	%
Price				
Price	* 1,22	-	1,31	USD/kg
Physical properties				
Density	7,8e3	-	7,9e3	kg/m ³
Mechanical properties				
Young's modulus	200	-	221	GPa
Yield strength (elastic limit)	700	-	900	MPa
Tensile strength	980	-	1,2e3	MPa
Elongation	7	-	13	% strain
Compressive strength	* 700	-	900	MPa
Flexural modulus	* 200	-	221	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 700	-	900	MPa
Shear modulus	* 76,9	-	84,8	GPa
Bulk modulus	* 167	-	184	GPa
Poisson's ratio	0,286	-	0,315	
Shape factor	32			
Hardness - Vickers	* 235	-	295	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 250	-	376	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 233	-	403	MPa
Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles				



Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 4,8e-4	-	6,4e-4	
Impact & fracture properties				
Fracture toughness	* 69	-	100	MPa.m ^{0.5}
Thermal properties				
Melting point	* 1,42e3	-	1,51e3	°C
Maximum service temperature	* 473	-	502	°C
Minimum service temperature	* -63	-	-35	°C
Thermal conductivity	* 42	-	50	W/m.°C
Specific heat capacity	* 447	-	500	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 11	-	13	µstrain/°C

Electrical properties				
Electrical resistivity	* 19	-	29	$\mu\text{ohm.cm}$
Galvanic potential	* -0,52	-	-0,44	V
Magnetic properties				
Magnetic type	Magnetic			
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Processing properties				
Metal casting	Unsuitable			
Metal cold forming	Excellent			
Metal hot forming	Acceptable			
Metal press forming	Excellent			
Metal deep drawing	Excellent			
Work hardening exponent, n	0,099	-	0,121	
Strength coefficient, K	1,2e3	-	1,46e3	MPa
Carbon equivalency	0,343	-	1,15	
Durability				
Water (fresh)	Acceptable			
Water (salt)	Limited use			
Weak acids	Limited use			
Strong acids	Unacceptable			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Limited use			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Acceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use			
Flammability	Non-flammable			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 33,4	-	36,9	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 2,75	-	3,03	kg/kg
Water usage	* 73,1	-	80,8	l/kg
Processing energy, CO2 footprint & water				
Rough rolling, forging energy	* 6,28	-	7,89	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	* 0,471	-	0,592	kg/kg
Rough rolling, forging water	* 4,43	-	6,65	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 12,3	-	15,5	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 0,92	-	1,16	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 7,19	-	10,8	l/kg
Wire drawing energy	* 45,2	-	57,3	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 3,39	-	4,29	kg/kg
Wire drawing water	* 18,3	-	27,5	l/kg
Metal powder forming energy	* 37,2	-	41,7	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 2,97	-	3,34	kg/kg
Metal powder forming water	* 40,9	-	61,3	l/kg
Vaporization energy	* 1,11e4	-	1,18e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 835	-	882	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,8e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1,4	-	1,64	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,105	-	0,123	kg/kg

Fine machining energy (per unit wt removed)	* 9,47	-	11,9	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,711	-	0,892	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 18,4	-	23,3	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 1,38	-	1,75	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 111	-	118	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)*	8,35	-	8,82	kg/kg
Recycling and end of life				
Recycle	False			
Embodied energy, recycling	* 8,63	-	9,54	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,678	-	0,749	kg/kg
Recycle fraction in current supply	* 39,9	-	44	%
Downcycle	False			
Combust for energy recovery	Combust for energy recovery			
Landfill	False			
Biodegrade	Biodegrade			

Notes

Other notes

Complex phase (CP) steels may be cold formed to make lightweight structural elements. These steels offer high as- delivered yield strength, good bendability and good stretch flangeability. Their high energy absorption capacity and fatigue strength make them well suited for safety components and suspension system parts.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.

No warranty is given for the accuracy of this data

Martensitic steel, YS1200 (hot rolled)

General information

Designation

EN 10346:2009 HDT1200M

Condition

Hot rolled

EN name

HDT1200M

EN number

1.0965

Tradenames

World Auto Steel: MS 1150/1400, ArcelorMittal: Martensitic 1200

Typical uses

Automotive: safety components, door beams, bumper reinforcements

Composition overview

Compositional summary

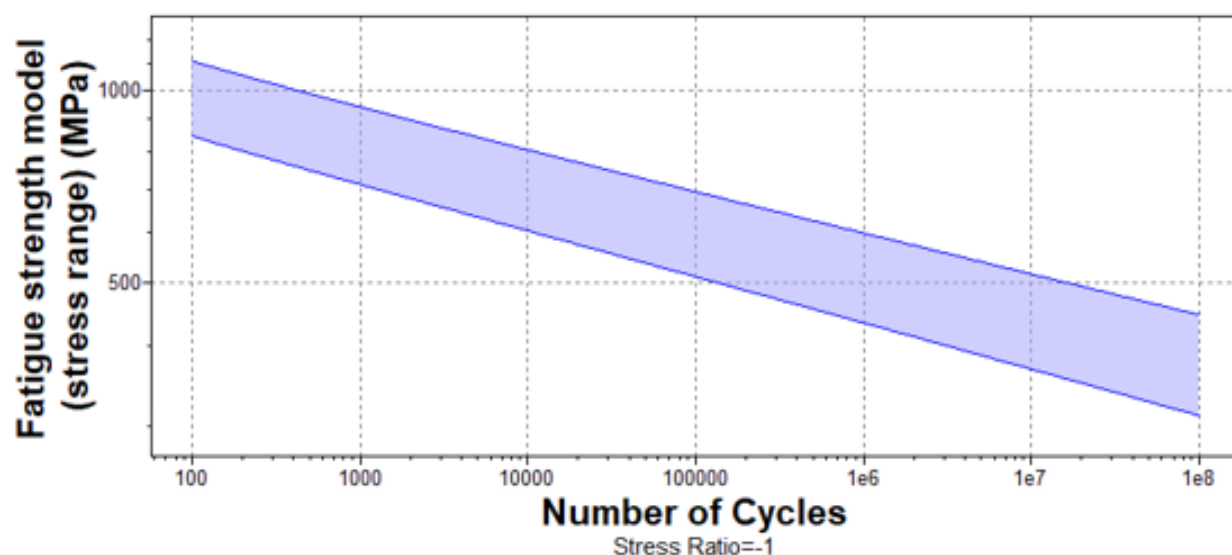
Fe97-100 (impurities: Al<2, Mn<2, Si<0.8, Cr<0.6, Mo<0.6, C<0.25, V<0.22, Nb<0.075, Ti<0.075, P<0.06, S<0.015, B<0.005)

Cr + Mo < 1.20, Nb + Ti < 0.15

Material family

Metal (ferrous)

Base material	Fe (Iron)			
Composition detail (metals, ceramics and glasses)				
Al (aluminum)	1,8	-	2,2	%
B (boron)	0	-	0,005	%
C (carbon)	0,05	-	0,25	%
Cr (chromium)	0	-	1,2	%
Fe (iron)	91,8	-	96,8	%
Mn (manganese)	1,2	-	2	%
Mo (molybdenum)	0	-	1,2	%
Nb (niobium)	0	-	0,15	%
P (phosphorus)	0	-	0,06	%
S (sulfur)	0	-	0,015	%
Si (silicon)	0,2	-	0,8	%
Ti (titanium)	0	-	0,15	%
V (vanadium)	0	-	0,22	%
Price				
Price	* 0,74	-	0,82	USD/kg
Physical properties				
Density	7,8e3	-	7,9e3	kg/m ³
Mechanical properties				
Young's modulus	200	-	221	GPa
Yield strength (elastic limit)	900	-	1,15e3	MPa
Tensile strength	1,2e3	-	1,4e3	MPa
Elongation	4	-	7	% strain
Compressive strength	* 900	-	1,15e3	MPa
Flexural modulus	* 200	-	221	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 900	-	1,15e3	MPa
Shear modulus	* 77,1	-	85,1	GPa
Bulk modulus	* 167	-	184	GPa
Poisson's ratio	0,286	-	0,315	
Shape factor	24			
Hardness - Vickers	* 350	-	404	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 399	-	476	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 367	-	517	MPa
Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles				



Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 3,3e-4 - 3,9e-4	
Impact & fracture properties		
Fracture toughness	* 113 - 163	MPa.m ^{0.5}
Thermal properties		
Melting point	* 1,42e3 - 1,51e3	°C
Maximum service temperature	* 473 - 502	°C
Minimum service temperature	* -63 - -35	°C
Thermal conductivity	* 42 - 50	W/m.°C
Specific heat capacity	* 447 - 500	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 11 - 13	µstrain/°C
Electrical properties		
Electrical resistivity	* 19 - 29	µohm.cm
Galvanic potential	* -0,51 - -0,43	V
Magnetic properties		
Magnetic type	Magnetic	
Optical properties		
Transparency	Opaque	
Processing properties		
Metal casting	Unsuitable	
Metal cold forming	Excellent	
Metal hot forming	Excellent	
Metal press forming	Excellent	
Metal deep drawing	Limited use	
Work hardening exponent, n	0,063 - 0,077	
Strength coefficient, K	1,74e3 - 2,13e3	MPa
Carbon equivalency	0,25 - 1,11	
Durability		
Water (fresh)	Acceptable	
Water (salt)	Limited use	
Weak acids	Limited use	
Strong acids	Unacceptable	
Weak alkalis	Acceptable	
Strong alkalis	Limited use	

Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Acceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use			
Flammability	Non-flammable			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 33,2	-	36,6	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 2,75	-	3,03	kg/kg
Water usage	22,9	-	68,6	l/kg
Processing energy, CO2 footprint & water				
Rough rolling, forging energy	* 7,99	-	10	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	* 0,599	-	0,75	kg/kg
Rough rolling, forging water	* 5,21	-	7,81	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 15,7	-	19,7	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 1,18	-	1,48	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 8,74	-	13,1	l/kg
Wire drawing energy	* 58	-	73,1	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 4,35	-	5,48	kg/kg
Wire drawing water	* 23,5	-	35,2	l/kg
Metal powder forming energy	* 37,2	-	41,7	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 2,97	-	3,34	kg/kg
Metal powder forming water	* 40,9	-	61,3	l/kg
Vaporization energy	* 1,11e4	-	1,18e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 835	-	882	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,8e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1,65	-	1,96	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,124	-	0,147	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 12	-	15,1	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,903	-	1,13	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 23,6	-	29,6	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 1,77	-	2,22	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 111	-	118	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)*	8,35	-	8,82	kg/kg
Recycling and end of life				
Recycle	False			
Embodied energy, recycling	* 8,59	-	9,49	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,674	-	0,745	kg/kg
Recycle fraction in current supply	* 39,9	-	44	%
Downcycle	False			
Combust for energy recovery	Combust for energy recovery			
Landfill	False			
Biodegrade	Biodegrade			

Notes

Other notes

Martensitic steels (MS) are part of the Complex Phase (CP) group of steels. These steels offer very high as-delivered yield strength and good bendability. Their energy absorption capacity and fatigue strength make them well suited for safety components.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Values marked * are estimates.

No warranty is given for the accuracy of this data

Low alloy steel, AISI 8650, tempered at 425°C & oil quenched

General information

Designation

AISI 8650

Condition

Tempered at 425°C & oil quenched
G86500

UNS number

US name

SAE NV5, SAE 8650, SAE 8645H,
SAE 8645, ASTM G87400, ASTM
G86450, ASTM G86420, ASTM
8650H, ASTM 8650, ASTM
8645H, ASTM 8645, ~SAE
G86450, ~ASTM G86500, ~ASTM
8645

JIS (Japanese) name

SFNCM 1030 D

Typical uses

General construction; general mechanical engineering; automotive; tools; axles; gears;
springs.

Composition overview

Compositional summary

Fe96-98 / Mn0.75-1 / Ni0.4-0.7 / C0.48-0.53 / Cr0.4-0.6 / Si0.15-0.35 / Mo0.15-0.25

(impurities: S<0.04, P<0.035)

Material family

Metal (ferrous)

Base material

Fe (Iron)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)

0,48 - 0,53 %

Cr (chromium)

0,4 - 0,6 %

Fe (iron)

* 96,5 - 97,7 %

Mn (manganese)

0,75 - 1 %

Mo (molybdenum)

0,15 - 0,25 %

Ni (nickel)

0,4 - 0,7 %

P (phosphorus)

0 - 0,035 %

S (sulfur)

0 - 0,04 %

Si (silicon)

0,15 - 0,35 %

Price

Price

* 0,71 - 0,76 USD/kg

Physical properties

Density

7,8e3 - 7,9e3 kg/m³

Mechanical properties

Young's modulus

206 - 216 GPa

Yield strength (elastic limit)

1,19e3 - 1,46e3 MPa

Tensile strength

1,3e3 - 1,6e3 MPa

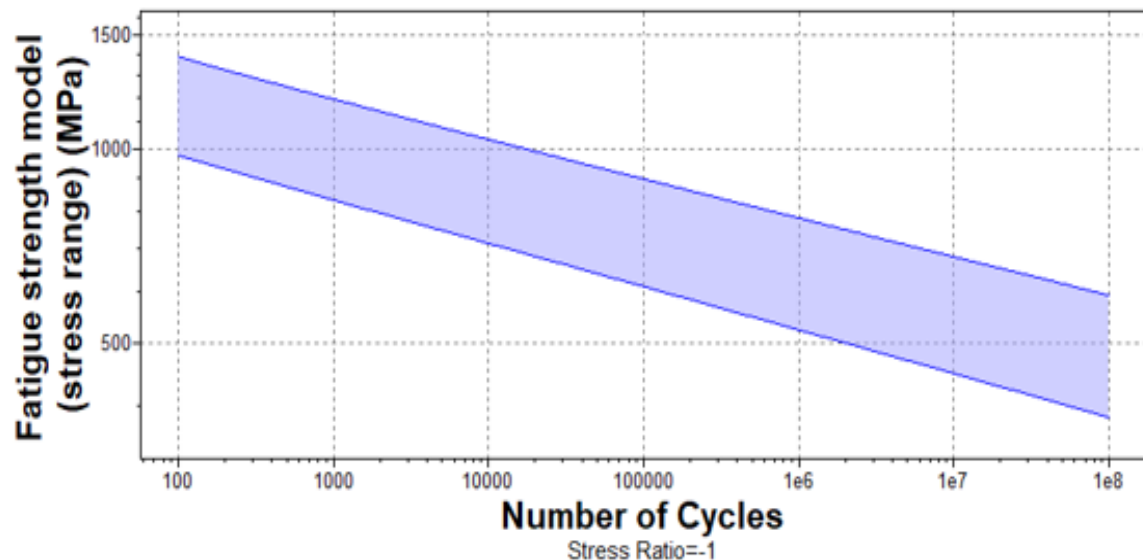
Elongation

9 - 15 % strain

Compressive strength

* 1,19e3 - 1,46e3 MPa

Flexural modulus	* 206	-	216	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	1,19e3	-	1,46e3	MPa
Shear modulus	79	-	85	GPa
Bulk modulus	159	-	176	GPa
Poisson's ratio	0,285	-	0,295	
Shape factor	18			
Hardness - Vickers	375	-	465	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 514	-	594	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 449	-	680	MPa
Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles				



Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 2,7e-4	-	3,4e-4	
Impact & fracture properties				
Fracture toughness	* 32	-	57	MPa.m ^{0.5}
Thermal properties				
Melting point	1,41e3	-	1,5e3	°C
Maximum service temperature	* 385	-	415	°C
Minimum service temperature	* -58	-	-28	°C
Thermal conductivity	* 35	-	45	W/m.°C
Specific heat capacity	* 460	-	500	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	11	-	12,5	μstrain/°C
Latent heat of fusion	* 265	-	280	kJ/kg
Electrical properties				
Electrical resistivity	* 23	-	35	μohm.cm
Galvanic potential	* -0,5	-	-0,42	V
Magnetic properties				
Magnetic type	Magnetic			
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Processing properties				
Metal casting	Unsuitable			
Metal cold forming	Excellent			
Metal hot forming	Excellent			
Metal press forming	Excellent			

Metal deep drawing	Limited use			
Carbon equivalency	0,742	-	0,913	
Durability				
Water (fresh)	Acceptable			
Water (salt)	Limited use			
Weak acids	Limited use			
Strong acids	Unacceptable			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Limited use			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Acceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Acceptable			
Flammability	Non-flammable			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	30,8	-	33,9	MJ/kg
Sources				
19.4 MJ/kg (Dhingra, Overly, Davis, 1999); 23 MJ/kg (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007); 27.9 MJ/kg (Ecoinvent v2.2); 29.2 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 32.8 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 34.7 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 35.4 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 37.2 MJ/kg (Sullivan and Gaines, 2010); 38 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 45.4 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008)				
CO2 footprint, primary production	2,26	-	2,49	kg/kg
Sources				
0.396 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 1.75 kg/kg (Ecoinvent v2.2); 1.81 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 2.23 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 2.3 kg/kg (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007); 2.74 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.77 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.87 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.89 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.03 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.27 kg/kg (Hammond and Jones, 2008)				
Water usage	* 47,4	-	52,4	l/kg
Processing energy, CO2 footprint & water				
Casting energy	* 10,8	-	12	MJ/kg
Casting CO2	* 0,812	-	0,898	kg/kg
Casting water	* 20,5	-	30,8	l/kg
Rough rolling, forging energy	* 10,9	-	12,1	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	* 0,819	-	0,905	kg/kg
Rough rolling, forging water	* 6,22	-	9,33	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 21,6	-	23,8	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 1,62	-	1,79	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 10,8	-	16,2	l/kg
Wire drawing energy	* 80	-	88,5	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 6	-	6,64	kg/kg
Wire drawing water	* 30,2	-	45,3	l/kg
Metal powder forming energy	* 37,5	-	41,4	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 3	-	3,32	kg/kg
Metal powder forming water	* 40,9	-	61,4	l/kg
Vaporization energy	* 1,09e4	-	1,2e4	MJ/kg

Vaporization CO2	* 815	-	901	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,8e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 2,07	-	2,29	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,155	-	0,172	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 16,4	-	18,2	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 1,23	-	1,36	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 32,4	-	35,8	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 2,43	-	2,68	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 109	-	120	
	MJ/kg			
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed) *	8,15	-	9,01	
	kg/kg			
Recycling and end of life				
Recycle	False			
Embodied energy, recycling	* 8,1	-	8,96	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,636	-	0,703	kg/kg
Recycle fraction in current supply	39,9	-	44	%
Downcycle	False			
Combust for energy recovery	Combust for energy recovery			
Landfill	False			
Biodegrade	Biodegrade			

Notes

Standards with similar compositions

The following information is taken from ASM AlloyFinder 3 - see link to References table for further information.

DGN B-203 8650 (Mexico)

NMX-B-300(91) 8650 (Mexico)

ASTM A29/A29M(93) 8650 (USA)

ASTM A322(96) 8650 (USA)

ASTM A331(95) 8650 (USA)

ASTM A519(96) 8650 (USA)

SAE 770(84) 8650 (USA)

AISI 8650 (USA)

COPANT 334 8650 (Venezuela)

COPANT 514 8650 (Venezuela)

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.

No warranty is given for the accuracy of this data

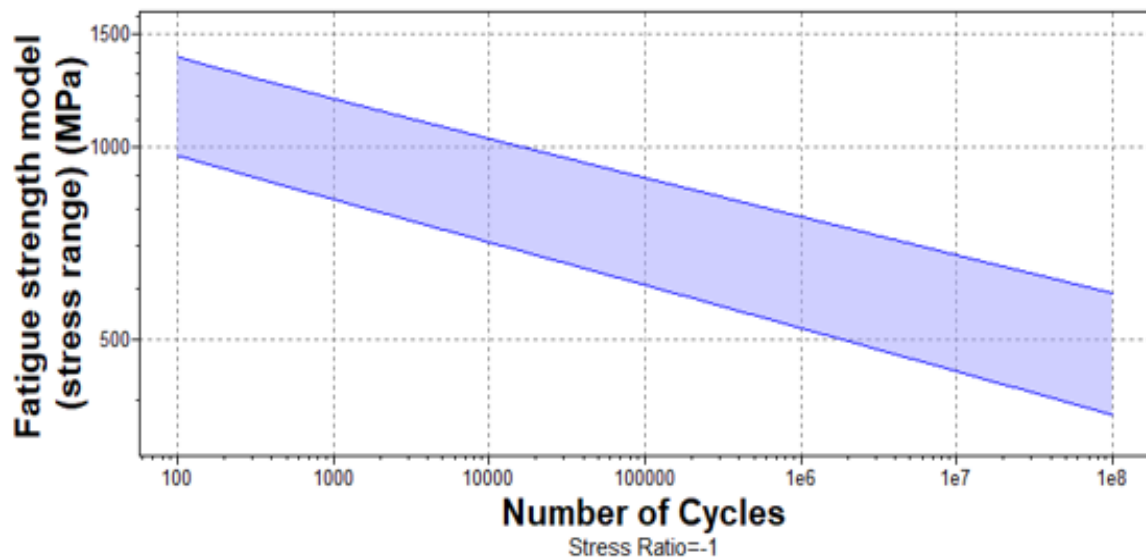
Low alloy steel, AISI 8740, tempered at 425°C & oil quenched

General information

Designation

AISI 8740

Condition	Tempered at 425°C & oil quenched			
UNS number	G87400			
US name	SAE 8740, ASTM G87400, ASTM 8740H, ASTM 8740, ASTM 8640H, ASTM 8640, ~SAE 8640			
ISO name	41CrNiMoS2, 1b, 1A, ~41CrNiMo2E, ~41CrNiMo2			
JIS (Japanese) name	SNCM240			
Typical uses				
General construction; general mechanical engineering; automotive; tools; axles; gears; springs.				
Composition overview				
Compositional summary				
Fe96-98 / Mn0.75-1 / Ni0.4-0.7 / Cr0.4-0.6 / C0.38-0.43 / Mo0.2-0.3 / Si0.15-0.35 (impurities: S<0.04, P<0.035)				
Material family	Metal (ferrous)			
Base material	Fe (Iron)			
Composition detail (metals, ceramics and glasses)				
C (carbon)	0,38	-	0,43	%
Cr (chromium)	0,4	-	0,6	%
Fe (iron)	* 96,5	-	97,7	%
Mn (manganese)	0,75	-	1	%
Mo (molybdenum)	0,2	-	0,3	%
Ni (nickel)	0,4	-	0,7	%
P (phosphorus)	0	-	0,035	%
S (sulfur)	0	-	0,04	%
Si (silicon)	0,15	-	0,35	%
Price				
Price	* 0,72	-	0,77	USD/kg
Physical properties				
Density	7,8e3	-	7,9e3	kg/m^3
Mechanical properties				
Young's modulus	201	-	212	GPa
Yield strength (elastic limit)	1,22e3	-	1,5e3	MPa
Tensile strength	1,29e3	-	1,58e3	MPa
Elongation	10	-	16	% strain
Compressive strength	* 1,22e3	-	1,5e3	MPa
Flexural modulus	* 201	-	212	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	1,22e3	-	1,5e3	MPa
Shear modulus	77	-	83	GPa
Bulk modulus	155	-	173	GPa
Poisson's ratio	0,285	-	0,295	
Shape factor	17			
Hardness - Vickers	370	-	460	HV
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 510	-	590	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 445	-	677	MPa
Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles				



Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 2,7e-4 - 3,4e-4	
Impact & fracture properties		
Fracture toughness	* 30 - 54	MPa.m ^{0.5}
Thermal properties		
Melting point	1,43e3 - 1,51e3	°C
Maximum service temperature	* 385 - 415	°C
Minimum service temperature	* -58 - -28	°C
Thermal conductivity	* 35 - 55	W/m.°C
Specific heat capacity	* 420 - 520	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 11 - 13	μstrain/°C
Latent heat of fusion	* 265 - 280	kJ/kg
Electrical properties		
Electrical resistivity	* 23 - 35	μohm.cm
Galvanic potential	* -0,51 - -0,43	V
Magnetic properties		
Magnetic type	Magnetic	
Optical properties		
Transparency	Opaque	
Processing properties		
Metal casting	Unsuitable	
Metal cold forming	Excellent	
Metal hot forming	Excellent	
Metal press forming	Excellent	
Metal deep drawing	Limited use	
Carbon equivalency	0,652 - 0,823	
Durability		
Water (fresh)	Acceptable	
Water (salt)	Limited use	
Weak acids	Limited use	
Strong acids	Unacceptable	
Weak alkalis	Acceptable	
Strong alkalis	Limited use	
Organic solvents	Excellent	

Oxidation at 500C	Acceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Acceptable			
Flammability	Non-flammable			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	30,8	-	33,9	MJ/kg
Sources	19.4 MJ/kg (Dhingra, Overly, Davis, 1999); 23 MJ/kg (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007); 27.9 MJ/kg (Ecoinvent v2.2); 29.2 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 32.8 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 34.7 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 35.4 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 37.2 MJ/kg (Sullivan and Gaines, 2010); 38 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 45.4 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008)			
CO2 footprint, primary production	2,26	-	2,49	kg/kg
Sources	0.396 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 1.75 kg/kg (Ecoinvent v2.2); 1.81 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 2.23 kg/kg (Voet, van der and Oers, van, 2003); 2.3 kg/kg (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007); 2.74 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.77 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.87 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 2.89 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.03 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.27 kg/kg (Hammond and Jones, 2008)			
Water usage	* 47,6	-	52,6	l/kg
Processing energy, CO2 footprint & water				
Casting energy	* 10,8	-	11,9	MJ/kg
Casting CO2	* 0,807	-	0,892	kg/kg
Casting water	* 20,4	-	30,6	l/kg
Rough rolling, forging energy	* 11,2	-	12,4	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	* 0,84	-	0,928	kg/kg
Rough rolling, forging water	* 6,34	-	9,51	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 22,1	-	24,4	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 1,66	-	1,83	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 11	-	16,5	l/kg
Wire drawing energy	* 82,1	-	90,8	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 6,16	-	6,81	kg/kg
Wire drawing water	* 31	-	46,4	l/kg
Metal powder forming energy	* 37,5	-	41,4	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 3	-	3,32	kg/kg
Metal powder forming water	* 40,9	-	61,4	l/kg
Vaporization energy	* 1,09e4	-	1,2e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 815	-	901	kg/kg
Vaporization water	* 4,53e3	-	6,8e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 2,11	-	2,33	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,158	-	0,175	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 16,8	-	18,6	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 1,26	-	1,4	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 33,2	-	36,7	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 2,49	-	2,75	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 109	-	120	MJ/kg

Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)*	8,15	- 9,01	
	kg/kg		
Recycling and end of life			
Recycle	False		
Embodied energy, recycling	* 8,1	- 8,96	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,636	- 0,703	kg/kg
Recycle fraction in current supply	39,9	- 44	%
Downcycle	False		
Combust for energy recovery	Combust for energy recovery		
Landfill	False		
Biodegrade	Biodegrade		

Notes

Keywords

P11, Pelton Casteel, Inc. (USA); A-1204, AFORA (Aceros Afora S.A.) (SPAIN);

Standards with similar compositions

The following information is taken from ASM AlloyFinder 3 - see link to References table for further information.

NBN 253-02 40NiCrMo2 (Belgium)

NBN 253-06 40NiCrMo3 (Belgium)

AFNOR 40NCD2 (France)

AFNOR 40NCD2TS (France)

AFNOR 40NCD3TS (France)

JIS G4103(79) SNCM240 (Japan)

NMX-B-300(91) 8740 (Mexico)

AS 1444(96) 8740 (NSW Australia)

ISO 683-8 1 (International)

ISO 683-8 1A (International)

ISO 683-8 1b (International)

AMS 6322 (USA)

AMS 6323 (USA)

AMS 6325 (USA)

AMS 6327 (USA)

AMS 6358 (USA)

AMS 7496 (USA)

ASTM A29/A29M(93) 8740 (USA)

ASTM A322(96) 8740 (USA)

ASTM A331(95) 8740 (USA)

ASTM A519(96) 8740 (USA)

ASTM A752(93) 8740 (USA)

MIL-S-6049A(67) 8740 (USA)

SAE 770(84) 8740 (USA)

AISI 8740 (USA)

COPANT 334 8740 (Venezuela)

COPANT 514 8740 (Venezuela)

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.

No warranty is given for the accuracy of this data