

Universidad Autónoma de Baja California

Programa de Maestría en Ciencias e Ingeniería



Tesis:

Herramienta para la selección de resina plástica con base a propiedades mecánicas para el sector metalmecánico

Que presenta para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Presenta:

Ricardo Fernández Maclis

Director de tesis:

Dra. Luz del Consuelo Olivares Fong

Codirector de tesis:

Dra. Aída López Guerrero

Mexicali, Baja California, México a diciembre de 2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que han estado a mi lado a lo largo de este proceso de formación, brindándome su apoyo, su confianza y su amor incondicional. En primer lugar, a mis queridas amigas Monica, Dania, Gisel y Antonio, quienes, con su aliento constante y su actitud positiva, me impulsaron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Su firme creencia en mis capacidades me motivó a perseverar, creciendo cada día tanto como persona como profesional.

A mis amigos del intercambio Erasmus (Agatka, Wiktorja, Lea, Renato), cuya amistad y apoyo fueron fundamentales para sobrellevar los retos de estar lejos de mi país. Gracias a ellos, pude superar las dificultades de estar en un entorno nuevo y cumplir mis sueños profesionales, siempre con una sonrisa y el ánimo de seguir adelante.

A mi familia, especialmente a mi mamá, papá, abuelos y hermana, quienes, aunque no siempre comprendían por completo el camino que elegí, siempre estuvieron allí para apoyarme. Su amor y motivación me dieron fuerzas para continuar, aún cuando las circunstancias parecían desafiantes, y su confianza en mí fue un pilar fundamental en mi perseverancia.

Finalmente, dedico este trabajo a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de todo este proceso. Su sabiduría, su paz y su fe me han acompañado, permitiéndome superar las pruebas y confiar en que Él proveería en cada paso de este recorrido.

A todas estas personas, y a todas aquellas que de alguna manera contribuyeron a que pudiera llegar hasta aquí, les ofrezco mi más sincero agradecimiento y dedicación. Este trabajo es también un reflejo de su apoyo incondicional y su influencia en mi vida.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios por su constante presencia en mi vida. Gracias a Él por brindarme la fortaleza, sabiduría y paciencia necesarias para superar cada desafío que se presentó durante este proceso. En los momentos de incertidumbre, su guía fue mi refugio, dándome paz y confianza para seguir adelante. Su gracia y provisión me han permitido alcanzar esta meta, y reconozco que sin su apoyo este logro no hubiera sido posible. A Dios le agradezco por cada paso dado, por cada oportunidad brindada y por estar siempre presente en mi vida.

Agradezco profundamente a mi directora de tesis, la Dra. Luz del Consuelo Olivares Fong, por su constante apoyo y orientación a lo largo de todo este proceso. En cada momento de dificultad, ya sea académico o personal, ella estuvo allí para guiarme con paciencia y sabiduría. Su capacidad para encontrar el enfoque positivo, incluso en las circunstancias más desafiantes, ha sido un faro que iluminó mi camino. Le agradezco profundamente por enseñarme, no solo en lo académico, sino también por transmitir el verdadero significado de ser un maestro.

A mi codirectora de tesis, la Dra. Aida López Guerrero, le agradezco por su confianza y apoyo incondicional. A pesar de los retos y dificultades que surgieron, siempre creyó en mí y en mi capacidad para seguir adelante. Sus constantes consejos, que siempre subrayaban los detalles más importantes, me han permitido convertirme en un mejor profesional. Estoy profundamente agradecido por todo su apoyo y dedicación.

Mi agradecimiento al Maestro Rigoberto Zamora Alarcón, quien desde el primer momento me brindó su apoyo y confianza, comenzando desde el proceso de ingreso. Agradezco sinceramente todo el conocimiento técnico que me compartió, así como el respaldo académico que me proporcionó a lo largo de este recorrido. Su apoyo ha sido invaluable y estoy profundamente agradecido por su orientación y dedicación.

A mis sinodales, la Dra. Karla Isabel Velázquez Victorica y el Dr. Carlos Raúl Navarro González, quienes siempre mostraron un profundo interés en mi formación y contribuyeron significativamente a la calidad de este trabajo. Sus recomendaciones y guías en el proceso de estructuración, evaluación y presentación de la información me han permitido desarrollar una mejor versión de este trabajo, y les agradezco sinceramente por su valiosa contribución.

Finalmente, quiero agradecer al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONACYT) por su apoyo económico, que ha sido fundamental para mi desarrollo profesional, y a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por brindarme la oportunidad de seguir desarrollándome en un entorno académico enriquecedor y por siempre estar dispuesto a apoyarme en cada necesidad que surgió a lo largo de mi formación.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento. Los llevaré siempre en mi corazón con profundo cariño, admiración y respeto.

Índice

INTRODUCCIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
JUSTIFICACIÓN	17
OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
HIPÓTESIS	19
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE	19
1.1 CRECIENTE URGENCIA Y NECESIDAD ANTE LA COMPLEJIDAD DEL MOLDEO POR INYECCIÓN PLÁSTICA	19
1.2 IMPORTANCIA DE UNA ETAPA PRELIMINAR PARA EL PROCESO DE MOLDEO	21
1.3 PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DEL PROCESO DE MOLDEO (TEMPERATURA, PRESIÓN, ENFRIAMIENTO)	23
1.4 MÉTODOS PARA PARAMETRIZAR Y OPTIMIZAR EL PROCESO DE MOLDEO: MODELOS MATEMÁTICOS.	29
1.5 MÉTODOS PARA PARAMETRIZAR Y OPTIMIZAR EL PROCESO DE MOLDEO: MODELOS 3D E INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA).	33
1.6 PROPIEDADES DE FLUIDEZ (O DE FLUIDOS) EN EL PROCESO DE MOLDEO	38
1.7 DIVERSIDAD EN TIPOS DE RESINAS Y ADITIVOS AL PROCESO.	40
1.8 PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL PROCESO DE MOLDEO	44
1.9 LA DUREZA COMO PROPIEDAD MECÁNICA Y SU REPRESENTATIVIDAD	48
1.10 IMPORTANCIA DEL CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE	54
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	56
2.1 ETAPAS DEL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN PLÁSTICA	56
2.2 PARÁMETROS DE MOLDEO	59
2.3 LAS RESINAS Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS CON RELACIÓN AL MOLDE DE INYECCIÓN	61
2.4 TIPOS DE PLÁSTICOS: TERMOPLÁSTICOS, TERMOESTABLES Y ELASTÓMEROS.	63
2.5 MORFOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS	65
2.6 POLIMERIZACIÓN	65
2.7 CRISTALIZACIÓN DE POLÍMEROS Y LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA	66
2.8 DUREZA DE LOS POLÍMEROS	66
2.9 RESISTENCIA TÉRMICA Y A LA TRACCIÓN DE LOS POLÍMEROS	67
2.10 DUCTILIDAD DE LOS PLÁSTICOS	67
2.11 TENSIÓN RESIDUAL DE LOS POLÍMEROS	68
2.12 ELONGACIÓN DE LAS RESINAS PLÁSTICAS	68
2.13 DENSIDAD DE LOS POLÍMEROS	68
2.14 MÓDULO DE LA ELASTICIDAD	69
2.15 DEFECTOS DE CALIDAD DE LOS COMPONENTES PLÁSTICOS	69

2.16 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS	71
2.17 NORMA ISO 48-4:2018: MEDICIÓN DE DUREZA DE POLÍMEROS	71
2.18 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA CONTROLAR LOS PARÁMETROS DE MOLDEO:.....	72
2.19 IMPORTANCIA DEL SECTOR METALMECÁNICO EN EL MUNDO	74
2.20 BLOQUES ECONÓMICOS MUNDIALES Y SU INFLUENCIA EN LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO	76
2.21 CALENTAMIENTO GLOBAL: PERSPECTIVA PARA UNA MEJOR SELECCIÓN DE MATERIALES	77

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA 78

3.1 FASE I: DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	78
3.2 FASE II: INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTO	78
3.2.1 UNIFICACIÓN DE CRITERIOS PARA EXPERIMENTACIÓN:	80
3.2.2 VARIABLES DE RESPUESTA, RANGOS Y VARIABLES QUE AFECTEN LA RESPUESTA.....	81
3.2.3 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO	82
3.2.4 MEDICIÓN DE DUREZA.....	86
3.3 FASE III: DISEÑO DE HERRAMIENTA.....	87
3.4 FASE IV: EVALUACIÓN DE RESULTADOS	88

CAPÍTULO IV: RESULTADOS 89

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON RESINA PA66 NATURAL SIN CARGAS ..	89
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON RESINA PA66 30% TALCO MINERAL. ..	91
4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON RESINA PA66 30% FIBRA DE VIDRIO (GF30).	92
4.4 COMPARATIVO DE RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LAS RESINAS (PA66 SIN CARGAS, PA66 GF30 Y PA66 30% TALCO MINERAL)	94
4.5 VALIDACIÓN ESTADÍSTICA CON ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) MEDIANTE DISEÑO FACTORIAL GENERAL DE 3 FACTORES.....	95
4.6 VALIDACIÓN DE DATOS CON MINITAB 2018	98
4.7 VALIDACIÓN CON CORRIDAS DE PRUEBA.....	100
4.8 MODELADO DE FUNCIONES DE CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE CONSIDERANDO EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA	100
4.9 MODELACIÓN DE HERRAMIENTA.....	106
4.10 VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	108

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN 112

5.1 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MOLDEO Y LA DUREZA DE LOS POLÍMEROS.....	112
5.2 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE DUREZA DE LAS VARIABLES DE RESINA.	113
5.3 EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA Y CONCIENTIZACIÓN DEL IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE DEL USO DE LOS PLÁSTICOS.....	113
5.4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS Y EFICACIA DEL MODELO PREDICTIVO	114

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 116

Índice de Tablas

TABLA 1: RELACIÓN DE ACTIVIDADES CON VALIDACIÓN DE RESINAS PLÁSTICAS.	13
TABLA 2: APLICABILIDAD DE LA HERRAMIENTA EN LAS ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE INGENIERÍA	18
TABLA 3: FASES Y PARÁMETROS ESTUDIADOS.....	28
TABLA 4: MÉTODOS Y PROPIEDADES MECÁNICAS ESTUDIADAS.	29
TABLA 5: TENDENCIAS DE MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DEL MOLDEO POR INYECCIÓN.	33
TABLA 6: MÉTODOS Y SOFTWARE EN ESTUDIOS DE MOLDEO POR INYECCIÓN.	36
TABLA 7: MÉTODOS MATEMÁTICOS Y ASISTENCIA COMPUTARIZADA ESTUDIADA.	37
TABLA 8: PARÁMETROS Y PROPIEDADES MECÁNICAS REVISADAS EN LA LITERATURA RELACIONADAS CON LA FLUIDEZ DE LOS POLÍMEROS.	39
TABLA 9: PARÁMETROS Y PROPIEDADES MECÁNICAS OBSERVADAS EN LA LITERATURA RELACIONADA CON RESINAS PLÁSTICAS CON ADITIVOS.	44
TABLA 10: PARÁMETROS Y PROPIEDADES MECÁNICAS IDENTIFICADAS EN LA LITERATURA EN RELACIÓN A LOS PARÁMETROS DE MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO.....	48
TABLA 11: PARÁMETROS DE MOLDEO Y ENFOQUE EN LA DUREZA COMO PROPIEDAD MECÁNICA EN LA LITERATURA.	54
TABLA 12: TEMPERATURAS DE FUSIÓN DE POLÍMEROS.....	61
TABLA 13: EJEMPLOS DE APLICACIONES Y FAMILIAS DE TERMOPLÁSTICOS.....	63
TABLA 14: EJEMPLOS DE APLICACIONES Y FAMILIAS DE TERMOESTABLES.	64
TABLA 15: EJEMPLOS DE APLICACIONES Y FAMILIAS DE ELASTÓMEROS.	64
TABLA 16: PROPIEDADES MECÁNICAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN CON UNIDAD DE MEDIDA MÁS COMÚN.	71
TABLA 17: PARÁMETROS DE MOLDEO QUE AFECTAN LA PROPIEDAD MECÁNICA DE LAS RESINAS PLÁSTICAS.	81
TABLA 18: PARÁMETROS INICIALES DE PROCESO DE MOLDEO.	84
TABLA 19: DUREZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR RESPECTO A TEMPERATURA DE PA66 NATURAL.	89
TABLA 21: DUREZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR RESPECTO A TEMPERATURA DE PA66 GF30	92
TABLA 22: COMPARATIVO DE DUREZAS EN DIFERENTES MATERIALES.	94
TABLA 23: AGRUPACIÓN DE DATOS PARA ANOVA.	95
TABLA 24: ANÁLISIS PARA ANOVA DE FACTOR A-270.....	96
TABLA 25: ANÁLISIS PARA ANOVA DE FACTOR A-280.....	96
TABLA 26: ANÁLISIS PARA ANOVA DE FACTOR A-290.....	96
TABLA 27: RESUMEN DE TOTALES PARA ANOVA.....	97
TABLA 28: ANOVA DE DATOS FACTOR A Y B.	97
TABLA 29. RESUMEN DE MODELO DE ANOVA	98
TABLA 30. RESULTADO DE ANOVA POR MINITAB.....	99
TABLA 31: RESULTADOS DE CORRIDAS DE VALIDACIÓN DE TEMPERATURA Y SU DUREZA	100
TABLA 32: RESULTADOS DE COMPARACIÓN DE VARIANTES DE PA66 CON SIMAPRO 9.5.	102
TABLA 33: COMENTARIOS DEL GRUPO FOCAL DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA.....	110

Índice de figuras

FIGURA 1: TIEMPOS PROMEDIO DE POR FASE VALIDACIÓN DE RESINAS PLÁSTICAS.....	12
FIGURA 2: ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ DE PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	14
FIGURA 3: LÍNEA DEL TIEMPO DE LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO.	20
FIGURA 4: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PROCESO DEL MOLDE DE INYECCIÓN PLÁSTICA.....	22
FIGURA 5: POSIBLES IMPACTOS DE ADITIVOS EN RESINAS PLÁSTICAS.	43
FIGURA 6: MODELO DE RELACIÓN DE AFECTACIONES AL COMPONENTE PLÁSTICO.	50
FIGURA 7: EJEMPLO DE DISEÑO DE MOLDES ASISTIDO POR COMPUTADORA.	57
FIGURA 8: PROCESO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO POR MOLDEO (INYECCIÓN).	58
FIGURA 9: PROCESO DE EMPAQUE DE PLÁSTICO POR MOLDEO (EMPAQUE).....	58
FIGURA 10: PROCESO DE EMPAQUE DE PLÁSTICO POR MOLDEO (ENFRIAMIENTO).	59
FIGURA 11: PROCESO DE EMPAQUE DE PLÁSTICO POR MOLDEO (EYECCIÓN).	59
FIGURA 12: DEFECTOS DE CALIDAD Y POSIBLES CAUSAS.	70
FIGURA 13: MÁQUINA INYECTORA DE PLÁSTICO DEMAG D100 NCIII.	83
FIGURA 14: MOLDE DE PIEZAS PROBETA, DIMENSIONES 33X26 CM, PESO APROX. 200KG.	83
FIGURA 15: ESPESOR DE MUESTRA PROBETA PARA EVALUACIÓN DE DUREZA 2.44 MM.....	84
FIGURA 16: MAQUINA SECADORA DE POLÍMEROS PIVANT 150 IX.....	85
FIGURA 17: CONFIGURACIÓN DE ZONAS DE TRANSICIÓN DE TEMPERATURA EN TORNILLO DE INYECCIÓN.....	85
FIGURA 18: ZONAS DE TRANSICIÓN DE TEMPERATURA EN TORNILLO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO.	86
FIGURA 19: INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE DUREZA SHORE D, MARCA GENÉRICA.	86
FIGURA 20: EXTRACTO DE BASE DE DATOS CREADA PARA TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	87
FIGURA 21: BOSQUEJO DE LA HERRAMIENTA.	88
FIGURA 22: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LA HERRAMIENTA DE VALIDACIÓN DE RESINAS.....	89
FIGURA 23: DUREZA PROMEDIO EN DIFERENTES TEMPERATURAS DE PA66 NATURAL.	90
FIGURA 24: VARIABILIDAD DE DUREZA EN DIFERENTES TEMPERATURAS DE PA66 NATURAL.	90
FIGURA 25: DUREZA PROMEDIO EN DIFERENTES TEMPERATURAS DE PA66 30% TALCO MINERAL.	91
FIGURA 26: VARIABILIDAD DE DUREZA EN DIFERENTES TEMPERATURAS DE PA66 30% TALCO.....	92
FIGURA 27: DUREZA PROMEDIO EN DIFERENTES TEMPERATURAS DE PA66 GF30.	93
FIGURA 28: VARIABILIDAD DE DUREZA EN DIFERENTES TEMPERATURAS DE PA66 GF30.	93
FIGURA 29: COMPARATIVO DE DUREZAS EN DIFERENTES MATERIALES.....	94
FIGURA 30: AGRUPACIÓN DE INFORMACIÓN PARA REALIZAR ANOVA CON ASISTENCIA DE MINITAB ...	98
FIGURA 31: DIAGRAMA DE PARETO DE RELACIÓN DE FACTORES A, B Y AB.....	99
FIGURA 32: RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE VARIANTES DE PA66 CON SIMAPRO 9.5.	102
FIGURA 33: RESULTADOS DE LOS IMPACTOS DE LAS CATEGORÍAS PA66 CON SIMAPRO 9.5.	103
FIGURA 34: RESULTADOS DE LOS IMPACTOS DE LAS CATEGORÍAS PA66 GF30 CON SIMAPRO 9.5..	104
FIGURA 35: RESULTADOS DE PRODUCCIÓN DE PA66 GF30 CON SIMAPRO 9.5.....	104
FIGURA 36: RESULTADOS DE LOS IMPACTOS DE LAS CATEGORÍAS DE TALCO MINERAL PA66 30% CON SIMAPRO 9.5.....	105
FIGURA 37: MODELO DE HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE DUREZA.	107
FIGURA 38: PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE TIEMPO DE VALIDACIÓN PARA SELECCIONAR RESINAS PLÁSTICAS EN TÉRMINOS DE PROPIEDAD MECÁNICA DE DUREZA.....	108
FIGURA 39: FACILIDAD DE USO DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA	109

Introducción

La industria del plástico ha experimentado una evolución significativa desde sus inicios en 1869, cuando los hermanos Hyatt inventaron el primer plástico sintético (Cobián, 2012), esta transformación ha llevado al plástico a convertirse en la tercera industria manufacturera más grande a nivel mundial. Durante la revolución industrial, la introducción de plásticos facilitó la producción de productos más económicos y accesibles para diversas poblaciones, convirtiéndose en un material esencial para la creación de productos industriales asequibles y de fácil fabricación.

En los Estados Unidos de América, se proyecta un mercado en la industria de los plásticos de 750.1 mil millones de dólares para 2028 (Brandt, 2021), donde aproximadamente el 80% de la producción de plástico se realiza mediante el proceso de moldeo por inyección (Giboz et al, 2007), uno de los métodos más comunes en la industria de transformación de plásticos. Se puede denotar que la industria del plástico tiene una proyección en el futuro cada vez más grande en un mercado con gran demanda, al ser un material con múltiples aplicaciones.

De acuerdo con la Organización de Plásticos Europea en 2019, la producción anual de productos plásticos a nivel mundial alcanzó los 368 millones de toneladas (Plastics Europe, 2021), donde la Unión Europea contribuyó con el 16% de esta producción, generando un volumen de negocio superior a los 348 millones de dólares (Brandt, 2021). Sin embargo, la contingencia sanitaria mundial ocurrida en 2020 provocó una disminución del 8.5% en la producción de plásticos, teniendo una recuperación parcial en 2021, logrando rescatar sus proyecciones de consumo a niveles prepandemia en 2022 (Plastics Europe, 2021). La pandemia logró desacelerar la economía mundial en múltiples campos, el campo referente al plástico se vio fuertemente afectado, aunque su recuperación fue relativamente rápida.

El moldeo por inyección plástica es uno de los más comunes para la manufactura en masa de componentes plásticos (Giboz et al, 2007), tal como se ha mencionado anteriormente, el uso y la fabricación de componentes plásticos es utilizado en múltiples áreas, su utilización y empleabilidad abarca desde productos comunes del hogar hasta en complejos sistemas aeroespaciales. El presente estudio se centra en un componente plástico de aplicación en la industria metalmecánica para aplicaciones en correderas, este producto al igual que el plástico tiene múltiples aplicaciones desde cajones en muebles del hogar y oficina, hasta en complejos desarrollos de bases espaciales. Dicho lo anterior, el proceso de moldeo por inyección implica fundir el polímero y moldearlo bajo presión y temperatura elevadas, posteriormente a este proceso inicia su solidificación en la forma deseada (Rios Jasso, 2009). Esta técnica, que ha evolucionado con el tiempo, alcanzó un hito en la década de 1980 al buscar la miniaturización de equipos para la fabricación de componentes plásticos, optimizando espacios y reduciendo costos (Zhao J et al, 2004). Sin embargo, la innovación se ha centrado en la tecnología de fabricación de herramientas y no en el proceso de moldeo por inyección en sí.

El proceso de inyección de plástico consta de cuatro fases esenciales: inyección, empaque, curación o enfriamiento del componente y eyección (Khan et al, 2014). Para este estudio, se añade una fase inicial denominada "diseño", ya que la complejidad geométrica, los materiales y la aplicación afectan el proceso de moldeo por inyección. Estas fases y los tiempos de ciclo son variables y dependen de los materiales y el diseño del componente, siendo el enfriamiento responsable del 70%-80% del tiempo de fabricación (Shinde et al, 2018). La investigación se centra en abordar una brecha crítica en la industria de fabricación: la falta de herramientas ágiles para la toma de decisiones de selección de materiales plásticos, especialmente en procesos de moldeo por inyección. Al profundizar en la comprensión de la tecnología de moldeo y las propiedades mecánicas de los materiales, este estudio ofrece una herramienta que no solo analiza el proceso de fabricación de componentes plásticos, sino que también propone una solución tecnológica avanzada en el impacto ambiental que generan los diferentes tipos de resinas plásticas. Esta herramienta está diseñada para predecir eficazmente la propiedad mecánica de dureza, siendo esta la propiedad más estudiada por los investigadores en la literatura, así como los parámetros de moldeo, facilitando la decisión respecto a la selección de materiales de una manera más rápida y precisa, perfectamente alineada con los requisitos específicos de diseño. De esta manera, se contribuye a optimizar los recursos y mejorar la competitividad en la industria, respondiendo así a las urgentes demandas de agilidad y eficiencia en la producción.

El estado de Baja California, ubicado al noroeste de México, destaca como un área industrial ("hub" en su definición en inglés), contribuyendo con el 21.7% del PIB local y alrededor de 740 millones de pesos a nivel nacional (Rosales, 2018). La industria de los plásticos en la región presenta un crecimiento anual del 1.4%, lo que representaba el 4.25% del PIB estatal en 2014, según datos del INEGI.

Los resultados de esta investigación buscan contribuir a una planificación más eficiente en la compra de materiales y apoyando en la toma de decisiones sobre la elección de estos mismos, impulsando proyectos para reducir costos y mejorar la selección de materias primas. La herramienta desarrollada, está orientada al sector metalmeccánico, en específico en empresas manufactureras que empleen o tengan producción de componentes plástico mediante la tecnología de moldeo por inyección plástica, se enfoca en una empresa maquiladora del noreste de México especializada en correderas industriales. La investigación detalla la selección de un componente plástico que utiliza la resina PA66, la cual es utilizada en cerca del 85% de los componentes plásticos que manufactura la entidad investigada en sus productos finales para sus clientes automotrices y aeroespaciales, quienes destacan por su gran importancia dentro de su cartera de clientes con requerimientos con un mayor grado de cuidado, considerando la complejidad del proceso y la limitación de tiempo para realizar múltiples pruebas en un período de dos años, dicho componente es fabricado con la resina PA66, siendo esta una de las más utilizadas de acuerdo a información obtenida por la compañía, de esta manera se satisface una necesidad real.

En respuesta a la epidemia del SARS-CoV-2, el Banco Mundial informa que la economía se desaceleró y no se prospecta un crecimiento hasta 2023 (Banco Mundial,

2022). Esta desaceleración afectó la cadena de suministro, causando interrupciones en el flujo de materiales siendo uno de los conflictos la toma de decisión oportuna en la selección, tanto de materiales como de proveedores. La herramienta diseñada y propuesta busca agilizar la selección de resinas plásticas similares para la fabricación de componentes en condiciones actuales de escasez de materias primas. Adicionalmente, se incluye un apartado para la concientización sobre la elección de materiales amigables con el medio ambiente, debido a que los esfuerzos globales en cumplimiento con la agenda ambiental para 2030 por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la cual busca reducir las emisiones de CO₂ en un 45% y mantener el calentamiento global a menos de 1.5 °C.

La elección de una resina adecuada es crucial en el proceso de moldeo por inyección, ya que afecta directamente las propiedades mecánicas del producto final. Debido a que influyen múltiples factores para la elección de una resina y dar respuesta a las necesidades de la industria actual, la herramienta propuesta considera factores como volumen anual, la dureza y la temperatura. Excluyéndose la aplicación, resistencia a la temperatura, resistencia química, resistencia a la abrasión, resistencia al impacto, rigidez, estabilidad dimensional y facilidad de procesamiento (Farotti & Natalini, 2018), puesto que cada componente es diferente y el diseño dependerá de los criterios del diseñador, permitiendo a la herramienta tener un mayor alcance.

Con la presente investigación se mejora el conocimiento sobre el proceso de moldeo por inyección y las propiedades mecánicas de los materiales, desarrollando una herramienta que facilite la selección eficiente de resinas plásticas para la fabricación de componentes. La aplicación práctica de esta herramienta se evalúa en una empresa maquiladora del sector metalmecánico en Baja California, contribuyendo así al desarrollo y eficiencia de la industria de plásticos en la región, persiguiendo el objetivo que la herramienta tenga aplicabilidad a nivel mundial, se evaluó su eficacia y practicidad no solo en la misma región económica de la corporación analizada, sino también con algunos proveedores ubicados en China y Portugal.

Planteamiento del problema

La entidad empresarial analizada, se inserta en el contexto global, donde destaca su posición competitiva gracias a la excelencia en la calidad de sus productos y la eficiencia en los plazos de entrega, comprometiéndose con garantías de por vida. No obstante, enfrenta retos significativos en términos de costos, derivados de la enérgica competencia en el mercado. La obtención de nuevos proyectos impone la necesidad de cumplir con exigencias relacionadas con precio, calidad y tiempos de entrega, buscando en todo momento maximizar la rentabilidad mediante la optimización de costos asociados a herramientas y componentes.

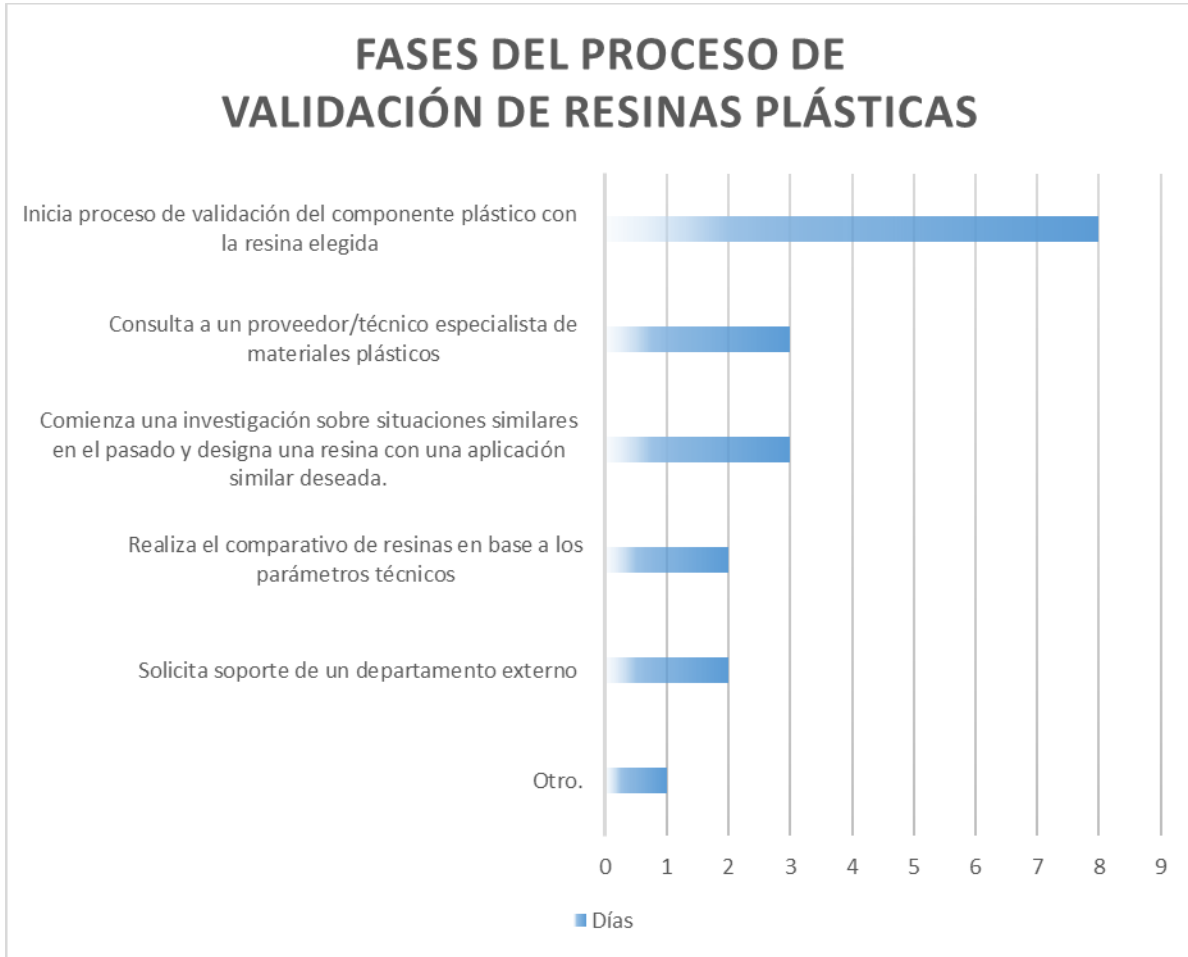
Se han contemplado diversas estrategias para alcanzar estos objetivos, como el aumento en los mínimos de compra para la reducción de costos, la utilización eficiente de la misma materia prima en diversos componentes, la mejora de acuerdos comerciales con proveedores y la creación de inventarios con amplia cobertura. En este contexto, la empresa ha adoptado la estrategia de homologar materias primas en sus componentes, buscando asegurar condiciones más favorables en términos de precios por volumen y mitigar el riesgo de escasez de material en situaciones como la que se vivió durante la contingencia sanitaria mundial de 2020 y 2021.

La compañía cuenta con equipos de trabajo que apoyan al desarrollo y fabricación de sus productos, comenzando por logística y almacén, que ayudan al control de las materias primas y producto terminado una vez llega y sale de la organización, el equipo de compras, aduanas, finanzas que soportan la operación administrativa de los materiales, etc. El área que requiere herramientas de apoyo para facilitar la toma de decisión para la selección de materiales que se van adquirir, es la encargada del diseño de componentes plásticos en la empresa, esta área está conformada por un equipo de trabajo de siete ingenieros, . A este equipo de trabajo se les aplicó una encuesta, con el objetivo de identificar las variables y fases que necesitan completar para la validación comportamiento en el producto de 2 o más resinas plásticas con la misma aplicación y componente. Como resultado de esta encuesta, se determinó que en promedio el proceso para realizar la comparación resinas plásticas para homologación de material le toma al equipo de ingeniería de producto 19 días hábiles (figura 1), el tiempo de análisis es considerablemente alto: un mes no bisiesto sin días festivos en México se compone de 4 semanas de 7 días naturales, de los cuales 2 días no son hábiles, por lo que en total tenemos 20 días hábiles en el mes.

Al equipo de ingeniería de producto, le toma un mes realizar esta validación, este último dato fue obtenido a través de la aplicación del instrumento anteriormente mencionado, con el propósito de conocer el proceso interno. El tiempo destinado por la compañía conduce a la empresa a la asignación de un alto valor de horas de su equipo de ingeniería a este proceso, sin ser eficaces en el manejo del tiempo. De acuerdo al portal virtual del empleo Glassdoor, el salario promedio diario de un ingeniero de diseño en Mexicali es de \$1,166.00 pesos mexicanos diarios (Glassdoor, 2023), por lo cual la

inversión para este proceso de parte de la empresa para el equipo de ingeniería asciende a \$23,320.00 pesos mexicanos por resina que se desea validar.

Figura 1: Tiempos promedio de por fase validación de resinas plásticas.



Fuente: Elaboración propia.

El departamento de ingeniería lleva a cabo el proceso de validación de resinas, en promedio, una vez al mes. Además de esta actividad, el equipo realiza otras tareas dentro de la organización. A continuación, se muestra el listado general de actividades realiza el equipo de Ingeniería (tabla 1: Relación de actividades con validación de resinas plásticas), de acuerdo a la información publicada por el departamento de recursos humanos (Accuride International, 2022) de la empresa:

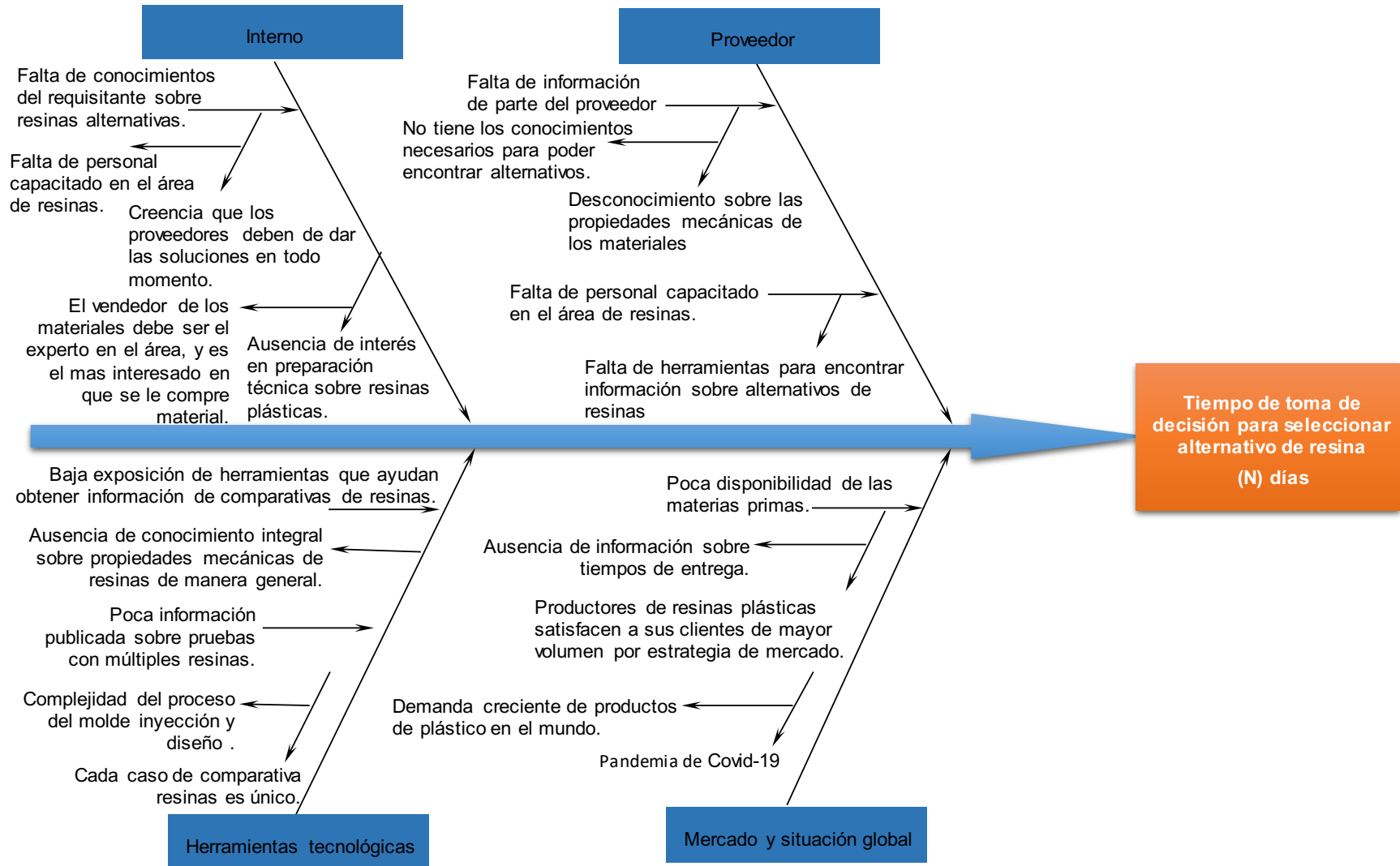
Tabla 1: Relación de actividades con validación de resinas plásticas.

#	Actividad	Porcentaje de relación con el proceso de validación de resinas
1	Validar por medios analíticos-experimentales las soluciones desarrolladas.	40%
2	Desarrollar aplicaciones a medida para clientes OEM.	35%
3	Crear DFMEA y desarrollar un TSUA detallado de sus productos.	30%
4	Ejecutar proyectos de ingeniería que incluyen actividades como modelado geométrico, creación e interpretación de dibujos, montaje de diapositivas para pruebas y creación de informes con supervisión moderada.	25%
5	Desarrollar un DVP&R de alto nivel siguiendo procedimientos establecidos e instrucciones de trabajo.	25%
6	Coordinar e implementar modificaciones de productos de diseño.	25%
7	Adquirir con éxito la intención del cliente sobre la solución requerida-necesaria.	10%
8	Participar en reuniones internas e interactúa con otros departamentos internos.	0%
9	Comunicar de manera oportuna temas técnicos específicos relacionados con clientes internos y externos.	0%

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Accuride International (2022).

Se puede observar en la tabla 1 que el cuello de botella se ubica en el tiempo que le toma al equipo técnico de producto poder realizar la validación de resinas plásticas, por ello se realizó un análisis mediante el método de análisis de causa-raíz “5 porqués” (Voehl, 2016) y con Ishikawa (figura 2), identificándose cuatro pilares base que sustentan esta problemática del tiempo de validación: Situaciones internas, situaciones de la proveeduría, escenario del mercado (disponibilidad y costos de materiales) y ausencia de herramientas tecnológicas.

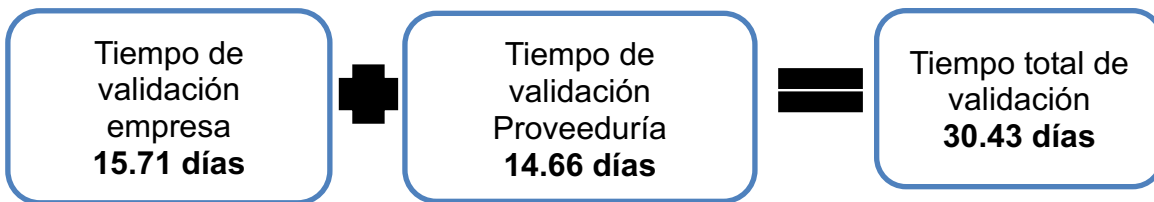
Figura 2: Análisis de causa raíz de planteamiento del problema.



Fuente: Elaboración propia

Además del proceso interno de validación llevado a cabo por la empresa, los proveedores deben realizar un proceso similar en sus propias instalaciones para ofrecer un respaldo en la mejora de los tiempos. Con este fin, se llevó a cabo una encuesta a seis proveedores asociados a la compañía, siendo cuatro de ellos con sede en China y dos en Tijuana, Baja California, México. El diseño de las preguntas se orientó hacia la protección de la identidad de los proveedores, preservando así las relaciones comerciales con ellos. Cabe destacar que estas empresas de suministro representan el 80% del consumo de plástico de la organización.

A partir de los datos obtenidos en la encuesta y en vista de las limitaciones del problema, se identificó que el tiempo total de validación para las resinas asciende a 30.43 días hábiles, equivalente a más de un mes y medio. Si bien en algunas ocasiones ambos procesos pueden desarrollarse de forma simultánea, esto no es común debido a que tanto el proveedor como el cliente están comprometidos en la búsqueda de una solución para la problemática en cuestión. En este contexto, se determina que el proceso de validación promedia una duración de 1.52 meses, considerando únicamente los días hábiles.



Un factor adicional que contribuye a la prolongación de los tiempos de respuesta es la situación actual del mercado y la cadena de suministro, afectadas por la pandemia de Covid-19. La escasez de materias primas, ocasionada por diversos factores relacionados con la emergencia sanitaria, ha exacerbado esta problemática (Kilpatrick et al, 2020). Según un informe publicado por Deloitte, la firma líder a nivel mundial que reúne a un amplio equipo de profesionales que ofrecen servicios de auditoría, consultoría, gestión de riesgos, asesoramiento financiero y fiscal para las principales empresas en más de 150 países, se pronostica una recuperación financiera y de la cadena de suministro para los años 2022 y 2023 (Deloitte, 2022).

En una economía capitalista, la inflación a nivel mundial, que afectó severamente a México, elevó los costos logísticos en un 300% entre 2020 y 2022 (Grupo T21, 2021), por ende, el costo tanto de materias primas como productos finales, tuvieron un incremento significativo de precio, afectando de esta manera a los consumidores y su economía.

Cuando se tiene un mayor costo de operación, más elevado el precio tiene un producto (Banxico, 2020), por lo que el diseño de herramientas que contribuyan a el uso de materiales con mayor oferta y costos más bajos, pudiera ser una de las claves a disminuir la inflación mundial. Ahora bien, si estas herramientas contribuyen a la elección

de materiales de una manera más consciente considerando el impacto en el medio ambiente, su contribución y alcance es mayor.

Por último, se detectó la ausencia de softwares y bases de datos que ayuden a mejorar los tiempos de respuesta de manera interna en la empresa de correderas industriales, ya que no utilizan ningún software de validación. Mientras que la red de proveedores solo el 33% de ellos cuentan con uno de validación de resinas, el 67% de la población encuestada recurren al conocimiento empírico del personal de su plantilla laboral, como una persona experta en el tema (Ver Anexo 1), dejando a las empresas en una posición de vulnerabilidad al depender de la permanencia de su capital humano, por lo que se propone la utilización de esta herramienta como una fuente condensada de literatura actualizada, con documentación validada sobre las propiedades de las resinas plásticas y moldeo.

Para el diseño de la herramienta, se ha considerado como referencia un componente guía de corredera (véase apéndice C), con aplicación en temperatura ambiente y -10° grados centígrados a 50,000 ciclos de uso en la aplicación final, el cual se fabrica con resina PA66. Se utiliza como referencia dicha parte debido a que el 55% de las correderas que manufactura esta empresa, lo incluyen en su lista de materiales de fabricación, lo que lo convierte por temas de uso, en uno de los componentes más críticos para la operación de la organización.

De acuerdo con un investigador de la India (Bagwala, 2021), en la industria metalmeccánica, el PA66 se destaca por su versatilidad y amplio uso en diversas aplicaciones, que incluyen engranajes, ruedas dentadas, poleas y otros componentes de maquinaria. Este material es altamente valorado en aplicaciones que demandan durabilidad y resistencia al desgaste. Su capacidad para soportar condiciones adversas y mantener un rendimiento óptimo lo convierte en una elección frecuente para entornos industriales exigentes.

Además de su robustez, el PA66 se distingue por ser un material liviano, lo que resulta beneficioso para la industria al contribuir a la reducción del peso de la maquinaria. Esta característica no solo optimiza el rendimiento de los equipos, sino que también promueve la eficiencia en los procesos industriales. En resumen, el PA66 no solo ofrece resistencia y durabilidad, sino que también aporta ventajas significativas en términos de peso y eficiencia, lo que lo convierte en una opción preferida en la industria metalmeccánica.

Justificación

El presente estudio encuentra su justificación en el contexto económico y productivo actual, especialmente en la región de Baja California, la cual ha experimentado un notable incremento del 11.8% en su contribución al valor total de las exportaciones, según datos del INEGI para el tercer trimestre de 2021 (Zepeda, 2022). Este crecimiento sugiere una significativa participación en el Programa de la Industria Manufacturera, Maquiladora y de Servicios de Exportación (IMMEX), indicando que una parte considerable de estas exportaciones puede estar vinculada al proceso de moldeo por inyección plástica.

Adicionalmente, la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC) informa que el consumo aparente de resinas en México alcanzó las 6 millones 933 mil toneladas en 2021 (ANIPAC, 2021). Es relevante destacar que dicho estudio se limita a resinas adquiridas dentro del país, además no existe una asociación que consolide resinas de proveeduría internacional para la manufactura de componentes plásticos, el conocer las resinas plásticas específicas que se utilizan dentro de México es de gran importancia debido a que el recurso de investigación puede centrarse en ofrecer soluciones con las de mayor prioridad para lograr un mejor desarrollo sostenible sobre el uso de los plásticos.

En este entorno, las organizaciones se encuentran ante el desafío constante de hallar alternativas de manera ágil y eficiente ante la eventual escasez de materiales. Si bien la investigación se centra en un caso de estudio específico en la región, su enfoque es extrapolable a diversas industrias que emplean componentes plásticos en sus procesos o productos. La propuesta de una herramienta especializada se presenta como un valor añadido en la cadena de suministro, contribuyendo a mejorar las negociaciones incrementando mínimos de compra y la toma de decisiones en el ámbito de compras para prevenir la ruptura de la cadena de suministro. El núcleo de la investigación se centra en la necesidad de optimizar los tiempos de respuesta en el análisis de resinas, teniendo en cuenta tanto sus propiedades mecánicas como el proceso de colada.

El objetivo final radica en probabilísticamente determinar cuál de las resinas ofrece un mayor porcentaje de éxito en la producción de las piezas, al tiempo que cumple con las especificaciones requeridas. Este análisis se fundamenta en una evaluación integral de los parámetros de moldeo, las especificaciones de los materiales y las propiedades mecánicas. Existen múltiples propiedades mecánicas de los plásticos, sin embargo, la dureza destaca del resto, al ser una respuesta directa de la composición química de la naturaleza del material y los parámetros asignados en la manufactura (Axalta, 2018), siendo una propiedad de respuesta o de alta relación con otras. Bajo el contexto anteriormente mencionado, se condujo a la creación de una fórmula para determinar la dureza que podría obtenerse a diferentes temperaturas, proporcionando una herramienta valiosa para la toma de decisiones y la optimización de los tiempos de cualquier organización que desee comparar resinas plásticas.

Los resultados de esta investigación no solo beneficiarán a la empresa estudiada al proporcionar una herramienta ágil para la introducción de nuevos productos, la búsqueda de reducción de costos mediante la homologación de resinas en componentes plásticos y el apoyo en una elección más informada en la selección de materias primas y su impacto en el medio ambiente, sino que también poseen un potencial de aplicación en otras industrias del giro metalmecánico, tanto a nivel nacional como internacional. La tabla 2 detalla la aplicabilidad de la herramienta en las actividades del equipo de ingeniería y las fases donde se planea implementarla para optimizar los tiempos.

Tabla 2: Aplicabilidad de la herramienta en las actividades del equipo de ingeniería

Usuario	Proceso	Tiempo Promedio real (Días)	Reducción de Tiempo expectativa	% reducción del tiempo
Interno (Empresa) *	Realiza el comparativo en base a parámetros técnicos de las resinas a comparar.	1.71	0.20	-88%
Interno (Empresa) *	Solicita soporte del departamento de compras o algún otro departamento de apoyo.	1.57	1.00	-36%
Interno (Empresa) *	Consulta a un proveedor/técnico especialista de materiales plásticos.	2.43	1.00	-59%
Interno (Empresa) *	Inicia proceso de validación del componente plástico con la resina elegida	7.43	6.00	-19%
Interno (Empresa) *	Comienza una investigación sobre situaciones similares en el pasado y designa una resina con aplicación similar a la deseada.	2.29	1.00	-56%
Interno (Empresa)	Otro	0.29	0.29	0%
Proveedor *	Realiza el comparativo en base a parámetros técnicos de las resinas a comparar.	2.00	0.20	-90%
Proveedor	Consulta disponibilidad de resinas en el mercado.	1.33	1.33	0%
Proveedor*	Envía muestras del componente al cliente para validación.	3.33	2.00	-40%
Proveedor *	Notifica al cliente de la ausencia de la resina y plantea sus dudas respecto a la aplicación.	2.08	1.00	-52%
Proveedor *	Consulta a un proveedor/técnico especialista de materiales plásticos.	1.67	1.00	-40%
Proveedor *	Solicita soporte del cliente para designar la resina con la cual fabricar muestras.	3.00	2.00	-33%
Proveedor	Comienza una investigación sobre situaciones similares en el pasado y designa una resina con aplicación similar a la deseada.	1.00	1.00	0%
Proveedor	Otro	0.25	0.25	0%
Total		30.38	18.27	-40%

Fuente: Elaboración propia.

(Nota * actividad contemplada para para aplicación de herramienta)

Objetivo general y objetivos específicos

Objetivo general

- Diseñar una herramienta que optimice el análisis comparativo de resinas, mejorando los tiempos de respuesta en la selección de una resina plástica.

Objetivos específicos

- Comparar las propiedades mecánicas de la resina PA66, PA66GF30 y PA66 con 30% de talco mineral.
- Generar un listado de requisitos mínimos comparables para identificar una resina alternativa.
- Evaluar la relación entre los parámetros de moldeo y las propiedades mecánicas de las resinas plásticas comparadas.
- Diseñar la herramienta de validación considerando los parámetros de entrada identificados en el estado del arte y las propiedades mecánicas finales deseadas en el componente.
- Validar la herramienta mediante análisis estadístico de los resultados obtenidos.

Hipótesis

La creación de una herramienta para optimizar el análisis comparativo de resinas, que brinde apoyo para seleccionar una resina equiparable a las propiedades mecánicas del PA66, reducirá el tiempo que toma realizarlo en un 40%. Adicional a esto, se infiere que se eliminará la ambigüedad de los criterios profesionales del personal del área de ingeniería de producto al tener un análisis basado en las propiedades mecánicas definido por rangos de impacto en la producción del componente.

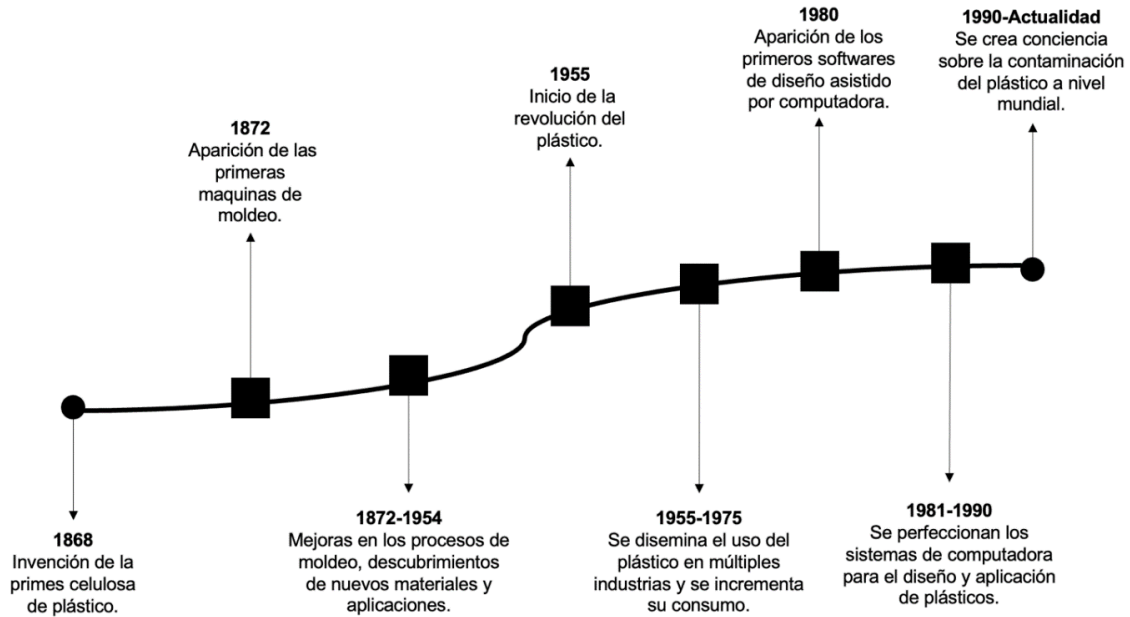
Capítulo I: Estado del Arte

1.1 Creciente urgencia y necesidad ante la complejidad del moldeo por inyección plástica

La historia de la industria del plástico se remonta hacia hace más de 100 años atrás, dando comienzo con registro histórico cuando los hermanos John e Isaiah Hyatt descubrieron y patentaron la primera máquina de moldeo por inyección en 1868 (Amato, 2011). Para el año 1872, se llevó a cabo la invención de la primera máquina de moldeo por inyección de plástico en la historia, siendo este el inicio de lo que hoy en día es uno de los procesos más empleados en la industria general mundial, en el pasado el proceso era más simple en comparación con las máquinas contemporáneas (Meikle, 1995). Desde la invención histórica de este proceso, se han generado múltiples investigaciones en torno al proceso de inyección de plástico. Si bien el objetivo principal de esta investigación no es el descubrimiento de algo nuevo relacionado con el material o el equipo, el diseño de la herramienta propuesta busca ser un compendio de la literatura actual y ofrecer posibles soluciones a los desafíos que enfrenta la industria en la actualidad, al reducir tiempos en la toma de decisiones y que estas decisiones sean más conscientes con el impacto en el medio ambiente.

Continuando el relato histórico de la industria del plástico, en los años de 1955 a 1975, se da comienzo a la revolución del plástico, ya que esta materia prima, comenzó a tomar fuerza en la industria en general al ser considerado como el material del futuro, siendo uno de los más prometedores debido a sus propiedades mecánicas, siendo capaz de resolver una variedad de problemas en diversas industrias (Smith, 2021). Fue en este período cuando se iniciaron mejoras enfocadas en perfeccionar las técnicas de moldeo. Hacia finales de la década de 1980 y principios de la de 1990, se perfeccionaron los sistemas de diseño asistido por computadora, marcando el comienzo de una nueva era para el desarrollo de nuevos componentes de cualquier tipo (Afiq et al, 2021). La figura 3 ofrece una representación gráfica del desarrollo histórico de la industria del plástico.

Figura 3: Línea del tiempo de la industria del plástico.



Fuente: Elaboración propia.

La incorporación de piezas plásticas, tanto a la vida cotidiana como en la industria, permitió el desarrollo económico de varios países, China es uno de ellos. Debido a su gran presencia en el mercado, es el país donde la manufactura de moldes resulta ser una de las más competitivas a nivel mundial (Tao Wang, 2006). De acuerdo con las últimas cifras disponibles, le corresponde el 29.4% de la producción mundial de plásticos en el 2017, el 31% de la producción mundial de maquinaria para plásticos en el 2018, y la mayor parte del procesamiento global (Plásticos Universales, 2019), por lo que contar con información de primera mano de fabricantes de este país es importante para la presente investigación.

En el presente capítulo se presentan una serie de investigaciones realizadas donde se destaca la importancia de las propiedades mecánicas de los polímeros, así como también los parámetros y herramientas empleadas para lograr optimizarlos y mejorar así su rendimiento, destacándose la ausencia de la unificación de los criterios en la creación de herramientas que vinculen esta información. Además, el contexto bajo el cual fueron hechas contiene un análisis medioambiental, lo que representa una de las aportaciones en la creación de la herramienta, al no solo ser un compendio del conocimiento generado por los investigadores, sino un compendio unificado con el cumplimiento de los objetivos globales de reducir las emisiones de CO₂. La herramienta diseñada y propuesta también es práctica y fácil de usar para cualquier organización, en próximos capítulos se profundiza a detalle.

1.2 Importancia de una etapa preliminar para el proceso de moldeo

El moldeo por inyección de plástico es un proceso de fabricación que se utiliza para producir piezas de plástico en grandes cantidades. El proceso de inyección de plástico consta de cuatro pasos clave, se muestran a detalle en la Figura 4, y de acuerdo con datos de Shinde et al (2018), se presenta el siguiente resumen de cada etapa:

1. Inyección (Injection)
2. Envasado (Packing)
3. Tiempo de curado o enfriamiento (Cooling)
4. Eyección (Ejection)

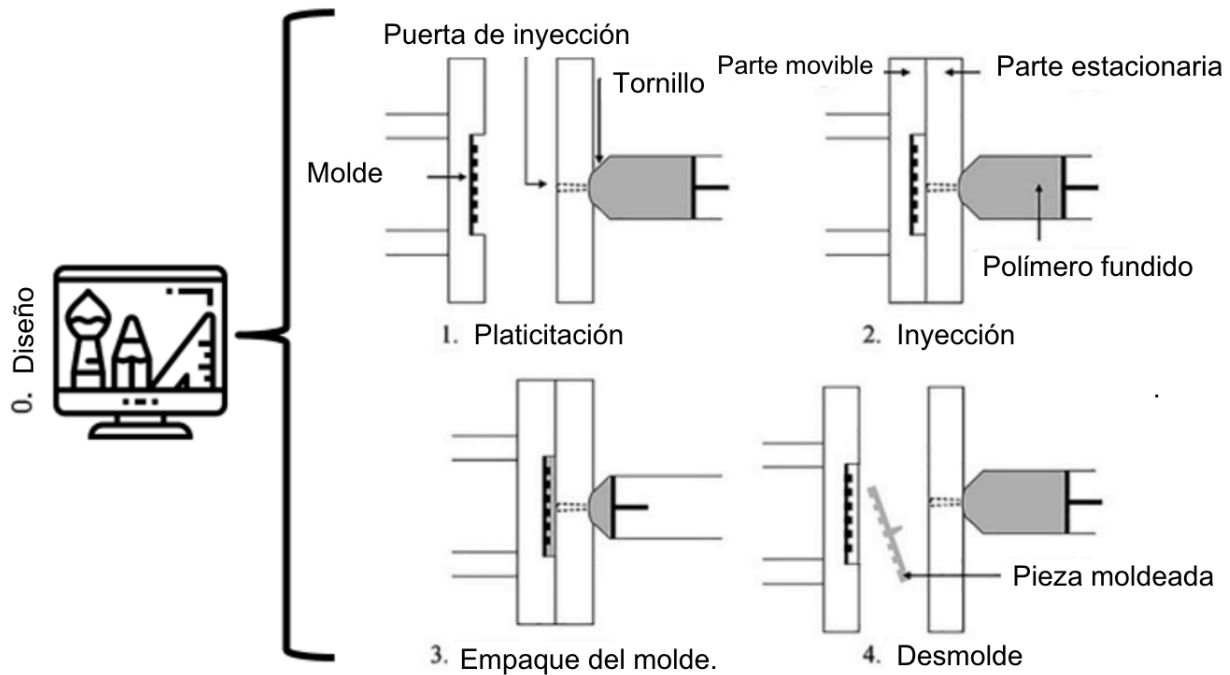
El diseño de los parámetros y la planificación de los materiales son aspectos cruciales en el proceso de moldeo por inyección plástica. En cuanto al diseño de los parámetros, se deben seleccionar cuidadosamente la temperatura, la presión y el tiempo de enfriamiento adecuados para el material plástico utilizado (Tolipov et al., 2019). Por otro lado, la planificación de los materiales implica la elección del material plástico adecuado para el producto final, así como la determinación de la cantidad necesaria para producirlo en las escalas requeridas.

Para la presente investigación, se incluye una fase adicional denominada "Diseño" (Design). Esto se debe a que uno de los objetivos del uso de la herramienta es crear conciencia sobre el impacto ambiental de cada una de las variables de los polímeros. Al iniciar desde esta fase temprana, se puede reducir el impacto ambiental negativo de las resinas poliméricas con mayor repercusión.

En cuanto a las etapas de producción y los tiempos de ciclo del moldeo de plástico, son variables y dependen de los materiales utilizados y del diseño del componente que se está manufacturando. Sin embargo, es importante destacar que la etapa de enfriamiento representa entre el 70% y el 80% del tiempo de producción de componentes plásticos (Farooque et al., 2021). Muchas investigaciones se centran específicamente en esta fase del proceso, ya que reducir los tiempos de enfriamiento puede aumentar la rentabilidad de la producción de alto volumen (Kanbur et al., 2020).

Se han empleado diversos métodos de investigación de optimización para mejorar los parámetros del proceso de moldeo por inyección y lograr productos de calidad aceptable. Sin embargo, los investigadores en este campo aún enfrentan desafíos durante la implementación en la práctica, debido a las múltiples fuentes de variación en el proceso, pueden causar defectos, por lo que el mal manejo de las variables del proceso puede resultar en el desperdicio de recursos. La implementación de técnicas de inteligencia artificial (IA) para el monitoreo del proceso, la optimización de los parámetros del proceso y el diseño del molde basado en la forma compleja del producto y los canales de enfriamiento podría mejorar significativamente el rendimiento de los recursos (Ogorodnyk & Martinsen, 2018). La creación de herramientas tecnológicas que se apoyen en la inteligencia artificial o en conectores básicos tiene el potencial de revolucionar la forma en que se manufactura el plástico y hacerlo más rentable.

Figura 4: Representación gráfica del proceso del molde de inyección plástica.



Fuente: Farotti & Natalini (2018).

En su investigación, Wang & Cai (2021), exploraron la influencia del diseño del molde y los parámetros de inyección en la deformación por alabeo de las piezas de plástico de paredes delgadas, la investigación se vale de la utilización del software Moldflow y realizando un diseño de experimentos con policarbonato, propusieron mejoras en el molde y los parámetros de moldeo por inyección, logrando reducir la deformación de la cubierta de la pared en más del 69%. Este estudio destaca la capacidad del software para establecer parámetros de moldeo que minimicen las deformaciones en las piezas producidas. Sin duda, el desarrollo y la empleabilidad de herramientas tecnológicas para la optimización de parámetros y predicción de propiedades mecánicas es de gran interés para la comunidad científica y la comunidad industrial en general. Desde el uso de softwares computacionales hasta la inteligencia artificial, estas herramientas ofrecen la posibilidad de optimizar el proceso de fabricación y mejorar la calidad de los productos finales.

La herramienta diseñada responde a la necesidad de facilitar la toma de decisiones en la selección de materiales tanto en aplicación, diseño, comportamiento mecánico, proceso de manufactura e impacto en la huella de carbono de múltiples resinas, proporcionando una solución por medio de la integración de métodos disponibles y tecnología reciente. Además, busca contribuir a la eficiencia y calidad en la producción de componentes plásticos.

1.3 Parámetros representativos del proceso de moldeo (temperatura, presión, enfriamiento)

En 2018, un grupo de investigadores, dedicaron recursos a la experimentación, con el propósito de documentar los efectos de los parámetros de entrada sobre las propiedades mecánicas del polipropileno (PP). Mediante el uso de moldes que fueron diseñados y fabricados para producir diferentes tipos de muestras de prueba con diferentes grados de complejidad y aplicaciones. El objetivo del estudio era conocer la resistencia a la tracción, deformación, dureza, etc. El equipo de investigación con el uso el método de diseño de experimentos (DOE) y con los datos recabados de la presión y la temperatura de la cavidad, lograron optimizar los parámetros de moldeo por inyección (Farotti & Natalini, 2018). El estudio se realizó considerando la temperatura de fusión, la presión de mantenimiento, la temperatura del molde y el tiempo de enfriamiento, se establecido como hallazgo que la temperatura del molde y la presión de mantenimiento tienen influencia sobre la resistencia mecánica. Conocer como diversos autores abordan el tema de la optimización de parámetros de moldeo, es de gran relevancia para esta investigación ya que permite identificar los métodos más aceptados en dicho campo, en la tabla 3 se relaciona a mayor detalle esta importancia.

En la University of Economics de Ho Chi Minh City en Vietnam en 2018, se llevó a cabo un estudio realizado por un equipo de investigación que se dedica a examinar los parámetros clave del proceso de moldeo por inyección. Estos parámetros incluyeron la presión de inyección, la temperatura de fusión, el tiempo de empaque y la presión de empaque (Sigh et al, 2018). Los autores de esta investigación, mediante el empleo de una serie de combinaciones diferentes utilizando un enfoque basado en el ciclo de consideraciones de tiempo y respuesta de carga, lograron determinar el valor óptimo de estos parámetros. Al examinar la función de deseabilidad, se descubrió que el valor óptimo de los parámetros del proceso se puede obtener mediante el uso del valor de deseabilidad compuesto. Este enfoque permitió identificar una combinación optimizada de parámetros que condujo a mejoras significativas en el proceso de moldeo por inyección, los descubrimientos y el uso de las variables por este autor cimentaron el camino de la investigación al encontrar los parámetros más significativos dentro del proceso y por ende con mayor influencia sobre las propiedades mecánicas.

Los estudios analizados con anterioridad no solamente han proporcionado información vital para la comprensión oportuna sobre el cómo modificar y ajustar los parámetros del proceso del moldeo de inyección, con el objetivo de mejorar la calidad del productor y lograr una mayor eficiencia de la producción de plásticos, sino que también proporciona las bases para el desarrollo de la presente herramienta. Además, este enfoque puede ayudar a reducir los costos, a la par, garantizar un comportamiento óptimo y una calidad consistente del producto final.

En el año 2019, investigadores de la Universidad de Arabia Saudita llevaron a cabo un estudio con el objetivo de optimizar los parámetros de entrada del proceso de moldeo por inyección para minimizar los defectos. Su investigación se basó en el empleo del método ANOVA. Esta investigación se centra específicamente en la deformación y la

contracción de volumen, dos aspectos críticos en la calidad de los productos moldeados por inyección de plástico. Las variables del proceso que fueron estudiadas fueron la temperatura del molde, la temperatura de fusión, la presión de empaque, el tiempo de empaque, el tiempo de enfriamiento, la velocidad y la presión de inyección (Suleiman et al, 2019). Esta investigación señala una relación inversa entre la deformación y la contracción del volumen, lo que significa que las mejoras en una de estas variables se lograron al sacrificarse la otra. Este hallazgo resalta la complejidad del proceso de moldeo por inyección y destaca la importancia de encontrar un equilibrio entre estos dos aspectos clave para garantizar la calidad del producto final y como los parámetros deben ser cuidados para el control de las propiedades mecánicas, adicional se recalca que en la búsqueda de una característica puede ser sacrificada por otra, entender esto resulta clave para el desarrollo de la herramienta propuesta.

Para el diseño de la herramienta propuesta, se consideran de igual manera los resultados de la investigación de Jasen (1998), debido a su estudio sobre el efecto de las condiciones de procesamiento en la contracción de los componentes poliméricos. En ella, variaron sistemáticamente la temperatura de moldeo, el punto de fusión, la presión de envasado y la velocidad de inyección de siete plásticos de uso común: poliestireno (PS), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), poliestireno de alto impacto (HIPS), policarbonato (PC), tereftalato de polibutileno (PBT), 30% PBT reforzado con fibra de vidrio (PBT-GF30) y polietileno de alta densidad (HDPE) (Jansen, 2018). Descubrieron que la presión del empaque era la variable de entrada más importante para todos los plásticos en el estudio de caso, el siguiente fue la temperatura de fusión, mientras que no se observó una tendencia general para la velocidad de inyección y la temperatura del molde, estos mismos estudios se complementan con el analizado anteriormente de las investigadoras Farotti y Natalini (2018).

En un estudio realizado en Turquía se continuaron investigaciones con la misma dinámica que Jansen (1998), respecto a evaluar la importancia de los parámetros del proceso de moldeo de inyección, en esta investigación se ha determinado que variables como la presión de retención, el tiempo de retención, la temperatura del molde, entre otros, influyen significativamente en el proceso de moldeo de piezas delgadas (Ocelik & Erzurumlu, 2005). El análisis de varianza (ANOVA) se revela como una herramienta esencial para identificar los efectos cruciales de estas variables en el proceso. La integración de diversos métodos ha demostrado ser efectiva en la optimización de los procesos de moldeo por inyección, permitiendo identificar las condiciones óptimas de proceso que minimizan defectos y maximizan la calidad del producto final.

En un estudio similar de evaluación de propiedades mecánicas de polímeros con cambios en el proceso, se propusieron los parámetros de proceso óptimos para piezas plásticas de paredes delgadas, considerando la interacción entre los parámetros del proceso de moldeo por inyección. Los resultados muestran que la presión de retención es la variable de proceso de entrada más importante que afecta la contracción y la deformación (Gao & Xicheng, 2007). Este análisis se llevó a cabo mediante una metodología exhaustiva que incluyó el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia estadística de los efectos de los diferentes parámetros del proceso

Un equipo de ingenieros de la Universidad de Malasia llevó a cabo un estudio en 2010 (Rahaman et al, 2010) unificando los criterios de investigaciones parecidas a las de Gao y Xicheng (2007) de la evaluación del impacto de ciertos parámetros del proceso de moldeo de inyección respecto al comportamiento que tendrá la pieza plástica, con el fin de comparar las propiedades de los materiales utilizados en moldes. El objetivo era reducir el ciclo de moldeo de un componente plástico y mitigar el riesgo de deformación. Los resultados revelaron que la temperatura de desmoldeo, el material del molde y la presión de inyección son los principales factores que influyen en el tiempo de ciclo, con valores de p inferiores a 0.05. Específicamente, se encontró que la temperatura de desmoldeo contribuye en un 49.87%, seguida del material del molde con un 29.22%, y la presión de inyección con un 11.38%. Respecto al defecto de deformación, se identificó que la temperatura de fusión, la temperatura de eyección, la presión de inyección y el tiempo de empaquetamiento son los factores más relevantes, también con valores de p inferiores a 0.05. El coeficiente de temperatura de fusión mostró el porcentaje más alto de influencia, con un 24.69%, seguido por la temperatura de eyección con un 20.71%, la presión de inyección con un 18.01% y el tiempo de empaque con un 12.72%. Estos hallazgos fueron respaldados mediante el uso de un Diseño de Experimentos (DOE) y análisis de varianza (ANOVA).

Para la creación de la herramienta, era de importancia conocer cuales parámetros tenían más influencia respecto a otros en las propiedades mecánicas para poder realizar un diseño de experimentos práctico, por ello también se considera la investigación realizada por el grupo de investigadores (Kim et al, 2018), en la cual se destaca la importancia de ajustar correctamente la presión del molde para lograr una distribución uniforme de la temperatura en la pieza moldeada. Se enfoca en predecir el desarrollo de la tensión interna durante el proceso de moldeo y después de la extrusión, lo que requiere medir la distribución de la tensión residual para verificar la precisión de las predicciones. Aunque el estudio se centra en encontrar un método adecuado para medir la tensión residual en piezas plásticas, es esencial comprender los parámetros considerados en la fabricación de las piezas. La investigación utiliza un enfoque experimental basado en el método Taguchi para optimizar los parámetros del proceso de moldeo por inyección. Se emplea un diseño de experimentos Taguchi L9 para investigar la influencia de la presión del molde en la distribución de la temperatura y la tensión interna en las piezas moldeadas. Posteriormente, se realiza un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia de los efectos de los diferentes niveles de presión del molde en las variables de interés. Este enfoque estadístico permite identificar la relación entre la presión del molde y la calidad de las piezas moldeadas, proporcionando una guía para optimizar el proceso de fabricación.

La investigación anterior subraya la importancia de la uniformidad del flujo de la resina plástica dentro de la cavidad, para ello es necesario mantenerla en un estado semilíquido, el investigador Karagöz (2019), llevó a cabo un estudio comparativo sobre el efecto de la temperatura superficial del molde durante la inyección de polietileno de alta densidad. Este estudio utilizó los métodos de Taguchi y ANOVA para analizar los resultados obtenidos. Se observó que la temperatura superficial del molde tuvo un impacto significativo en diversas propiedades del material. Específicamente, se encontró

que el aumento de la temperatura superficial del molde incrementó la velocidad de cristalización, así como la resistencia a la tracción y a la flexión de los materiales. Además, se observó una disminución en el grosor de las láminas de cristal y en la resistencia al impacto. Así mismo, se demostró que la temperatura superficial del molde afectó la temperatura de fusión del cristal. Se determinó que un aumento en la temperatura superficial del molde condujo a una mayor formación de cavidades en la estructura del material y a una disminución en la fibrilación debido a la expansión y al tiempo de enfriamiento.

El estudio de la investigadora Kim se enfoca en la distribución uniforme de la temperatura y la tensión interna durante el proceso de moldeo y después de la extrusión. Por otro lado, el estudio de Idris Karagöz se enfoca en el efecto de la temperatura superficial del molde en la inyección de polietileno de alta densidad. Para la creación de la herramienta, se fueron considerados los resultados de estos estudios sobre la presión del molde y la temperatura del molde en función del tipo de material utilizado. Mantener la temperatura del molde y su uniformidad requiere de canales de enfriamiento en el molde, es por ello que se consideran los resultados del equipo de investigadores de Hopmann et al. (2021), el cual exploró el diseño de moldes mediante el concepto de termicidad inversa. Sus descubrimientos destacan la relevancia de la colocación estratégica de los canales de enfriamiento, ofreciendo información vital para la optimización de los diseños de moldes. Estos hallazgos son esenciales para la elaboración de la herramienta, ya que resaltan los criterios críticos que deben tenerse en cuenta al seleccionar los materiales para componentes plásticos, considerando la geometría del molde.

Los anteriores estudios evaluaban los parámetros del moldeo, la uniformidad de mantener estos últimos y su influencia sobre las propiedades mecánicas, pero es de relevancia mencionar que de acuerdo con los investigadores rusos Ceskova y Lenfeld (2018), que realizaron un estudio comparativo sobre los cambios en las propiedades mecánicas al inyectar polipropileno en una cavidad, utilizando un inserto de polímero versus uno convencional de acero para moldes prototipo. Sus resultados destacaron que a medida que el inserto se volvía más delgado, las muestras inyectadas mostraban una mayor precisión. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en las propiedades mecánicas entre ambos métodos. Por lo tanto, sugieren que la selección de materiales para un molde prototipo debe basarse en consideraciones como la resistencia al desgaste y la facilidad de fabricación, de esta manera podemos mencionar que siempre y cuando los parámetros asignados se encuentren en el punto deseado, es indistinto el material del molde, sin embargo, esto no quiere decir que no influya en el impacto del comportamiento de la pieza, pero no se encontraron diferencias significativas.

El estudio de los ingenieros de la Universidad de Malasia Rahaman et al (2010) se centra en identificar los factores más relevantes que afectan el tiempo de ciclo y la deformación, mientras que la investigación de los científicos Ceskova y Lenfeld (2018) se enfoca en la selección de materiales para moldes. Ambos estudios tienen como

objetivo mejorar la calidad y eficiencia del proceso de producción mediante el control de parámetros y la selección adecuada de materiales.

En resumen, estas investigaciones no solo avanzan en la comprensión de los procesos de fabricación de plásticos, sino que también aportan datos cruciales para considerarse en la influencia de las propiedades mecánicas de los polímeros. Al identificar cómo los diferentes materiales responden a condiciones específicas de moldeo, estas investigaciones ofrecen criterios valiosos que pueden integrarse en herramientas prácticas para guiar a ingenieros y diseñadores en la selección adecuada de materiales en función de las propiedades mecánicas y de fabricación deseados.

En la tabla 3, podemos observar que los autores tienen una clara disposición por el control de la etapa del empaque y del curado de las piezas con 36%, seguido por el empaque con un 32% y diseño con 20%, dejando de lado la etapa de eyección, no es considerada esta última como una etapa de relevancia sobre las propiedades mecánicas de los materiales. Respecto al parámetro que se estudia en mayor grado con un 24% es la temperatura de fusión seguido por temperatura de molde y tiempo de enfriamiento, empaque y temperatura de molde con un 19% en ambos casos, esto tiene coherencia debido a que estos parámetros están estrechamente ligados por su relación con la temperatura y el tiempo que para alcanzarlas.

Tabla 3: Fases y parámetros estudiados.

Autor	Año	Fases del proceso de moldeo						Parámetros de las fases del proceso de moldeo									
		20%	12%	32%	36%	0%	100%	19%	24%	11%	19%	19%	0%	8%	0%	0%	100%
		Diseño	Inyección	Empaque	Curado	Eyección	Total	Temperatura del molde	Temperatura de fusión	Presión de empaque	Tiempo de empaque	Tiempo de enfriamiento	Tiempo de inyección	Velocidad y presión de inyección	Peso de inyección	Ciclo de tiempo	Total
Jasen et al	1997	1	0	1	1	0	3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	5
Gao & Xicheng	2005	1	0	1	1	0	3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	4
Ocelik & Erzurumlu	2007	0	0	1	1	0	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Rahman	2010	1	0	0	1	0	2	1	1	1	1	1	0	1	0	0	6
E. Farottia & M. Natalini	2018	0	1	1	1	0	3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	4
Sigh, Pradhan, & Verma	2018	1	1	1	1	0	4	0	1	0	1	1	0	1	0	0	4
Kim et al	2018	0	0	1	1	0	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	3
Suleiman et al	2019	1	1	1	1	0	4	1	1	1	1	1	0	1	0	0	6
Karagöz	2019	0	0	1	1	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Total		5	3	8	9	0	25	7	9	4	7	7	0	3	0	0	37

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente en la tabla 4, se muestra que los autores prefieren métodos matemáticos como lo son el ANOVA con un 58%, seguido de Taguchi con 33% y DOE con 17%. Utilizando estos métodos los autores pretenden definir la relación de los parámetros estudiados y su variable de respuesta que es la propiedad mecánica, donde los autores coinciden en un 31% que la dureza es el parámetro más estudiado por ende el que se busca en mayor medida, seguido de la cristalización con un 24%, mostrando congruencia debido a que en la manera en la que el material se cristalice, se definirá su dureza.

Tabla 4: Métodos y propiedades mecánicas estudiadas.

Autor	Año	Método Aplicado							Propiedades mecánicas estudiadas									
		58%	33%	8%	17%	8%	8%	133%	31%	17%	7%	7%	3%	24%	0%	7%	3%	100%
		ANOVA	Taguchi	Minitab	DOE	Proceso Sistemático	Inteligencia Artificial	Total	Dureza	Viscosidad	Mod. de elasticidad	Resistencia tracción	Elongación	Cristalización	Tensión residual	Densidad	Ductilidad	Total
Jasen et al	1997	1	1	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Gao & Xicheng	2007	1	0	1	0	0	0	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Ocelik & Erzurumlu	2005	0	1	0	1	0	0	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Rahman	2010	1	0	0	1	0	0	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Farottia & Natalini	2018	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Sighn et al	2018	0	1	0	0	1	1	3	1	0	1	1	0	1	0	0	0	4
Kim et al	2018	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	5
Suleiman et al	2019	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2
Karagöz	2019	1	1	0	0	0	0	2	1	0	1	0	0	1	0	1	0	4
Total		7	4	1	2	1	1	16	9	5	2	2	1	7	0	2	1	29

Fuente: Elaboración propia.

1.4 Métodos para parametrizar y optimizar el proceso de moldeo: Modelos matemáticos.

Las técnicas para ajustar y optimizar el proceso de moldeo por inyección de plástico tienen una gran importancia, puesto que permiten calibrar los parámetros ideales como la presión y la temperatura de inyección (Papadakis et al, 2020). Obtener información precisa de un análisis estructural de la pieza y poder predecir el flujo del material dentro del molde es considerado crítico, debido a que esto también tiene repercusión en la calidad final del producto manufacturado. Si bien, estos factores son sumamente importantes a considerar para la herramienta, no es posible predecir el flujo de la resina plástica dentro del molde con la herramienta creada, pero en combinación con un

software que permita simular las áreas de temperatura en diversas áreas de la pieza, podrá predecir la dureza del material bajo esas consideraciones.

En la India, con el uso del método Taguchi, en una fusión con el enfoque de diseño de experimentos (DOE), mediante la empleabilidad de un estudio del tipo L27 ortogonal, este tipo de estudio es parte del método Taguchi con la caracterización de 13 factores y 27 ensayos lineales para la realización de experimentos en búsqueda de la mejora de parámetros de moldeo por inyección plástica, se consideró cuatro variables importantes a optimizar que tienen repercusión tanto en el proceso como en el producto final, los cuales se enlistan a continuación: presión de inyección, temperatura de fusión, tiempo de empaque y presión de mantenimiento (Ghani et al, 2003). La consideración de estos métodos para lograr la automatización y mejora en el proceso del moldeo por inyección plástica destaca como un gran interés por parte de la comunidad científica, relacionada al tema de materiales y la ingeniería de los moldes, los resultados de este tipo de investigaciones ofrecen criterios esenciales para lograr productos plásticos de alta calidad y sobre todo ayudar a los profesionales de estas áreas a mejorar el proceso, es por ello que la creación de la herramienta se basa en un diseño de experimentos con validación probabilística, tomando de referencia los métodos empleados por otros autores, identificados en la literatura, identificando el método adecuado para esta investigación.

Una investigación realizada en 2017, por un grupo de estudiosos introdujeron un modelo de predicción de moldeo por inyección de plástico y la optimización de los parámetros del proceso basados en el método Taguchi, ANOVA y el uso de la inteligencia artificial, dicho estudio mostró resultados prometedores y precisos para el modelado de piezas plásticas, demostrando la eficacia del método planteado por el equipo de Ghani et al (2003). Con una tasa de precisión del 99,2 %, los autores nos muestran que el sistema basado en la optimización de los parámetros de moldeo se puede utilizar de forma eficaz para predecir las propiedades mecánicas del proceso de moldeo por inyección (Kramar & Cica, 2017). Esta investigación fue clave para el desarrollo de la herramienta presentada, ya que demuestra como el uso de tecnologías novedosas junto con el modelado matemático permiten mejorar la eficiencia del proceso del moldeo de plástico y destacan la importancia del seguir empleando estas en la industria como en el desarrollo de investigaciones.

Durante el año 2018, un equipo de investigadores de Malasia llevó a cabo un estudio utilizando de igual manera el método Taguchi y el análisis racional de grises mediante la tecnología del microscopio electrónico de barrido o por sus siglas en inglés SEM (Scanning Electron Microscopy), llevando de esta manera su investigación al siguiente nivel, realizando una evaluación física de las piezas y no solo de comportamiento. Su objetivo fue optimizar las variables del proceso de entrada y analizar las propiedades mecánicas de las piezas de plástico. Las cuatro variables de proceso consideradas fueron la temperatura del molde, la temperatura de fusión, el tiempo de inyección y el tiempo de enfriamiento (Amran et al, 2018). Según el análisis de varianza (ANOVA), se determinó que el tiempo de enfriamiento es la variable más influyente en las propiedades mecánicas, seguido por la temperatura del molde y la temperatura de fusión. Los

descubrimientos realizados por la investigación de estos autores son de vital importancia, puesto que mediante el empleo de métodos matemáticos han identificado variables críticas para el proceso del moldeo de inyección, brindando información relevante para el diseño de experimentos empleado para la creación de la herramienta propuesta.

Como se mencionó en el párrafo anterior, los canales de enfriamiento no solo mejoran la calidad del producto plástico final, sino que también influyen en la productividad general del proceso, en el estudio realizado por investigadores coreanos en 2017, destacaron como el diseño óptimo de estos canales puede reducir significativamente el tiempo de ciclo y aumentar la producción, esta investigación propuso un nuevo diseño de canales de enfriamiento con el objetivo de mejorar tanto la productividad como la calidad de las piezas fabricadas mediante el proceso de moldeo por inyección de plástico, Hong-Seok & Xuan-Phuong (2017) identificaron la deformación de los canales de enfriamiento como un problema común de calidad, y observaron que el tiempo de enfriamiento tenía el mayor impacto en el tiempo del ciclo y, por ende, en la productividad general del proceso, mediante su investigación se concluyó que los canales de enfriamiento con forma cuadrada y ranuras fresadas lograron minimizar este defecto, es decir, la deformación, y mejoraron el tiempo de enfriamiento en un 65% en comparación con los canales de enfriamiento con perforación recta. Este estudio utilizó una metodología que combinó el método de Taguchi y el análisis de varianza (ANOVA) como parte de su enfoque de diseño para la fabricación (Design for Manufacturing, DFM).

La implementación de los hallazgos analizados anteriormente en la industria, pudiera ser de gran beneficio para las organizaciones que lo apliquen, ya que como lo propusieron Hong-Seok & Xuan-Phuong (2017), un nuevo diseño de canales de enfriamiento con el objetivo de mejorar la productividad y la calidad de las piezas fabricadas mediante el proceso de moldeo por inyección de plástico. Identificaron que la deformación de los canales de enfriamiento como un problema común de calidad y observaron que el tiempo de enfriamiento tenía el mayor impacto en el tiempo del ciclo y, por ende, en la productividad general del proceso. Su hallazgo más importante es que los canales de enfriamiento con forma cuadrada y ranuras fresadas lograron minimizar este defecto, es decir, la deformación, y mejoraron el tiempo de enfriamiento en un 65% en comparación con los canales de enfriamiento con perforación recta. Es de importancia destacar el uso y apoyo de métodos matemáticos para sustentar el estudio, la combinación del método de Taguchi y el análisis de varianza (ANOVA) como parte de su enfoque de diseño para la fabricación (DFM, por sus siglas en inglés), destacando la importancia del diseño del molde para la correcta aplicación de los parámetros, lo cual otorgó un dato de relevancia a controlar dentro de la experimentación para la creación de la herramienta.

Las investigaciones identificadas en la literatura han señalado importantes hallazgos en su campo de investigación, los cuales al llevarse a su aplicación traerá grandes resultados positivos en la producción de piezas con mejor calidad y aumentar la vida útil de los herramientas, si bien en este punto la herramienta no es capaz de proporcionar una recomendación sobre los canales de enfriamiento, estos hallazgos crearon la

inferencia de la importancia de la temperatura y el control de esta en el proceso de manufactura de piezas plásticas y como esto puede afectarlo.

La inferencia obtenida de la importancia de la temperatura y el control de esta al ejecutar la revisión de la literatura actual sobre la influencia de la temperatura, se reafirma en una investigación similar llevada a cabo por un grupo de investigadores en 2020, quienes enfocaron su investigación en la contracción térmica y posterior a la mezcla de muestras de polipropileno utilizando un diseño de experimentos (DOE) de 23 factores y ANOVA, con el objetivo de investigar el efecto de los parámetros del proceso, las muestras fueron evaluadas en diferentes temperaturas, los factores que determinó el autor fueron: el tiempo de enfriamiento, la temperatura del molde y de fusión, concluyendo que la temperatura del molde es el factor más importante (Kusic & Hancic, 2020). Este último factor destaca en el estudio al ser un factor que varía de acuerdo a los parámetros asignados, y cuando no se encuentra bajo un control estricto puede ocasionar una cristalización temprana de la resina en el molde generando contracción térmica dentro de la pieza siendo que la colada no sea uniforme, en el apartado “2.9 La dureza como propiedad mecánica y su representatividad”, se detalla con mayor profundidad la relevancia de la de la temperatura y su influencia en la cristalización de los polímeros.

Como se ha analizado, el control del enfriamiento del molde y de la pieza ha sido de los objetivos claves para las investigaciones de optimización de proceso del moldeo, durante el año 2021, se realizó una investigación estratégica con el propósito de mejorar los parámetros y reducir la deformación en piezas moldeadas que utilizan canales de enfriamiento (Mohd et al., 2021). Mediante la aplicación del método de superficie de respuesta, siendo esta una técnica apoyada por un diseño de experimentos (DOE), el cual consiste en explorar la relación entre los factores (parámetros de entrada) y la variable de salida (respuesta), la optimización de enjambre de luciérnagas (una técnica de inteligencia artificial) y enfoques basados en algoritmos genéticos, se obtuvieron resultados valiosos. Se identificó que la temperatura del refrigerante es el factor más influyente en la deformación. Este estudio resalta cómo la optimización de los parámetros es influyente en el cambio de un material puesto que se tienen costos asignados a los tiempos de fabricación, y que factores externos como el líquido refrigerante puede afectar la distribución del enfriamiento en la pieza plástica, la herramienta propuesta modela solo una variable pero estos estudios demuestran que incluso factores externos como el mantenimiento del molde y los canales de enfriamiento puedan ocasionar una varianza en el comportamiento de los materiales.

En síntesis, estas investigaciones muestran un panorama claro para el desarrollo de la herramienta propuesta, mediante el análisis de lo identificado en la literatura con relación a la elaboración y ejecución de experimentos, se determinó las características a considerar para el diseño, creación y validación de la herramienta presentada en esta investigación. Dicha herramienta permitirá a los profesionales de las áreas a una decisión consciente sobre la selección de materiales y optimizar el proceso del moldeo del plástico.

En la tabla 5, se puede observar que el método más utilizado por los autores estudiados con un 50% es el método ANOVA seguido con el 30% el método Taguchi, por lo que en base a estos datos se optó por seguir el método con mayor relevancia en este tipo de estudios para la validación de la herramienta propuesta.

Tabla 5: Tendencias de Método de Optimización del Moldeo por Inyección.

Autor	Año	Método empleado			Total
		50%	30%	20%	
		ANOVA	Taguchi	DOE	
Ghani et al.	2003	0	1	1	2
Kramar & Cica	2017	1	1	0	2
Amran et al.	2018	1	1	0	2
Kusic & Hancic	2020	1	0	1	2
Hong-Seok & Xuan-Phuong	2017	1	0	0	1
Mohd et al.	2021	1	0	0	1
Total		5	3	2	10

Fuente: Elaboración propia.

1.5 Métodos para parametrizar y optimizar el proceso de moldeo: Modelos 3D e Inteligencia Artificial (IA).

El avance constante en el moldeo por inyección plástica ha sido guiado por un camino de innovación que busca transformar radicalmente el panorama a través de la implementación progresiva de la inteligencia artificial (IA). Este impulso tecnológico, gestado durante varios años, se nutre de valiosas contribuciones de estudios e investigaciones que exploran las posibilidades de la IA en todas las fases del proceso de moldeo.

Un destacado referente en este ámbito es el Dr. Altan, cuyas investigaciones ofrecen una perspectiva esclarecedora sobre el potencial de las redes neuronales artificiales, Altan sostiene que estas redes constituyen modelos robustos capaces de anticipar con alta precisión la interrelación entre las variables de entrada y las características fundamentales de los componentes moldeados. Según Altan (2009), la capacidad predictiva de estas redes neuronales abarca desde la contracción hasta el peso y la resistencia a la tracción de las piezas moldeadas. Esta integración de conocimientos empíricos respaldados por inteligencia artificial se revela como un enfoque efectivo y prometedor para prever criterios de calidad esenciales en el proceso de moldeo por

inyección. Entender como el uso de la inteligencia artificial o los datos que la alimentan contribuyen a estas predicciones es de gran valor para la herramienta propuesta, ya que con lleva a la documentación de experimentos validados matemáticamente.

Las contribuciones al campo de la inteligencia artificial se extienden globalmente, en un estudio aplicado en Turquía, donde se utilizó el software MoldFlow Plastic Insight para optimizar la ubicación de la puerta de entrada de inyección del plástico, para de esta manera poder predecir el flujo y el llenado para minimizar la deformación en piezas moldeadas delgadas (Ocelik & Erzurumlu, 2005). El análisis mostrado por los autores en esta investigación, y la aplicación de las herramientas computacionales avanzadas, respaldan y demuestran la búsqueda constante de la excelencia en la optimización del proceso de moldeo plástica en la industria y en la comunidad científica en general, la herramienta creada en combinación con este tipo de softwares podría ofrecer tendencias en cambios en las propiedades mecánicas dependiendo de la zona con su flujo liquido predictivo.

Posteriormente en una investigación realizada en China, destacó entre los estudios seleccionados para la contribución en el desarrollo de la herramienta propuesta por esta investigación, puesto que estudia la fusión las redes neuronales artificiales con el método de algoritmo genético (GA) y la inteligencia de red neuronal (ANN). La combinación de ANN/GA, ahora es un aspecto común dentro de la inteligencia artificial, pero en el pasado era un método innovador y eficaz para optimizar el proceso de productos industriales, mejorando significativamente la calidad del moldeo por inyección (Shen et al, 2007). Generalmente cuando los estudios son tempranos a sus épocas de auge de las tecnologías en vías de desarrollo, sustenta el empleo de sus variables, permitiendo un entendimiento más amplio sobre el uso de estas mismas en otros experimentos similares, esta investigación permitió observar como el uso de conectores lógicos de causa y efecto impactan en el resultado, de igual manera es modelada la herramienta creada.

Por otro lado, en la comunidad científica española se propuso un método innovador para el diseño automatizado de expulsores en moldes de inyección de plástico (Mercado et al, 2017), siendo de las pocas investigaciones relacionadas a esta fase del proceso, ya que generalmente es una variable que a lo largo de la historia de los plásticos ha sido perfeccionada, pero no por ello significa que no pueda seguir innovándose el conocimiento en dicha fase. El estudio analiza la geometría de la pieza y se apoya en evaluaciones realizadas con anterioridad mediante modelado 3D a través de CAD. Este método asegura un diseño que garantiza la ubicación y el diámetro adecuados de los expulsores, al mismo tiempo que promete una distribución equitativa de las fuerzas de eyección, permitiendo una eyección más eficaz sin dañar la pieza o presentar deformaciones en el desmoldeo.

Aunado a esto investigadores de origen chino Fu y Ma (2018), propusieron un enfoque integrado de análisis de elemento finito (FEA) utilizando el software computadorizado Moldflow™ y Ansys™ para predecir el comportamiento de enfriamiento por aire de las primeras piezas de plástico extruidas. Este método no solo facilita el diseño de moldes

de alta calidad, sino que también reduce significativamente los tiempos de ciclo de los moldes, lo cual, si bien no es el objetivo de la herramienta en esta fase del desarrollo, permite dar un consejo sobre la manufactura de moldes y amplía el conocimiento sobre el flujo de las resinas dentro de un molde.

Continuando cronológicamente con esta revisión de literatura para el año 2019, se dio a conocer una investigación de la Universidad Bradley, la cual presentó un gran avance en el conocimiento científico en la predicción de la contracción en piezas de polietileno de alta densidad moldeadas por inyección, estudio que mediante la integración de una red neuronal (inteligencia artificial) y el empleo del método Taguchi, se evaluaron los parámetros siguientes: Velocidad de inyección, el tiempo de empaque y el tiempo de enfriamiento para conocer sus efectos en las piezas (Abdul et al., 2019). Los resultados revelaron que estos factores seleccionados tienen un impacto significativo en la contracción, es de destacar como la combinación de múltiples parámetros que no van ligados directamente con la temperatura pueden tener un impacto significativo en las propiedades finales del producto final, esta investigación no solo se enfocaba en optimizar el proceso del moldeo por inyección plástica con el uso de inteligencia artificial, si no que busca predecir el comportamiento de los materiales, punto clave y central para la creación de la herramienta.

Durante el 2019 se publicaron los resultados de una investigación similar en la región China de Hong Kong, se presentó un enfoque híbrido similar que combinaba los métodos Taguchi, ANOVA y ANN-MOGA, con el respaldo de los softwares MoldFlow y Dakota. Este estudio diseñó una serie de experimentos para optimizar parámetros en la producción de un componente plástico (Feng et al, 2019). Dicha investigación definió las mismas variables que el estudio de Abdul et al (2019) para su investigación, demostrando que la combinación de tecnologías y métodos matemáticos representa una estrategia aceptada y eficaz para optimizar el proceso del moldeo por inyección plástica y mejorar la calidad de los productos plásticos.

Posteriormente en el año 2021, en la región de Taiwán, la universidad Chung Yuan Cristian extendió y dedico recursos de investigación para llevar a cabo la creación de una herramienta avanzada destinada a prever los parámetros ideales en el proceso de moldeo por inyección. Esta metodología fusionó la ingeniería asistida por computadora, redes neuronales artificiales y el método Taguchi (Huang et al, 2021). Lo importante a destacar de esta herramienta radica no solo en la obtención de datos complicados de analizar y obtener, sino también en exhibir un rendimiento excepcional en la predicción del desempeño de la tarea.

Finalmente, para el año 2022, investigadores de la universidad Técnica de Kosice apoyándose de las herramientas de simulación Autodesk Moldflow Adviser para analizar técnicas de optimización en el proceso de inyección de plástico para mejorar los parámetros de moldeo (Barón et al, 2022), al identificar las zonas mediante la asistencia computarizada donde había oportunidad de mejorar la fluidez del material dentro del molde. El empleo de softwares de asistencia computacional para evaluar la mejora de parámetros representa una solución eficaz para no desperdiciar recursos experimentales

físicos para probar la eficacia de la optimización, es importante recalcar que estos softwares que apoyan a esta tarea deben estar correctamente calibrados y validados para que sea precisos, sin embargo, este tipo de validación se torna complicada para que sea general, ya que hay variables en maquinaria que pudieran brindar resultados distintos en diferentes lugares.

Esta revisión bibliográfica resalta el estado actual del moldeo por inyección de plástico, enfatizando la relevancia de la inteligencia artificial como lo denota Altan desde 2009, siendo apoyado en próximas investigaciones como la de Feng et al (2019), y las técnicas avanzadas en la optimización del proceso que se miran en cada una de las que se complementan del diseño asistido por computadora. Además, se hace uso de métodos matemáticos para validar los resultados. Cada estudio aporta perspectivas valiosas, sentando así una base sólida para el desarrollo de la herramienta propuesta.

Partiendo de que los autores, mencionados en este apartado, trabajan en su totalidad con la inteligencia artificial y softwares de computadora para la creación de herramientas tecnológicas de apoyo para la parametrización y optimización del proceso del moldeo del plástico por inyección, se presenta en la tabla 6 los métodos matemáticos de apoyo utilizadas por 4 de los 11 autores presentados en esta sección.

Por el contrario, a lo analizado en el anterior apartado, los autores se muestran inclinados por el método Taguchi en 80% seguido del método ANOVA con el 20%, lo cual no es de extrañarse puesto que este método sistemático permite a los investigadores tener control sobre sus variables y fiabilidad del proceso.

Tabla 6: Métodos y Software en estudios de moldeo por Inyección.

Autor	Año	Asistencia Matemática			Asistencia Computacional		
		80%	20%	Total	50%	50%	Total
		Taguchi	ANOVA		IA	Software	
Altan	2009	0	0	0	1	0	1
Ocelik & Erzurumlu	2005	1	0	1	0	1	1
Shen et al	2007	0	0	0	1	1	2
Mercado et al	2017	0	0	0	0	1	1
Fu & Ma	2018	0	0	0	0	1	1
Abdul et al	2019	1	0	1	1	0	1
Feng et al	2019	1	1	2	1	0	1
Huang et al	2021	1	0	1	1	0	1
Barón et al	2022	0	0	0	0	1	1
Total		4	1	5	5	5	10

Fuente: Elaboración propia.

A manera de síntesis de los autores estudiados en los apartados 2.4 y 2.5, podemos observar en la tabla 7, que dentro de los métodos matemáticos utilizadas para el mejoramiento y optimización de los parámetros de moldeo, la predisposición por los investigadores es con el método ANOVA con un 35% seguido del método DOE con un 24% y el método Taguchi con un 22%, cabe hacer mención que en muchos de estos casos los Métodos se complementan, es decir hay una combinación del DOE con las otras 2. También podemos observar que hay una clara inclinación hacia el uso de software y de la inteligencia artificial.

Tabla 7: Métodos matemáticos y asistencia computarizada estudiada.

Autor	Año	Metodología/Asistencia Aplicada					Total
		35%	22%	24%	3%	16%	
		ANOVA	Taguchi	DOE	Inteligencia Artificial	Software	
Jasen et al	1997	1	0	0	0	0	1
Ghani et al	2003	0	1	1	0	0	2
Ocelik & Erzurumlu	2005	0	1	0	0	1	2
Gao & Xicheng	2007	1	0	0	0	1	2
Shen et al	2007	0	0	1	0	1	2
Altan	2009	0	0	1	0	0	1
Rahman	2010	1	0	1	0	0	2
Kramar & Cica	2017	1	1	0	0	0	2
Hong-Seok & Xuan-Phuong	2017	1	0	0	0	0	1
Mercado et al	2017	0	0	0	0	1	1
E. Farottia & M. Natalini	2018	1	0	0	0	0	1
Sigh, Pradhan, & Verma	2018	0	0	1	1	0	2
Kim et al	2018	1	0	0	0	0	1
Amran et al	2018	1	1	0	0	0	2
Fu & Ma	2018	0	0	0	0	1	1
Suleiman et al	2019	1	0	0	0	0	1
Karagöz	2019	1	1	0	0	0	2
Abdul et al	2019	0	1	1	0	0	2
Feng et al	2019	1	1	1	0	0	3
Kusic & Hancic	2020	1	0	1	0	0	2
Mohd et al.	2021	1	0	0	0	0	1
Huang et al.	2021	0	1	1	0	0	2
Barón et al.	2022	0	0	0	0	1	1
Total		13	8	9	1	6	37

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Propiedades de fluidez (o de fluidos) en el proceso de moldeo

La viscosidad es la expresión cuantitativa de la fluidez en el procesamiento de plásticos (Feng et al., 2019). Se erige como un factor fundamental para garantizar la coherencia en la consistencia entre lotes de producción, esto debido a que es un aspecto clave para el control de la temperatura, los materiales con menor densidad viscosa reaccionan con mayor rapidez a los cambios de temperatura, por lo que los lotes de resinas plásticas que se vean afectados por esto podrían influir en las propiedades mecánicas del producto final, si bien la presente herramienta no pretende medir la viscosidad de los materiales, subraya la importancia de que los fabricantes de resinas mantengan una viscosidad constante, ya que con el aumento de temperatura, lo cual induce un movimiento de las cadenas poliméricas, disminuyendo así la cohesión, por ende la cristalización.

En el año 2019, los investigadores Fu y Ma muestran los resultados de su investigación con su propuesta de un método innovador que integra Moldflow Analysis™ para simular tanto el proceso de eyección temprana como la respuesta mecánica de la pieza de plástico, la investigación no solo predice las dimensiones finales de la pieza con mayor precisión, sino que también considera las deformaciones por la eyección en la fase de diseño del molde, teniendo en cuenta la viscosidad como un elemento crucial para evaluar la fluidez del material dentro del molde. La investigación refuerza la importancia de la viscosidad de los lotes de resinas plásticas, porque afectan significativamente también el proceso, por lo que siempre se sugiera una evaluación del control de las materias primas de los productores de piezas plásticas.

Por otro lado, la investigación llevada a cabo por Chen et al (2020) en la Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología de Kaohsiung, se enfoca en el análisis del llenado volumétrico y la velocidad de inyección basados en la presión de la cavidad. La identificación de la adhesión de la viscosidad basada en la calidad de la pieza y la determinación de la condición del proceso de mantenimiento, junto con la desaceleración de la velocidad de inyección, establece parámetros del proceso que mejoran la uniformidad de la calidad del moldeo por inyección, tomando en cuenta la viscosidad y la dureza de los materiales. Es importante conocer el flujo de los materiales dentro del molde para asegurar un correcto llenado y solidificación en los tiempos y temperaturas requeridos, por ello mismo la herramienta creada solo puede predecir el comportamiento mecánico de los polímeros focalizado en ambientes de manufactura controlados.

Posteriormente, otro grupo de investigadores en Taiwán (Chen et al, 2021) proponen un método para la optimización de la fuerza de cierre en el moldeo por inyección de polímeros de baja viscosidad en la etapa del empaque. Sus resultados experimentales indican que, para máquinas de moldeo por inyección que utilizan mecanismos de sujeción del molde de cilindro hidráulico, la temperatura del molde apenas afecta la fuerza de compresión. Sin embargo, cuando se emplea el dispositivo de sujeción del molde del mango, es decir con cerrado manual por un operador y no por una máquina, la fuerza de compresión óptima, determinada mediante su método propuesto, mejora

significativamente el rendimiento en comparación con métodos convencionales. En general, demuestran que, para resinas poliméricas de baja viscosidad, la fuerza de compresión óptima logra fundiciones más suaves y de mayor calidad, considerando adecuadamente la viscosidad.

Estas investigaciones proporcionan valiosas contribuciones al procesamiento de plásticos, abordando la viscosidad como un elemento crítico. La propuesta de Fu y Ma destaca por su enfoque, considerando la viscosidad al simular el proceso de eyección y la respuesta mecánica. Chen et al., resaltan la importancia de ajustar parámetros del proceso basados en la viscosidad para mejorar la uniformidad en la calidad del moldeo por inyección. Por último, el otro grupo presenta una metodología innovadora para optimizar la fuerza de cierre, considerando la viscosidad y mejorando significativamente el rendimiento en fundiciones de polímeros de baja viscosidad.

En la tabla 8 se presenta la frecuencia de estudio de distintos parámetros de moldeo por inyección y propiedades mecánicas identificadas en la literatura como relevantes (con mayor importancia). La temperatura es el parámetro más estudiado, presente en el 100% de los trabajos y una incidencia mayor del 30% en el total de los parámetros referidos en la literatura. En cuanto a las propiedades mecánicas, la dureza y la resistencia a la tracción destacan, ambas con un 38% de incidencia en los estudios, pero la dureza siendo presente en el 100%, por lo que esta propiedad es considerada en la presente investigación y herramienta diseñada. La durabilidad y la viscosidad también se examinan con relativa frecuencia, con un 38% y un 25% respectivamente. Otros parámetros como la presión y la velocidad de inyección son considerados en un 30% y un 20% de los casos. Los resultados indican que hay una variedad de intereses en la investigación del moldeo por inyección, con algunos parámetros y propiedades mecánicas recibiendo más atención que otros.

Tabla 8: Parámetros y propiedades mecánicas revisadas en la literatura relacionadas con la fluidez de los polímeros.

Autor	Año	Parámetro y/o fase de proceso del moldeo de inyección identificada									Propiedades mecánicas estudiadas									
		30%	10%	10%	10%	20%	20%	0%	0%	100%	38%	25%	0%	0%	0%	0%	38%	0%	0%	0%
		Temperatura	Presión de Inyección	Peso de inyección	Presión de empaque	Tiempo de empaque	Ciclo de tiempo	Velocidad de Inyección	Moldeo de resinas	Total	Dureza	Viscosidad	Mod. de elastici.	Resist.a tracción	Elongacion	Cristalización	Tensión residual	Densidad	Ductilidad	Total
Fu & Ma	2019	1	1	1	1	1	1	0	0	6	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Chen et al.	2020	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2
Chen et al	2021	1	0	0	0	1	1	0	0	3	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Total		3	1	1	1	2	2	0	0	10	3	2	0	0	0	3	0	0	0	8

Fuente: Elaboración propia.

1.7 Diversidad en tipos de resinas y aditivos al proceso.

El plástico es un material versátil que puede adoptar cualquier forma deseada, lo que lo ha convertido en un recurso indispensable para la humanidad. Sin embargo, existen miles de resinas plásticas en el mercado actual que requieren un análisis cuidadoso de sus propiedades mecánicas y su relación con el proceso de moldeo por inyección. Por ejemplo, según Dupont (2023), líder mundial en la producción de plásticos, oferta más de 350 tipos de resinas plásticas con diferentes combinaciones y mezclas químicas únicas, lo cual brinda una referencia de la gran variedad que existe en el mercado, distintos fabricantes ofertan diferentes tipos de combinaciones para distintas aplicaciones.

Al ser un material variable tanto en combinación como en propiedades, existen varios estudios han investigado los factores que influyen en el comportamiento mecánico de los plásticos y sus compuestos, especialmente el polipropileno (PP) y el polipropileno reforzado (PPR), tal como el realizado por un equipo de investigación de la Unión Europea en 2016 (Notta-Cuvier et al, 2016) centra su investigación en el PP y el PPR y su sensibilidad a la velocidad de deformación. Descubrieron que la velocidad afectaba la variabilidad en la pieza con PP en un 7.5%, contra la versión reforzada de un 3% respecto a su sensibilidad, debido a su viscoelasticidad. Este estudio proporcionó evidencia de la relación entre la velocidad, la deformación y la viscosidad de los plásticos.

En un estudio similar llevado a cabo en el año 2018, por investigadores de la Universidad Tecnológica de Dalian (Sang et al, 2018), se analizó el efecto de tres tipos de elastómeros (monómero de etileno-propileno-dieno (EPDM), polietileno-octeno (POE) y etileno-acetato de vinilo (EVA) en la cristalización no isotérmica y las propiedades mecánicas de los compuestos con diferentes contenidos de fibra de basalto. Se fabricaron los compuestos mediante extrusión y moldeo por inyección a partir de PP, fibra de basalto (BF) y polipropileno injertado con anhídrido maleico (MAPP). Los resultados mostraron que la BF tenía un efecto de refuerzo sobre la resina PP, y la adición de MAPP mejoró aún más las propiedades de tracción al aumentar el enlace interfacial PP/BF. Entre los elastómeros, el EPDM fue más efectivo en mejorar la resistencia y el módulo a la tracción, mientras que el POE endureció significativamente la resistencia al impacto.

Por otro lado, en un artículo publicado en 2018 por estudiosos de la India (Mittal et al, 2018), se presenta el impacto que generan los compuestos de polipropileno reforzados con rellenos inorgánicos en sus propiedades mecánicas. Se recalca que los rellenos minerales como el talco y la mica se utilizan comúnmente en la industria del plástico debido a su tendencia a alterar las propiedades de los materiales termoplásticos. Para la investigación, se prepararon compuestos híbridos de polipropileno (PP)-talco (PTC), PP-mica (PMC) y PP-talco/mica (PHC). Los resultados indicaron que el tamaño, el tipo y el contenido de las partículas de relleno tienen un gran impacto en las propiedades mecánicas y reológicas de los compuestos. La viscosidad de cizallamiento disminuyó a medida que aumentaba la velocidad de cizallamiento. Además, se encontró que la temperatura influía significativamente en un 69% en las condiciones mecánicas finales del componente que se iba a fabricar.

Así mismo en 2019 investigadores de Italia (Basso et al, 2019) realizaron un estudio para analizar el comportamiento no lineal a la fluencia de un polipropileno comercial reforzado con fibras cortas de vidrio. Para ello, realizaron ensayos de tracción a la fluencia y midieron la degradación de la rigidez. También estudiaron el efecto del envejecimiento térmico y el enfriamiento posterior sobre esta propiedad mecánica. Los resultados indicaron que este modelo puede representar el comportamiento de los compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas de vidrio, donde el microdaño se origina por la separación de las interfaces fibra-matriz a deformaciones bajas, y donde las grietas se extienden y provocan la rotura por fluencia por tracción.

Entre otros estudios que destacan en esta área, en China (Sui & Xie, 2019) elaboraron un estudio de gran interés para las industrias con aplicaciones muy específicas y requerimientos mecánicos elevados en sus componentes plásticos. Los autores detectaron la necesidad de mezclas de copolímero de poliamida/acrilonitrilo-butadieno-estireno (PA/ABS) y destacaron que debido a la pobre miscibilidad de PA y ABS, el desarrollo de una estrategia de compatibilización efectiva ha sido un desafío urgente para lograr propiedades mecánicas prominentes. Crearon un conjunto de mezclas de PA6/ABS mejoradas mecánicamente utilizando dos compatibilizadores injertados en fusión de monómeros múltiples, SEBS-g-(MAH-co-St) y ABS-g-(MAH-co-St). Descubrieron que el tamaño del dominio disperso se reducía significativamente y, al mismo tiempo, se formaban estructuras únicas de núcleo duro de encapsulación de capa blanda, en presencia de compatibilizadores. Detectaron que esta unión provocaba un aumento del 36% en la resistencia a la tracción y un aumento del 1300% en la resistencia al impacto, en comparación con la mezcla binaria pura PA6/ABS. Como se ha observado en las investigaciones analizadas en este apartado hasta este momento, la combinación de resinas plásticas con aditivos no es una novedad, durante los últimos años la industria y el recurso de investigación se han centrado en la utilización de materiales con menor impacto en la huella de carbono que dejan sobre el planeta lo cual ha abierto una nueva área de estudio en este tipo de materiales con una visión ecológicamente sostenible.

Las composiciones plásticas reforzadas a base de elementos biodegradables podrían ser el futuro de la industria de los plásticos, en búsqueda de materiales más amigables con el medio ambiente. En un artículo de 2019 (Samouh et al, 2019), se menciona cómo se comportarían los compuestos fabricados con ácido poliláctico (PLA) y fibras de sisal. Para este estudio, se utilizaron polímeros de origen biológico, específicamente ácido poliláctico (PLA) y fibra de sisal. Se extruyeron biocompuestos y luego se inyectaron con diferentes contenidos de fibras de sisal (5%, 10%, 15%). Los resultados mostraron que el aumento de la tasa de refuerzo mejoraba la resistencia al impacto y la tracción. Esto se debía a que el aumento del contenido de fibra de sisal aumentaba el grado de cristalinidad de la matriz del 47% al 61%. Las fibras de sisal actuaban como agente nucleante para el PLA. Es de interés ver si esta fibra podría tener la misma relación con otros plásticos.

Por otro lado, en un estudio experimental de la Universidad de la República Checa, investigadores de la Universidad Tecnológica de Brno (Černý et al, 2023), realizaron un estudio experimental matemático para predecir el comportamiento de los materiales en

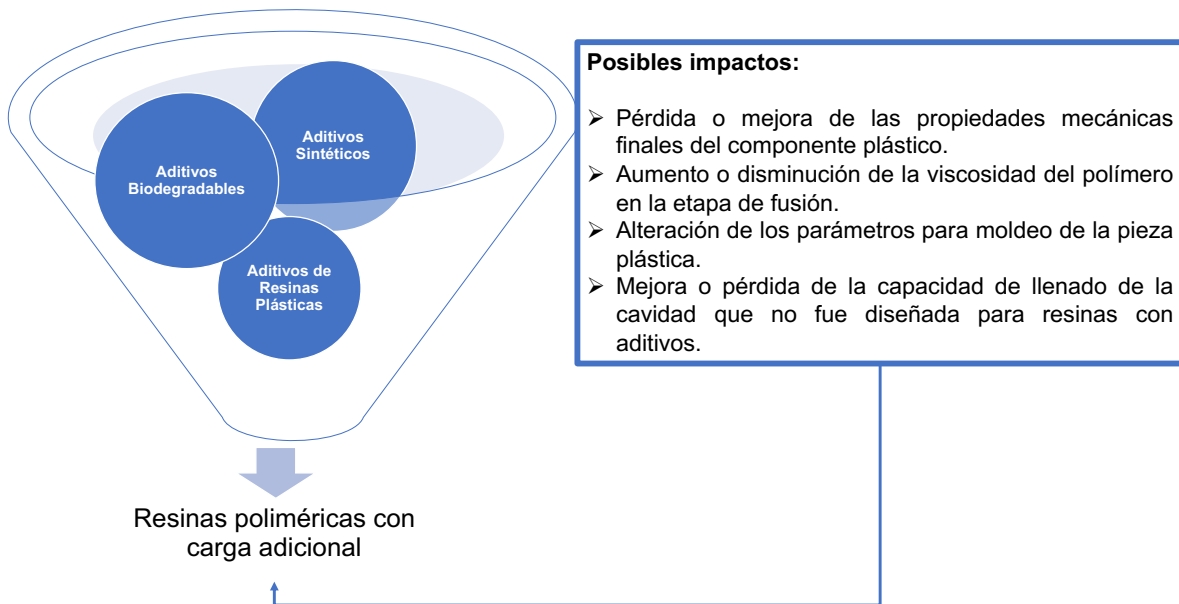
base a su porosidad. Analizaron compuestos de PUR/caucho con una amplia gama de relleno de caucho, varias porosidades y diferentes matrices de poliuretano. En donde mencionan que los factores principales de las propiedades mecánicas objeto del estudio son el módulo elástico, la resistencia y deformación máximas y la energía necesaria para alcanzar la deformación máxima, todas provenientes de la dureza que tenga el material como parámetro principal de la funcionalidad de los componentes manufacturados con esos materiales.

Desde el año 2000, la adición de compuestos a las resinas plásticas ha sido crucial para mejorar sus propiedades mecánicas, destacando la dureza, plasticidad y uniformidad de sus estructuras cristalinas. Este enfoque ha cobrado aún más importancia en la última década. Se puede observar en el estudio de Hong-Gang et al. (2007) utilizaron mezclas de poliamida (PA) y polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), utilizando polietileno de alta densidad (HDPE) injertado con anhídrido maleico (MAH) como compatibilizador. Los análisis mostraron una mejora en la resistencia mecánica al agregar el UHMWPE, con una reducción en la resistencia a la tracción y flexión del PA. La reacción química entre MAH-g-HDPE y PA mejoró la dispersión uniforme de UHMWPE en la mezcla, lo que redujo el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste debido a la formación de una capa lubricante en la superficie con el aumento de UHMWPE.

Como se detalla en las investigaciones anteriores, los aditivos son sustancias que se añaden a las resinas plásticas para mejorar sus propiedades. Los aditivos naturales son aquellos que se obtienen de fuentes naturales y los inorgánicos son aquellos que se obtienen de fuentes procesadas que no se encuentran de manera natural en el planeta. Los aditivos pueden mejorar la resistencia al impacto, la resistencia al calor, la resistencia a la abrasión y la resistencia a los rayos UV, también pueden mejorar la estabilidad dimensional y la resistencia al fuego como lo mostraron Notta-Cuvier et al (2016) y Sang et al (2018). La cantidad de aditivo que se agrega a una resina plástica depende del tipo de resina y del tipo de aditivo, el colocar aditivos a las resinas plásticas al ser un proceso altamente usado en la industria, se convierte en interés al analizar sobre las aplicaciones que se tienen y el comportamiento mecánico que con lleva, por ello ha sido considerado para el desarrollo de la herramienta.

En resumen, estas investigaciones ofrecen un panorama amplio sobre las propiedades mecánicas de los polímeros y la influencia de factores como la velocidad de deformación, la cristalización, el refuerzo, la biodegradabilidad y la porosidad. Esta información es esencial para el desarrollo de una herramienta probabilística de selección de materiales, permitiendo recomendaciones precisas basadas en propiedades específicas y avanzando la ingeniería de materiales hacia opciones más sostenibles. En la figura 5, se ilustran las posibles consecuencias del uso de aditivos en el proceso de moldeo, resaltando su impacto en las propiedades finales del producto.

Figura 5: Posibles impactos de aditivos en resinas plásticas.



Fuente: Elaboración propia.

La tabla 9 resume los parámetros de moldeo por inyección y las propiedades mecánicas identificadas en la literatura de investigaciones realizadas y con mayor relevancia para el presente estudio. La temperatura y la presión de inyección son los parámetros más frecuentemente analizados, cada uno con un 17% de incidencia en los estudios. En cuanto a las propiedades mecánicas, la dureza es la más estudiada, presentándose en el 27% de los trabajos. Además, la viscosidad y la resistencia a la tracción tienen un enfoque considerable con un 20% y un 13%, respectivamente. La investigación sobre la velocidad de inyección y el molido de resinas se ha llevado a cabo en menor medida, con un 14% y un 3% de los estudios incluyéndolos. En general, los resultados muestran que hay ciertos parámetros y propiedades que son más prioritarios en la literatura existente sobre moldeo por inyección.

Tabla 9: Parámetros y propiedades mecánicas observadas en la literatura relacionada con resinas plásticas con aditivos.

Autor	Año	Parámetro y/o fase de proceso del moldeo de inyección identificada									Propiedades mecánicas estudiadas									
		17%	17%	14%	17%	11%	8%	14%	3%	100%	27%	20%	13%	10%	7%	13%	3%	3%	3%	100%
		Temperatura	Presión de Inyección	Peso de inyección	Presión de empaque	Tiempo de empaque	Ciclo de tiempo	Velocidad de Inyección	Moldeo de resinas	Total	Dureza	Viscosidad	Mod. de elastici.	Resista tracción	Elongacion	Cristalización	Tensión residual	Densidad	Ductilidad	Total
Hong-Gang et al.	2007	1	1	1	0	0	0	1	0	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Notta-Cuvier et al.	2016	0	1	1	1	0	0	1	0	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Mittal et al.	2018	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sang et al.	2018	0	1	1	1	0	0	1	1	5	1	1	1	0	0	1	0	0	0	4
Samouh et al.	2019	1	0	0	1	1	0	0	0	3	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Sui & Xie	2019	1	1	1	1	1	1	1	0	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
Basso et al	2019	1	1	1	1	1	1	1	0	7	1	0	1	1	1	0	0	0	0	4
Černý et al	2023	1	1	0	1	1	1	0	0	5	1	1	1	1	0	1	0	0	0	5
Total		6	6	5	6	4	3	5	1	36	8	6	4	3	2	4	1	1	1	30

Fuente: Elaboración propia.

1.8 Propiedades mecánicas en el proceso de moldeo

Como se mencionó anteriormente, el empleo de aditivos y la manipulación de la viscosidad desempeñan roles fundamentales en el comportamiento de la materia prima. No obstante, el proceso de moldeo, inherente a la fabricación de plásticos, ejerce una influencia considerable en las propiedades mecánicas del producto final (Caicedo et al., 2023). La temperatura y presión durante este proceso, así como la velocidad de enfriamiento, son factores determinantes que inciden en las características mecánicas del plástico. La configuración del molde también resulta crucial para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

En un estudio efectuado en 2018 por investigadores de la región de Guiyang, China (Zhang et al, 2018), se desarrolló un modelo para la preparación y análisis de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de vidrio (PPR) mediante un dispositivo de impregnación diseñado por los autores. La investigación se centra en los efectos de la temperatura de inyección en diversas propiedades mecánicas, cristalinas, térmicas y dinámico-mecánicas de los compuestos. Los resultados revelaron que la temperatura de inyección incidía en la temperatura de fusión, cristalinidad, viscosidad, llenado del molde y fuerza de corte de los compuestos. Asimismo, se identificó que la temperatura óptima para obtener las mejores propiedades mecánicas y prevenir el fenómeno de "piel rica en fibra de vidrio" era de 290 °C. Se establece que una distribución uniforme y longitud adecuada de las fibras contribuye a mejorar el rendimiento y durabilidad en aplicaciones estructurales.

Para el año 2020, investigadores de la Universidad Tecnológica del Sur de China llevaron a cabo un estudio sobre un nuevo proceso y aparato para la fabricación de compuestos de fibra de carbono y polipropileno mediante un método de mezcla e inyección en línea con tres tornillos (Wang et al, 2020). La investigación se enfocó en

cómo la carga de fibra de carbono y la velocidad de rotación de los tornillos incidían en diversas propiedades mecánicas, térmicas y morfológicas de los compuestos. Los hallazgos demostraron que el aumento de la carga de fibra de carbono mejoraba la resistencia a la tracción, flexión, módulo e impacto de los compuestos, mientras que un incremento en la velocidad de rotación conllevaba a un deterioro de dichas propiedades.

La determinación de parámetros apropiados resulta crucial para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas en un componente. El investigador ruso Fendulov (2018) llevó a cabo un estudio para modelar partes elaboradas a base de termoplásticos y predecir su tensión residual en función de su grado de cristalinidad y temperatura. La cristalinidad, definida como el grado en que las moléculas de un polímero se encuentran completamente ordenadas, se mostró estrechamente relacionada con la temperatura y la historia térmica del polímero. Además, se evidenció que la rigidez elástica de los polímeros termoplásticos varía según su grado de cristalinidad, lo cual está asociado con un incremento gradual de cadenas cristalinas que resisten la deformación del material. Estos resultados resultan esenciales para relacionar el grado de cristalinidad con las propiedades mecánicas y los parámetros del entorno de manufactura.

Por otra parte, en 2019, investigadores de Guangzhou, China, llevaron a cabo una investigación en la que se prepararon y caracterizaron una serie de mezclas de copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)/poli (tereftalato de butileno) (PBT)/acrilonitrilo-estireno-glicidilmetacrilato (ASG) con diversas composiciones (Tang, 2019). Descubrieron que cuando la fracción de ABS excedía un valor crítico, se producía un aumento rápido en la resistencia al impacto con muescas de las mezclas de ABS/PBT, independientemente de la presencia del compatibilizador ASG. La relación entre la morfología y los resultados del impacto con muescas reveló que la transición dúctil-frágil estaba estrechamente relacionada con la inversión de la morfología, destacando que la fase continua de ABS desempeñaba un papel crucial en el endurecimiento de las mezclas de ABS/PBT.

A su vez en 2020, un grupo de investigadores de la India y Arabia Saudí (Dhaduti et al., 2020) investigó la predicción del proceso de moldeo por inyección para materiales basados en Nylon 66. Se focalizaron en un engranaje como pieza de estudio para predecir su comportamiento. Utilizaron el software de Autodesk Moldflow Adviser 2017 para anticipar el comportamiento de los materiales dentro del molde. Los resultados indicaron que las resinas de nylon reforzadas con fibra de vidrio, en diferentes porcentajes, tendían a conservar la forma y dimensión esperadas, sin deformaciones ni problemas geométricos significativos. Este estudio es fundamental para comprender cómo ciertos materiales, al ser reforzados, modifican su comportamiento dentro del molde, un factor crucial para lograr resultados óptimos.

Así mismo en 2020, investigadores chinos (Chen et al., 2020) llevaron a cabo un estudio sobre el cambio en la estructura cristalina de resinas PLLA/PCL. Estas resinas son biodegradables y se evaluaron sus propiedades en relación con dichos cambios. Se diseñó un experimento con una mezcla de PLLA con un 20% en peso de PCL, seguido de la fabricación de muestras mediante moldeo por inyección y su posterior recocido

térmico a diversas temperaturas durante 2 horas para aumentar la cristalinidad de la matriz de PLLA. Los resultados mostraron que el recocido de la mezcla PLLA/PCL a 80 °C producía una cristalinidad superior al 40% y un aumento en la resistencia al impacto de las muestras.

Por otro lado, en el año 2021, investigadores italianos (Kyzy et al, 2021) examinaron el comportamiento a la fluencia del polipropileno reforzado con fibras cortas de vidrio (PP-GF) moldeado por inyección a diferentes temperaturas y con muesca. Realizaron ensayos de fluencia a tracción a 23 °C, 40 °C y 60 °C, tanto con probetas lisas como con muescas. Se constató que tanto la temperatura como la presencia de muescas afectaban significativamente a la deformación y el tiempo de rotura de los compuestos, influenciando el mecanismo y la velocidad de fluencia, y aumentando la tensión en el caso de las muescas.

En la revisión del estado del arte realizada por investigadores de la India realizada por Sundarakannan et al (2023), se exploró cómo agregar fibras naturales o nanorrellenos puede mejorar las propiedades mecánicas de los materiales. Se enfocaron en identificar qué tipos de fibras pueden aumentar la resistencia a la tracción, la flexión, la resistencia al impacto y la resistencia a la erosión, características vinculadas a la dureza del material al solidificarse. Los resultados mostraron mejoras significativas en la capacidad de absorción de energía y en la resistencia a la tracción y flexión de los compuestos de polímero reforzado con una variedad de fibras naturales como la fibra de vidrio, piña, yute, cáñamo, sisal y yute. Se observó un aumento del 30 % al 50 % en la resistencia a la flexión. Estos hallazgos sugieren la viabilidad de utilizar fibras naturales para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, lo que podría beneficiar al medio ambiente.

En el primer semestre del 2023, estudiosos de Alemania (Freedden et al, 2023) realizaron una investigación comparando los procesos de termoformado de polipropileno (PPGF, PA6GF, PA6CF) en diferentes clasificaciones, en su estado puro y en situaciones de reciclaje, para evaluar sus propiedades mecánicas con el proceso de moldeo por inyección. En esta investigación llegan a la conclusión que para poder trabajar e igualar las propiedades mecánicas de una resina no reciclada no se puede lograr al 100%, pero que aun después de varios ciclos y de reforzamiento de las resinas, las propiedades mecánicas de tensión, dureza (resistencia a la tracción) y elongación de materiales son mucho mejores que alternativas convencionales en la industria.

Un estudio similar, realizado en 2016, por un equipo de investigación internacional de Malasia y Jordania (Jiun et al., 2016), investigaron sobre los efectos del ciclo de reciclaje de polímeros termoplásticos y las afectaciones en las propiedades mecánicas. Demostraron que la resistencia a la tracción y la densidad disminuyeron para el polímero termoplástico y los cambios visuales son significativos cuando se incrementó el número de ciclos de reciclaje.

Continuando con las investigaciones del reciclaje de los materiales, en un caso de estudio publicado en el primer trimestre de 2023 elaborado por investigadores de

Portugal (Marković et al, 2023), se dedicaron a evaluar las propiedades térmicas y mecánicas de los plásticos reciclados, como el policarbonato (PC), poliestireno (PS), poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio (PA6-GF30) y tereftalato de polietileno (PET). Las muestras inyectadas se reciclaron mecánicamente dos veces y se compararon mediante pruebas térmicas y mecánicas, como calorimetría diferencial de barrido, dureza, resistencia a la tracción y tasa de fluidez. Los resultados arrojaron que los materiales amorfos utilizados no sufren cambios significativos en sus propiedades, pero presentan cambios en sus características ópticas. Los semi-cristalinos presentan algunas modificaciones. El PET es el material que sufre los mayores cambios, tanto en su fluidez como en sus propiedades mecánicas.

En una colaboración internacional de investigadores de Polonia y Dinamarca a inicios del 2023 (Andrzejewski et al, 2023), fue realizada una investigación que explica sobre el uso de un sistema de refuerzo sostenible compuesto por partículas de bio-carbón (BC) y fibras cortas de basalto (BF) y carbono (CF) para reforzar mezclas de polímeros técnicos como el policarbonato (PC) y el polibutileno tereftalato (PBT) con acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Los autores prepararon los compuestos mediante mezcla en fundido y moldeo por inyección, utilizando diferentes proporciones de los rellenos. Se evaluaron las propiedades mecánicas, cristalinas, térmicas y dinámico-mecánicas de los compuestos, así como el efecto del envejecimiento térmico y el enfriamiento posterior. Los resultados mostraron que la presencia de BC no provocaba la degradación térmica de la matriz, pero sí reducía ligeramente el rendimiento mecánico. También mostraron que la temperatura de inyección óptima para obtener las mejores propiedades era de 290°C para los compuestos con BF/BC y de 270°C para los compuestos con CF/BC, mismos datos que se refuerzan en estudios similares como por ejemplo el efectuado por Wang et al (2022), que obtuvieron rangos de temperatura similares para este tipo de materiales.

La tabla 10 ilustra la prevalencia de ciertos parámetros y propiedades mecánicas en estudios sobre moldeo por inyección. La temperatura y la dureza son los aspectos más investigados, con una presencia en el 31% y el 36% de los estudios, respectivamente. Otros parámetros como la presión de inyección, el peso de inyección y la presión de empaque se analizan en aproximadamente un 14% de los trabajos. La viscosidad y la resistencia a la tracción también se abordan, estando presentes en el 18% y el 12% de los estudios. Los datos reflejan un fuerte enfoque en la dureza como propiedad mecánica clave y un interés moderado en la viscosidad y la resistencia a la tracción.

Tabla 10: Parámetros y propiedades mecánicas identificadas en la literatura en relación a los parámetros de moldeo por inyección de plástico.

Autor	Año	Parámetro y/o fase de proceso del moldeo de inyección identificada								Propiedades mecánicas estudiadas										
		31%	14%	11%	14%	14%	6%	6%	6%	100%	36%	18%	9%	12%	3%	15%	3%	3%	0%	100%
		Temperatura	Presión de Inyección	Peso de inyección	Presión de empaque	Tiempo de empaque	Ciclo de tiempo	Velocidad de Inyección	Moldeo de resinas	Total	Dureza	Viscosidad	Mod. de elastici.	Resista tracción	Elogacion	Cristalización	Tensión residual	Densidad	Ductilidad	Total
Jiun et al.	2016	1	0	0	1	1	0	0	0	3	1	0	0	1	0	0	0	1	0	3
Fedulov	2018	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	3
Zhang et al.	2018	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	4
Tang et al.	2019	0	1	1	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Wang et al	2020	1	1	1	0	0	0	1	1	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3
Dhaduti et al	2020	1	1	1	1	1	1	1	0	7	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2
Chen et al	2020	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Kyzy	2021	1	1	0	1	1	1	0	0	5	1	1	0	0	1	1	0	0	0	4
Freeden et al.	2023	1	1	1	1	1	0	0	0	5	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Marković et al.	2023	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Andrzejewski et al.	2023	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	4
Sundarakannan et a	2023	1	0	0	1	1	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Total		11	5	4	5	5	2	2	2	36	12	6	3	4	1	5	1	1	0	33

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, los autores coinciden en que algunos materiales no pierden significativamente sus propiedades mecánicas al ser reutilizados, lo que abre un nuevo camino en el diseño de los productos plásticos puesto que con datos correctos podrían tomar decisiones con una mayor consciencia de su impacto en el medio ambiente. También se destaca la influencia de la temperatura sobre las propiedades mecánicas finales del componente plástico, estableciendo un rango óptimo para los termoplásticos de temperatura de moldeo en 290°C compuestos con BF/BC y de 270°C para los CF/BC, en base a esos datos, fue considerado el diseñado el experimento para la herramienta propuesta, y con el fin de validar los datos fueron tomados datos +/- 10°C.

1.9 La dureza como propiedad mecánica y su representatividad

En la sección anterior (1.8), se examinó cómo la temperatura afecta las propiedades mecánicas de los materiales. Ahora, tras este descubrimiento, surgió el desafío de identificar cuál es la propiedad mecánica que ha sido más estudiada en relación con la temperatura de moldeo, a continuación, se presentan los estudios considerados para el desarrollo de la herramienta propuesta, los cuales que fueron tomados en cuenta debido a su relevancia con el tema y metodologías a fines a su comprobación.

Un grupo de investigadores de la India y Arabia Saudí (Mouhmid et al, 2006) afirma que el comportamiento del nylon con diferentes porcentajes de reforzamiento de fibra de vidrio debe evaluarse. En este estudio se hacía referencia a que la adición de esta fibra da como resultado una pérdida de ductilidad y una mayor rigidez. Si aumenta el porcentaje de fibra conduce a valores más altos de resistencia a la tracción y módulo, y valores más bajos de tensión de falla. Adicionalmente también se encontró que la

velocidad de deformación en el rango de prueba tiene menos efecto en el rendimiento del PA66 reforzado con fibra de vidrio que el PA66 no reforzado. En PA66 no reforzado, el aumento de la velocidad de deformación da como resultado una mayor resistencia a la fluencia y una menor deformación a la rotura. La temperatura juega una regla para mantener las propiedades mecánicas de los materiales. El aumento de la temperatura conduce a una mayor plasticidad y una menor dureza, la dureza para esta investigación la denota como un posible indicador de la calidad del material y su capacidad para resistir el desgaste y el envejecimiento.

Reforzando el estudio realizado por Mouhmid et al (2006), en el año 2020 investigadores de Turquía estudiaron las propiedades mecánicas, térmicas, de fluidez y morfológicas del copolímero ABS reforzado con bentonita (BNT) para diferentes procesos de impresión 3D y moldeo por inyección. Encontraron que la resistencia a la tracción, el alargamiento y la dureza del ABS aumentaron con el contenido de BNT, así como la temperatura de transición vítrea y el módulo de almacenamiento (Alhallak, et al, 2020). Sin embargo, la resistencia al impacto disminuyó con la BNT, por lo tanto, sugirieron que se debe investigar el efecto de la composición y la estructura molecular del material en sus propiedades mecánicas antes de usar mezclas de resinas para aplicaciones específicas.

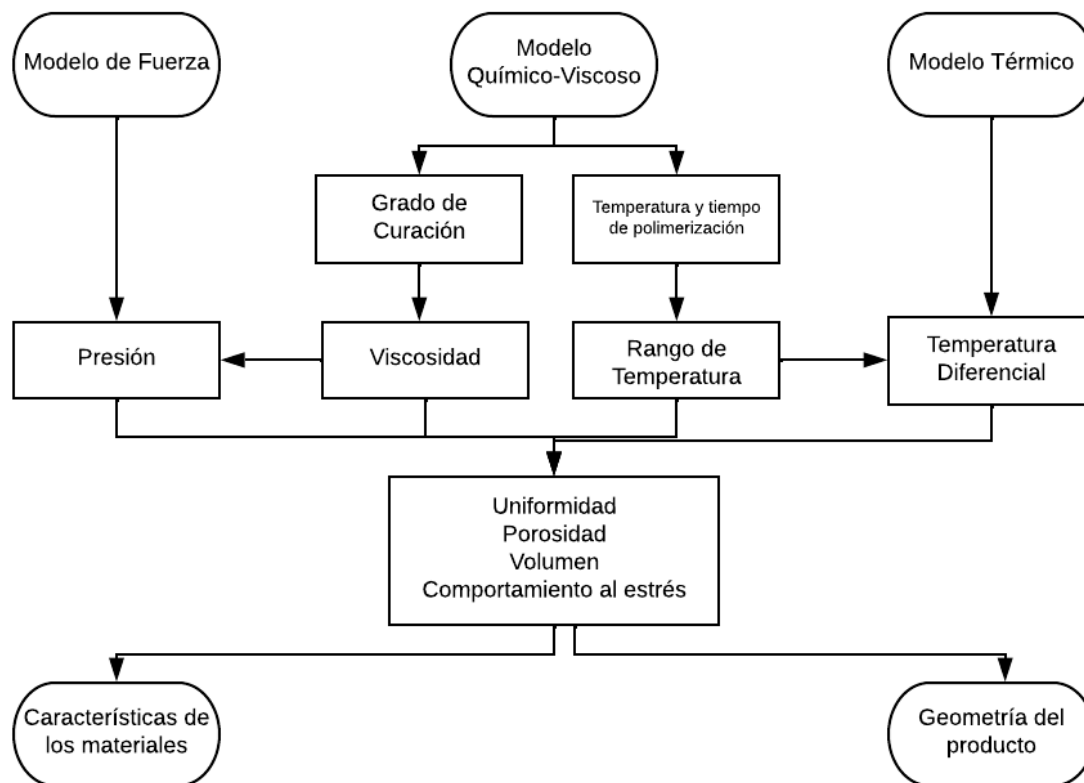
Por otra parte, en el año 2021, investigadores de la Universidad de Quebec analizaron las propiedades mecánicas del HDPE reforzado con fibra de abedul producido por moldeo por inyección (Koffi et al, 2021). Compararon el impacto del peso de caída, la resistencia al impacto Izod, la rigidez, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad con el contenido de fibra. Observaron que la energía de impacto absorbida por el peso que cae fue constante e independiente del contenido de fibra, mientras que la resistencia al impacto fue inversamente proporcional al contenido de fibra. La rigidez del material disminuyó ligeramente con un contenido de fibra del 40%. La dureza Shore D y el módulo de elasticidad aumentaron con el contenido de fibra hasta un máximo del 30% y 40%, respectivamente. La resistencia a la tracción también se mejoró con el contenido de fibra hasta un máximo del 40%. Estos resultados mostraron las ventajas de los compuestos reforzados con fibra natural sobre los sintéticos en términos de baja densidad, propiedades mecánicas útiles y respeto al medio ambiente, se reafirma que la dureza es una propiedad importante de los plásticos porque está relacionada con la resistencia del material a la deformación y la abrasión.

A su vez investigadores de Polonia evaluaron la influencia del proceso de envejecimiento en las propiedades de resistencia seleccionadas de las composiciones de polipropileno (PP) con cargas minerales. Usaron tres tipos de materiales en polvo: aluminosilicatos (zeolita), cenizas volantes y polvo de yeso. Mezclaron los materiales en el tornillo previo a la inyección del PP con diferentes porcentajes de carga (Garbacz et al, 2021). Sometieron las muestras a cámaras de envejecimiento durante 4 meses, 8 meses y 1 año. Reportaron que el relleno de PP con zeolita redujo la resistencia mecánica en un promedio del 10%, las cenizas volantes aumentaron la resistencia mecánica en un promedio del 30%, y el polvo de yeso aumentó la resistencia mecánica

en un promedio del 20%. Estos hallazgos son importantes para entender cómo el envejecimiento afecta las propiedades y la vida útil de los materiales compuestos.

Mientras tanto investigadores chinos (Açıkbaş et al, 2022), experimentaron con varios parámetros de proceso de moldeo por inyección del termoplástico de poliéster éter cetona reforzado con fibra de carbono (CFF/PEEK). Estudiaron la temperatura de moldeo, la presión de moldeo y el tiempo de retención. Descubrieron que las temperaturas de moldeo demasiado bajas o altas afectaban la viscosidad de la resina y que las temperaturas muy altas podían provocar la degradación térmica y la fragilización de la resina, el objetivo es encontrar la dureza ideal como propiedad final de los plásticos, puesto la dureza también puede ser un indicador de la resistencia mecánica del material. En la figura 6, podemos observar la relación de afectaciones a componentes plásticos en relación con su viscosidad, fuerza y temperatura.

Figura 6: Modelo de relación de afectaciones al componente plástico.



Fuente: Açıkbaş et al (2022)

A su vez investigadores ucranianos en el año 2022 desarrollaron un modelo matemático para predecir el comportamiento de los materiales poliméricos compuestos aplicados en paneles (Kondratiev et al, 2022). Consideraron los parámetros de moldeo de temperatura, presión de empaque y tiempo de ciclo. El método determinaba los

parámetros racionales del proceso que aseguraban la integridad estructural del panel sin porosidad o deformación con un margen de error del 7%. También encontraron una relación entre la presión inadecuada y la presencia de defectos como bordes, ondulación, hinchamiento y adherencia no acorde en las piezas.

De manera alternativa el maestro Hu (2022), en su revisión de literatura sobre la cristalización de polímeros y su importancia para definir las propiedades mecánicas de los componentes. Explicó que la cristalización puede ocurrir de manera parcial o completa en la pieza, dependiendo de la temperatura. También indicó que la arquitectura y la morfología de los polímeros, que se refieren a la forma y la alineación de las cadenas moleculares, afectan muchas de sus propiedades físicas, como la viscosidad, la solubilidad y la temperatura de transición vítrea. Por lo tanto, sugirió que se debe tomar en cuenta la temperatura óptima para alcanzar un grado de cristalización adecuado, ya que una cristalización excesiva puede volver quebradiza la pieza.

Respecto a la importancia de la temperatura que destacó Hu (2022), es importante recalcar la relevancia del hallazgo efectuado por investigadores de la Universidad de Coímbra (Carrupt & Piedade, 2021), quienes analizaron la influencia de las velocidades de enfriamiento en el control del proceso y los costos de la producción de componentes plásticos por moldeo por inyección. Señalaron que un enfriamiento más rápido hace el proceso más eficiente, pero también afecta la calidad y las propiedades mecánicas de la pieza. Un enfriamiento uniforme reduce las tensiones térmicas residuales y las deformaciones. Sin embargo, la tasa de transferencia de calor del polímero y el molde varía durante el ciclo de moldeo y afecta la contracción de la pieza y del molde. La presión de llenado y el rendimiento de enfriamiento dependen de las propiedades del polímero, ya que los materiales amorfos se enfrían más rápido que los semi-cristalinos. Estos últimos necesitan una velocidad de enfriamiento más lenta para permitir el orden estructural de las macromoléculas. Además, se deben considerar el diseño del molde y los parámetros del proceso, para poder definir correctamente la dureza a la que se pretende llegar, las propiedades mecánicas relacionadas con la dureza, como la resistencia a la tracción y la compresión, son importantes para determinar la capacidad del material para soportar cargas.

Como se detalló en el apartado 1.7 en investigaciones más recientes, se observa una tendencia a la integración de refuerzos naturales a las resinas plásticas, esto en beneficio del medio ambiente, en un caso de investigación realizado en 2023 por investigadores de la Facultad de Ingeniería de la India (Krishnakumar et al, 2023), quienes se dedicaron a evaluar el efecto del relleno de madera en el comportamiento mecánico y térmico de compuestos híbridos reforzados con polipropileno/vidrio corto/fibra corta de carbono. Se encontró que la adición de relleno de madera deteriora el comportamiento de tracción y flexión de los materiales compuestos; sin embargo, se encuentra que la resistencia al impacto de los materiales compuestos aumenta con el aumento del contenido de relleno de madera. Si bien la dureza de los materiales compuestos aumenta con la adición de relleno de madera en comparación con el polipropileno puro; sin embargo, el impacto de la adición de relleno de madera con compuestos híbridos es insignificante.

Con lo mencionado anteriormente, podemos concluir que los materiales naturales que se escojan para mejorar las resinas pueden que no ayuden a la funcionalidad mecánica de la pieza. Son valiosos estos hallazgos puesto que nos permiten conocer qué aspectos deben cuidarse al momento de adicionar refuerzos de otras composiciones para aumentar las características mecánicas de las resinas plásticas.

Haciendo énfasis en la importancia de los aditivos, en una colaboración entre la Universidad de Tsinghua de Beijing y el Instituto para nuevos materiales de la región de Foshan en China (Zhou et al, 2022), investigaron sobre las propiedades mecánicas de materiales polímeros reciclados, pero con el énfasis de que estos eran dieléctricos. Se hicieron pruebas con tres tipos de poli (éster metacrilato) que incluyen PMMA, PBMA y P(iBMA), los cuales se mezclaron con P(VDF-HFP), respectivamente, y se fabricaron en películas utilizando un método de electro hilado, seguido de un proceso de prensado en caliente y tratamiento térmico. Aunque el proceso no está ligado directamente con la inyección, se requiere hacer énfasis en su descubrimiento final, que se encuentra estrechamente relacionado con lo que la literatura nos ha mostrado: la importancia de la plasticidad para la resistencia a la ruptura, convirtiendo a la dureza del material en la propiedad mecánica más buscada al momento de realizar pruebas con materiales, homologación y consideración para aplicaciones.

En un estudio llevado a cabo a principios de 2023, (Traxler et al, 2023), investigadores de Austria realizaron un estudio para ver el comportamiento en sus propiedades mecánicas del polipropileno virgen o en su estado más puro, en contraste con polipropileno reciclado. Destacaron que la importancia del uso de estos materiales radica en lo que desea aplicarse: mientras que el primero es para aplicaciones más especializadas, el segundo es para usos donde las propiedades base no son tan rigurosas o exigidas para la funcionalidad y vida útil del componente. Se centraron en el módulo de tracción y la resistencia al impacto (dureza) como las propiedades mecánicas más importantes para su aplicación. Para ello denotaron que igualar la viscosidad es clave para poder predecir el comportamiento del material en su proceso de moldeo. Descubrieron que la adición de copolímeros aleatorios puede aumentar la deformación a la rotura, y la adición de copolímeros en bloque da como resultado un aumento significativo en la resistencia al impacto. Los resultados y puntos de vista de la investigación de Austria son de suma importancia para definir la propiedad mecánica más importante a evaluar dentro de la investigación objeto de la tesis y poder emitir una recomendación basada en ello.

Siguiendo la línea de la investigación anterior de evaluación de uso de resinas plásticas vírgenes y recicladas, también se han realizados estudios para comparar propiedades mecánicas para procesos que no son solo moldeo por inyección. Un equipo de investigadores de Malasia en los primeros meses del 2023 (Radzuan et al, 2023) realizó una serie de pruebas para documentar el impacto de las cargas en las propiedades mecánicas de los filamentos de polímeros en procesos de impresión 3D. En este estudio también encontramos que lo que más se busca reforzar es la dureza del componente como propiedad mecánica final. Estos investigadores de Malasia hacen

énfasis en que esta propiedad es la más importante para la aplicación de un determinado componente.

A su vez, investigadores de Brasil, en los primeros meses de 2023 (Guerra et al, 2023) realizaron estudios para ver las propiedades mecánicas de dos compuestos comerciales diferentes (Durethan y Technyl) de poliamida-6 reforzados con un 30 % en peso de fibra de vidrio que fueron fabricados por inyección. Se probaron diferentes condiciones de hidratación y moldeamiento. Descubrieron que las composiciones se caracterizaron química y mecánicamente (tracción, flexión, impacto y dureza). Con los espectros infrarrojos verificaron que las estructuras químicas de los compuestos no fueron alteradas por las condiciones de hidratación ensayadas y no hubo efectos significativos en el grado de cristalización de las muestras evaluadas. Las pruebas de dureza e impacto evidenciaron que la mejor condición de hidratación fue una inmersión inmediata, seguida de 24 horas de inyección. Para la prueba de resistencia al impacto, el compuesto de Durethan fue un 27,84 % superior al de Technyl. El método de hidratación Wet Pack mostró un comportamiento similar con muestras que no fueron hidratadas, exhibiendo baja tenacidad y resistencia al impacto. Esto nos permite conocer procesos alternos para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales.

Es importante conocer los detalles técnicos de las composiciones que se evaluarán para emitir una recomendación con la herramienta de manera óptima y que las piezas puedan cumplir con el propósito con el que fueron diseñadas. Por lo tanto, si bien no se requerirá en primera instancia conocer la fórmula de la fabricación de las resinas, es importante evaluar las capacidades de las resinas sometidas a prueba para poder emitir recomendaciones de posibles aditivos que ayuden al comportamiento y funcionalidad del componente objeto de producción.

La tabla 11 destaca que la temperatura es el parámetro más recurrente, investigado en el 45% de los estudios sobre moldeo por inyección. Por otro lado, la dureza es la propiedad mecánica más estudiada, con un 41% de presencia en los trabajos. Otros parámetros como la presión de empaque y el tiempo de empaque se consideran en un 16% y un 13% de los estudios, respectivamente. La resistencia a la tracción y la viscosidad también se abordan, apareciendo en el 18% y el 9% de los estudios. Los datos reflejan un enfoque predominante en la temperatura y la dureza dentro de la investigación del moldeo por inyección. Esta información contribuye al cumplimiento de los objetivos específicos planteados con anterioridad, al conocer como los autores se están inclinando por determinados parámetros y en relación con determinada propiedad mecánica, siendo de gran utilidad en el modelado de la fase de experimentación y creación de la herramienta.

Tabla 11: Parámetros de moldeo y enfoque en la dureza como propiedad mecánica en la literatura.

Autor	Año	Parámetro y/o fase de proceso del moldeo de inyección identificada								Propiedades mecánicas estudiadas										
		45%	6%	6%	16%	13%	10%	3%	0%	100%	41%	9%	12%	18%	3%	9%	3%	3%	3%	100%
		Temperatura	Presión de inyección	Peso de inyección	Presión de empaque	Tiempo de empaque	Ciclo de tiempo	Velocidad de inyección	Molido de resinas	Total	Dureza	Viscosidad	Mod. de elastici.	Resist.a tracción	Elongacion	Cristalización	Tensión residual	Densidad	Ductilidad	Total
Traxler et al.	2023	1	1	1	1	1	1	0	0	6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3
Açıkbaş et al.	2022	1	0	0	1	1	0	0	0	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Zhou et al	2022	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Hu	2022	1	0	0	1	1	0	0	0	3	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Carrupt & Piedade	2021	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2
Garbacz et al.	2021	1	1	1	0	0	0	1	0	4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Rachid et al.	2020	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Alhallak et al.	2020	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Koffi et al.	2021	1	0	0	1	1	0	0	0	3	1	0	1	0	0	0	0	1	0	3
Mouhmid et al.	2006	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	4
Kondratiev et al	2022	1	0	0	1	0	1	0	0	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2
Krishnakumar	2023	1	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Radzuan et al	2023	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Guerra et al	2023	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	4
Total		14	2	2	5	4	3	1	0	31	14	3	4	6	1	3	1	1	1	34

Fuente: Elaboración propia.

Integrando los estudios presentados en las tablas 8, 9, 10 y 11, se observa que la temperatura surge como el parámetro de proceso más examinado en el campo del moldeo por inyección. Este enfoque en la temperatura se destaca por su papel crítico en la calidad y las propiedades finales del producto moldeado. Además, la dureza aparece como la propiedad mecánica más frecuentemente investigada, indicando su importancia en la evaluación de la calidad del material y del producto final.

La resistencia a la tracción y la viscosidad también se presentan como propiedades mecánicas de interés significativo, aunque en menor medida en comparación con la dureza. Estas tendencias, consistentemente observadas a través de las tablas 8 a 11, reflejan áreas de prioridad y de interés continuo dentro de la comunidad investigadora, subrayando los aspectos que son fundamentales en la optimización de los procesos de moldeo por inyección.

1.10 Importancia del cuidado del medio ambiente

Como se ha observado en las anteriores revisiones de la literatura en los apartados 2.7 y 2.9, varias investigaciones han centrado su recurso en indagar como algunos materiales plásticos se les agregan aditivos naturales para cambiar su comportamiento mecánico, se destaca la importancia del cuidado del medio ambiente desde 1980 se ha empezado a tomar conciencia sobre el uso de los plásticos (Cobián, 2012). En la actualidad es imperativo reducir la contaminación que se genera con esta industria, si

bien no se busca eliminar la industria si no la elección de materiales más amigables con el entorno en el que vivimos.

La investigación celebrada por la Fundación Heinrich Böll Stiftung de San Salvador (2019), la cual destaca el acuerdo climático que se celebró en París de 2015, con naciones aliadas de la ONU, para frenar el calentamiento global en 2026 muy por debajo de 2 °C. Para esto el objetivo es lograr reducir lo más posible las emisiones de dióxido de carbono, y para 2050 lograr cero emisiones de este gas en toda la región europea, sin duda es un gran reto al cual se está enfrentando la comunidad de la Unión Europea, que soporta los esfuerzos de la ONU y el mundo para lograr un planeta más limpio y sostenible.

En una reciente investigación realizada por Jones et al (2022), resalta que en la actualidad es posible realizar una sustitución eficaz de materiales plásticos convencionales por alternativos que tengan propiedades amigables con el medio ambiente mayores sin necesidad de invertir en nuevas tecnologías de infraestructura, el estudio se basa en la sustitución de múltiples resinas por otras que tienen aditivos biodegradables con las mismas propiedades mecánicas en la misma maquinaria, lo cual se tradujo en un beneficio mayor para el medio ambiente, a su vez se hicieron pruebas con plásticos reciclados y se demostró que las propiedades mecánicas en algunos casos no eran afectadas severamente y también se demostró que hasta un 49% tuvo un menor consumo de energía y 63% menos de emisiones de CO₂ (Dióxido de carbono). Emplear la metodología desarrollada para la herramienta propuesta extendiéndose a otros materiales, podría permitir un desarrollo más amplio y sencillo en la selección de materiales.

La selección de polímeros que sean más respetuosos con el medio ambiente, junto con prácticas de reciclaje, puede generar beneficios ambientales considerables en las industrias existentes. En el contexto actual y dentro del alcance de este estudio, implementar estos cambios podría generar un costo adicional mínimo, pero es esencial para lograr los objetivos de sostenibilidad global (Naciones Unidas, 2015). Esto, a su vez, contribuye significativamente a los objetivos de las Naciones Unidas, incluida la acción climática, el consumo y la producción responsables y la innovación industrial. Mientras las industrias de todo el mundo se esfuerzan por abordar estos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, esta investigación sirve como catalizador para tomar decisiones informadas y fomentar un panorama industrial más consciente del medio ambiente.

Al reconocer el papel fundamental de los consumidores en el mantenimiento de un entorno ecológico y sostenible, se vuelve imperativo analizar las opiniones de los consumidores sobre los productos ecológicos, especialmente porque los estilos de vida modernos exigen una vida útil más larga de los productos (Ansar Novera, 2019). Se enfatiza la urgencia de que la industria en general tome medidas más proactivas para abordar los efectos ambientales de sus productos, es por ello que se agrega al diseño de la herramienta una opción que permite analizar el impacto medio ambiental del consumo de las resinas plásticas de la experimentación.

Capítulo II: Marco teórico

En la mayoría de los casos al tratar de producir un componente plástico, se va a requerir del diseño de un molde para la parte o pieza a manufacturarse. Un molde se entiende como aquella estructura hueca con forma determinada, para el vaciado de alguna materia hasta lograr la solidificación de la forma del hueco (Rosato, 2000). Existen diversos tipos de moldes y aplicaciones, los cuales se explican más a detalle en este capítulo.

La elección correcta del tipo de molde en el cual se fabricarán las piezas, el tipo del material del que será formado, etc., es de gran importancia para el resultado final de las piezas manufacturadas y sus propiedades mecánicas, por lo que el diseñados de la pieza debe ser cuidadoso con su elección. Como se ha mencionado con anterioridad, el moldeo mediante inyección de plástico se emplea en diversas industrias, como la construcción, la electrónica, la aeroespacial, la automotriz, etc., por mencionar algunos ejemplos. El moldeo por inyección plástica no solo es un proceso efectivo en la manufactura de piezas con un alto grado de precisión, sino que también lo puede realizar en tiempos cortos en comparación con otros procesos (Agrawal et al, 2017). Al final del proceso de producción, los usuarios pueden tener piezas de plástico tan fuertes como el acero o muy blandas y flexibles, en tiempos que otros procesos y materiales requieren más tiempo en manufacturarse.

2.1 Etapas del proceso de moldeo por inyección plástica

Para el diseño de la herramienta, se han considerado 5 fases del proceso de moldeo, diseño, inyección, envasado, tiempo de curado o enfriamiento de los componentes, siendo la última la eyección, a continuación, se describen cada de una de ellas, y la importancia dentro del proceso.

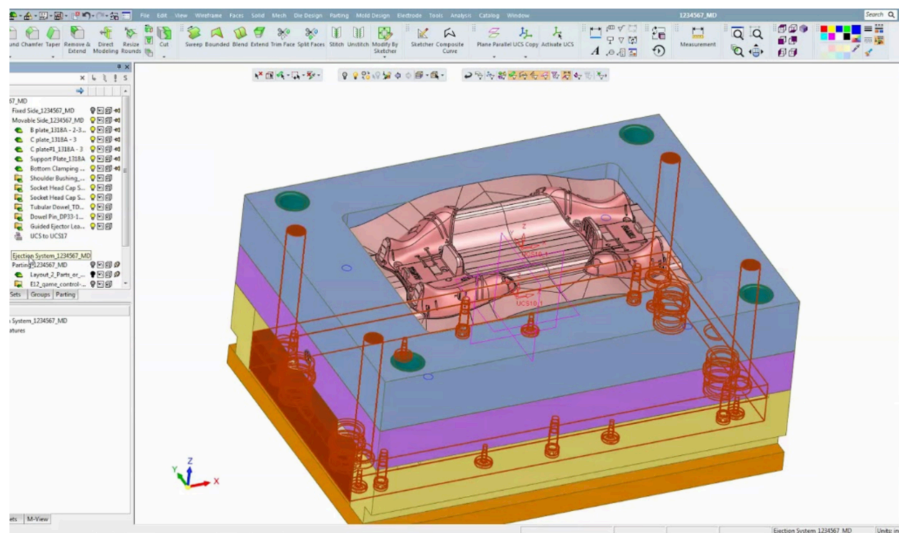
1. Diseño:

La organización mundial sin fines de lucro ABET, define el proceso del diseño como el proceso de desarrollar un sistema, componente o proceso que satisfaga los requisitos exigidos (ABET, 2018), dando orientación este concepto al moldeo de inyección, el diseño es el proceso cuyo objetivo es formar el componente deseado, con las propiedades mecánicas requeridas para su funcionalidad. Adicional ver el diseño del componente, la fase de diseño implica la manufacturabilidad del mismo, es decir el molde que se va a fabricar para replicar las partes en la calidad y cantidad deseada. Para esta parte del diseño, se conceptualiza un nuevo término dentro de esta fase del proceso: el “Diseño para Manufacturabilidad” o bien por sus siglas en inglés (DFM) “Design for manufacturability” (Kebrat et al, 2011). En la figura 7, se observa un ejemplo de cómo se visualiza un DFM en la industria en general.

El DFM tiene como propósito proporcionar información técnica sobre la manera en la que se va a construir el molde, y el modo en el que se introducirá el material deseado para la creación del componente, y finalmente de manera virtual el sistema de diseño

utilizado mediante la información suministrada prevé el acabado que tendrán las partes (Chu et al, 2016). Tenemos varios problemas que pueden surgir en la creación de componentes plásticos por moldeo de inyección, mismos que deben ser revisados a detalle, ya que pueden ser causa de rechazo de componentes en el futuro. La causa de rechazo será denominada como aquellas partes que no cumplen con la especificación de lo planteado ya sea en tema funcional o estético (Kent, 2016). Lo que esta investigación pretende lograr mediante su producto final, es predecir la probabilidad mediante estadística validada, la propiedad mecánica dureza y el parámetro adecuado de la manufactura de la parte en cuestión para obtener el resultado deseado, reduciendo el riesgo de problemas con las resinas por sus propiedades mecánicas entrando en función y el molde al poder conocer la temperatura que debe lograrse en la pieza.

Figura 7: Ejemplo de diseño de moldes asistido por computadora.

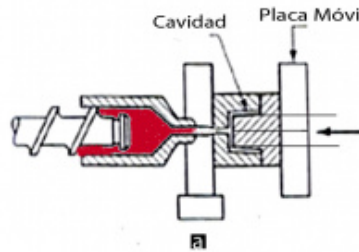


Fuente: Modern Machine Shop (2022).

2. Inyección

El proceso de inyección es el cual en donde se inyectan las resinas plásticas. El polímero se inyecta en el molde a través de una boquilla a presión y se mantiene una presión constante mientras la pieza se enfría hasta su forma final (Agrawal et al, 1987). Cuando termine el proceso, solo abre el molde y listo. Derretir el polímero antes de colocarlo en el molde requiere seguir un proceso complejo que debe estar perfectamente coordinado con la inyección para controlar con precisión la temperatura, el volumen y el tiempo. Por esta razón, si bien la inyección puede parecer un proceso simple porque es el más frecuente en la actualidad, toda la transformación requiere un control exhaustivo. La figura 8, detalla gráficamente como se elabora el proceso de inyección.

Figura 8: Proceso de inyección de plástico por moldeo (inyección).

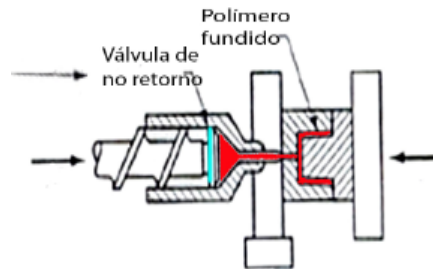


Fuente: Calderon (2009).

2. Empaque/ensado

En esta etapa, es la parte donde ambas placas del molde se presionan y mantienen por determinado tiempo, con el fin de nos garantice las dimensiones de la masa desasadas, esto va de la mano con la inyección puesto que para se garantice esta parte del proceso es necesario que se inyecte una correcta cantidad de resina (Ernst et al, 2003). De acuerdo con las investigaciones, revisadas en esta investigación, a esta parte del proceso se le atribuye la de mayor importancia para el acabado final de los componentes, tanto en requerimientos estéticos de calidad del producto como en sus dimensiones finales. La figura 9 representa como se elabora el proceso de empaque.

Figura 9: Proceso de empaque de plástico por moldeo (empaque).

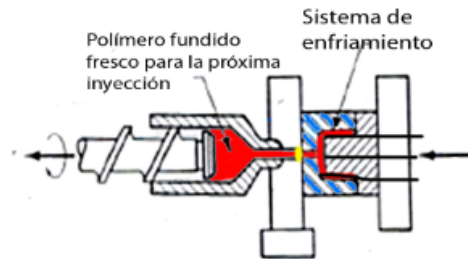


Fuente: Calderon (2009).

3. Enfriamiento/curado

Es la fase del proceso en donde el molde después de haber realizado la inyección y el empaquetado, se dejan reposar las piezas a fin de que tomen la dureza necesarias para poder ser desmoldadas, de esta etapa dependen futuras deformaciones, se le atribuye cerca del 80% del tiempo que toma manufacturar la parte (Carrupt & Piadder, 2021), puesto que el molde deberá bajar la temperatura a un ritmo adecuado y a una temperatura en específico para evitar futuras deformaciones o no cumpla con los requerimientos de calidad y de propiedades mecánicas necesarias para garantizar la aplicación y funcionamiento para el que fue diseñado el componente moldeado. La figura 10, pictográficamente representa como se lleva a cabo un proceso de enfriamiento.

Figura 10: Proceso de empaque de plástico por moldeo (enfriamiento).

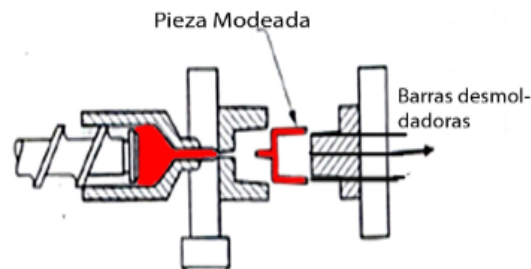


Fuente: Calderon (2009).

4. Eyección

Para finalizar el proceso de moldeo, se requiere de la eyección de la parte, también se le conoce como desmolde, en esta fase se debe calcular fuerza con la que será extraída la pieza de la cavidad y el punto donde se colocará la puerta de la eyección con el fin de no dañar la pieza que sea desmoldada en el caso de ser un molde automático (Bataineh & Klamecki, 2004). Esta fase es a la que menos se le considera para mejorar su proceso, ya que no han encontrado una relación significativa que afecte al proceso del moldeo por inyección plástica. La figura 11 muestra el proceso de eyección.

Figura 11: Proceso de empaque de plástico por moldeo (eyección).



Fuente: Calderon (2009).

2.2 Parámetros de moldeo

Con base a los resultados obtenidos, sobre las investigaciones realizadas en la sección del estado del arte, se identificaron los siguientes 6 parámetros influyentes en las propiedades mecánicas, destacando en mayor medida en las tablas 8, 9, 10 y 11 la temperatura de fusión, sin embargo, se detallan todas ellas a manera de conocer que son y su influencia en el proceso.

1. Ciclo de tiempo y respuesta de carga:

El tiempo total que se tarda en formar una inyección de plástico en el molde y obtener el producto terminado. Esto normalmente incluye el tiempo entre una inyección de plástico en el molde y el comienzo de la siguiente inyección de plástico (Cyframe, 2021).

El tiempo que se tome realizar este proceso podría ser el más importante al momento de hablar de temas rentables, puesto que una mayor eficacia en la producción equivale a una mayor rentabilidad.

2. Ciclo de enfriamiento:

Son los parámetros en los cuales, el molde se va a enfriar y el tiempo que le toma realizarlo a fin de poder desmoldar los componentes de manera eficaz, este proceso es el de mayor duración dentro del proceso del moldeo por inyección plástica, ya que varía en función del tamaño de las piezas y los canales de enfriamiento que se hayan construido (Carrupt & Piadder, 2021). En estos datos también se consideran los datos de temperatura de enfriamiento para lograr la solidificación de las piezas en el punto deseado en la cristalización oportuna del polímero.

3. Presión y tiempo de empaque:

Es el número expresado en valor de la presión ejercida entre las placas del molde, una vez completada la inyección del material, se mantiene la presión dentro del molde antes de que el material inyectado se solidifique, lo que impide la contracción de la pieza debido al enfriamiento. Esta presión se denomina presión de empaquetamiento o presión de retención y generalmente es más baja que la presión de inyección (Rios, 2009). Esta aplicación de presión se puede eliminar una vez que las piezas comienzan a fraguar. Su propósito es mantener el material fundido bajo presión mientras se solidifica y se contrae en la cavidad del molde. La función de esta presión es completar el llenado e introducir más material fundido en el molde para nivelar la contracción, el tiempo que ejerza la presión el molde, será una variable dentro de la presión misma.

4. Tiempo y presión de inyección

Es la presión sobre el plástico en lugar de la presión hidráulica, mediante la cual ejerce fuerza sobre el polímero hacia los canales, las compuertas, las compuertas y las cavidades del molde (Bozzelli, 2017). Este nivel de presión sobre el material debe reproducirse al pasar de una máquina a otra utilizando el mismo molde también se debe considerar el tiempo que ejercerá esta presión a fin de completar su proceso moldeo.

5. Temperatura de fusión

Se denomina temperatura de fusión en términos de moldeo por inyección plástica, aquella temperatura requerida para que el material inyectado, sea capaz de pasar de un estado sólido, a uno viscoso mediante la aplicación de calor (Metler, 2018). Esta temperatura debe mantenerse constante en diversos puntos de la inyección del material para que pueda ser inyectado de manera correcta cubriendo todos los espacios dentro de la cavidad del molde. Es por lo que la temperatura de fusión tiene un rol de importancia dentro del proceso y debe controlarse minuciosamente, puesto que cualquier alteración tendrá repercusiones positivas o negativas sobre la forma, color y propiedades mecánicas finales del componente plástico. En la tabla 12, se puede observar algunos

ejemplos de temperatura de fusión de algunos polímeros, es de importancia mencionar que, aunque su fusión se encuentre a determinada temperatura, no significa que sea capaz de llenar la cavidad de todos los moldes en los que es probado.

Tabla 12: Temperaturas de fusión de polímeros.

Polímero	Tf (°C)	Tv (°C)
Poliétileno de Baja Densidad	115	-120
Poliétileno de Alta Densidad	137	-120
Cloruro de polivinilo	175-212	87
Polipropileno	168-176	-16
Poli estireno	240	85-125
Poliacrilonitrilo	320	107
Teflón	327	
Policlorotrifluoroetileno	220	
Acrílico		90-105
ABS		88-125
Polímeros por Condensación		
Acetal	181	-85
6.6 Nylon	265	50
Acetato de celulosa	230	
Policarbonato	230	145
Poliéster	235	75
Elastómeros		
Silicón		-123
Poli butadieno	120	-90
Poli cloropreno	80	-50
Poli-sopreno	30	-73

Fuente: Montañez et al (2020).

6. Temperatura del molde

La temperatura del molde o temperatura de la cavidad es el punto caliente o frío del molde durante el ciclo (Lerma, 2018). En este factor, lo determinante radica en el tiempo de ciclo y la calidad estructural de la pieza moldeada por inyección, por lo tanto, de las propiedades mecánicas finales obtenidas después del proceso de moldeo por inyección.

2.3 Las resinas y sus propiedades mecánicas con relación al molde de inyección

Partiendo de que es necesario primero conocer cuál será la materia prima que se utilizará para la producción de piezas plásticas en un molde, se requiere conocer y entender los aspectos que se incluyen dentro de una ficha técnica. Una ficha técnica es un documento en forma de sumario que contiene la descripción de las características de

un objeto, material, proceso o programa de manera detallada (Atehortua, 2003), esta información es de gran valor, ya que su aporte es en cuestión a sustitutos y selección de tipo de acero con el cual se fabricará el molde y el tipo de colada que este tendrá ya sea fría o caliente (Janostik et al, 2016). El tipo de colada es influyente para el ciclo de tiempo y la reducción de desperdicios dentro del proceso del moldeo por inyección plástica, una colada fría genera desperdicio en los correderos del molde, lo cual ocasiona un desperdicio mayor, mientras que el caliente permite mantener la resina en su punto de temperatura de fusión permitiendo seguir usándola después de cada ciclo.

Algunos conceptos clave para entender estas propiedades específicas y su interacción con el acero del molde son las propiedades de la densidad que se mide en kg/m^3 , es importante conocerla en su aspecto relativo y aparente, la densidad relativa se define como la relación entre las masas de un volumen determinado de material y de un volumen equivalente de agua a 23 grados centígrados, la densidad del agua es 1 g/cm^3 (Sismo et al, 2003). El resultado es dimensional, es decir, sin unidades mientras que la aparente nos permite conocer el cociente entre la masa de un determinado material sólido (ya sea granulado, polvo, espumado) por unidad de volumen. Es decir, cuanto ocupará dicho material considerando el volumen real debido a su morfología.

La tasa de volumen que se mide en cm^3/min , es importante conocerla ya que nos dará visibilidad de cuanto cambia de acuerdo a los iones cargados en ella y cuál es su capacidad de hincharse en base a los otros parámetros recomendados por la misma (Ghourchian, 2018). Adicional a esto el tiempo de secado de la resina recomendado nos dará información sobre cuánto tiempo hay que esperar entre cada una de las coladas para mantener el acabado buscado (Axalta, 2018). Conocer cuál es el acabado que se necesita es de importancia cuando este puede ser causa de rechaza y también influye en los parámetros, por esto mismo la herramienta propuesta solo refleja su resultado en función de sus parámetros y propiedades mecánicas, no en su acabado estético.

Los parámetros de temperatura en la inyección recomendados por el fabricante de la resina, nos indican a que temperatura deben llegar los inyectores de la resina (Kashyao & Datta, 2015) van de la mano con los ajustes de las máquinas recomendados para la corrida, estos deberán ser empatados con el tipo de acero que se busca manufacturar el molde, porque la conductividad térmica debe dar estos parámetros sin que requiera de un esfuerzo adicional, estas recomendaciones del fabricante de la resina, las realiza para que esta fluya de la mejor manera, ya que los materiales se dilatan al calor y se contraen al frío, esto hace que se afecte el diseño dimensionalmente (Luo et al, 2001).

Los valores de contracción del molde son de suma importancia ya que como se ha expresado en los materiales sufren una dilatación al calentarse y una contracción al enfriarse (Mariano, 2011), por lo que será útil conocer este índice para la confección de moldes de inyección o boquillas de extrusión, puesto que deberán ser de mayor tamaño que el de la pieza que se desea obtener para que la misma se adapte al requerimiento de dimensiones requeridos al solidificarse y enfriarse.

2.4 Tipos de plásticos: Termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Es de importancia entender la relación que tienen las propiedades mecánicas que se obtienen finales con los parámetros asignados dentro del proceso de moldeo inyección, pero este factor no solo es importante, si no la naturaleza misma de cada material, existen 3 tipos de polímeros actualmente que cada uno tiene variables, se les puede llamar grupos o familias de materiales, los termoplásticos, los termoestables y los elastómeros. A continuación, se explican a detalle.

1. **Polímeros termoplásticos:** Como se mencionó con anterioridad pertenecen a una familia de polímeros, los cuales son conocidos por su capacidad de ser altamente flexibles en temperaturas elevadas, sus propiedades de deformación le permiten tener diversas aplicaciones (Romero, 2013). En la tabla 13 nos habla de aplicaciones comunes de ciertos tipos de resinas plásticas termoplásticas.

Tabla 13: Ejemplos de aplicaciones y familias de termoplásticos.

Resinas	Aplicaciones comunes
Polietileno – PE	Vasijas, revestimientos de latas, botes, envases, bolsas, accesorios de seguridad, como chalecos antibalas, y en el aislamiento de alambres y cables para el sector de la energía y las telecomunicaciones.
Polipropileno – PP	Jeringas, envases industriales, electrónicos, juguetes y automóviles
Poli estireno – PS	Electrodomésticos, piezas de automóviles, juguetes y envases de alimentos.
Policloruro de Vinilo – PVC	Tuberías, fabricación de juguetes, embalajes y calzados, o en la construcción civil.
Polietileno Tereftalato – PET	Botellas de plástico, tarros, vasos, tupper y bandejas.
Etilvinilacetato – EVA	Suelas de zapatos, calzado (sandalias de uso diario o de baño), juguetes, adhesivos termofusibles (coloquialmente conocidos como silicona caliente), colchonetas, artículos para el hogar, jardines de infantes

Fuente: Elaboración propia en base a información obtenida de Romero (2013).

2. **Polímeros termoestables:** Estos plásticos, tienen una peculiaridad de que solo tienen la capacidad de moldearse una sola vez (Groover et al, 2014). Es difícil su reciclaje puesto que una vez se forman con el calor, se endurecen siendo capaz de soportar altas temperaturas, siendo perfectos para algunas aplicaciones, pero siendo también un problema para el medio ambiente, al ser difícilmente reciclados. En la tabla 14 nos habla de aplicaciones comunes de ciertos tipos de resinas plásticas termoestables.

Tabla 14: Ejemplos de aplicaciones y familias de termoestables.

Resinas	Aplicaciones comunes
Poliuretano (PUR)	Aislamientos, protector de columnas de construcción, colchones, revestimientos, adhesivos, neumáticos, piezas de coches, ropa deportiva, suelas de zapatos
Formaldehído de fenol	Adhesivo en producción de contrachapado para exteriores (clase III), como aglutinante de aislantes (minerales, vidrio), en industria de fundición, abrasivos, refractarios, espumas fenólicas (floral y sustratos de cultivo), e impregnación de papel.
Poliéster (UP)	Piezas para coches, ropa, mallas de protección de alimentos, recubrimientos industriales.
Epoxi	Como uniones, adhesivos y recubrimientos, como polvos para moldeados e instrumentación, como fondos, pavimentos y agregados, como plásticos reforzados o compuestos (laminados eléctricos y filamentos)

Fuente: Elaboración propia en base a información obtenida de Groover et al (2014)

3. **Polímeros Elastómeros:** A diferencia de los otros grupos de familias de polímeros que hemos analizado, estos tienen la peculiaridad de encontrarse prácticamente en el medio de los últimos 2 grupos analizados, son una combinación del polímero tradicional con una goma son materiales que tienen propiedades intermedias entre los plásticos y las gomas (Groover et al, 2014). Son materiales que tienen una gran elasticidad y una alta capacidad de deformación. La tabla 15, menciona aplicaciones comunes de este tipo de resinas plástica.

Tabla 15: Ejemplos de aplicaciones y familias de elastómeros.

Resinas	Aplicaciones comunes
Nitrilo	Aislamientos, protector de columnas de construcción, colchones, revestimientos, adhesivos, neumáticos, piezas de coches, ropa deportiva, suelas de zapatos, perfiles, juntas estanqueidad, juntas planas, topes, rodillos
Silicona	
Poliuretano (PUR)	
Neopreno	
Caucho	

Fuente: Elaboración propia en base a información obtenida de Groover et al (2014)

2.5 Morfología de los plásticos

A lo largo de la extensión del presente documento, se ha referido que los plásticos son una sustancia química que no se encuentra de manera natural en nuestro planeta, se les denomina “polímeros” debido a que se conforma de una estructura macromolecular la cual puede ser moldeada mediante la presencia de temperatura elevada o bien en todo caso debe ser la temperatura de fusión de cada tipo material, pero también puede ser moldeada con presión, este material se compone principalmente de carbono. Ahora bien, la morfología que los polímeros tengan, esto refiere a su forma en la que se organizan estas en sus diferentes estados (Hinojosa, 2020). Es de importancia que, dentro de las clasificaciones, existen dos categorías que pueden aplicar a este material, la primera es polímeros cristalinos que hacen referencia a una cadena polimérica ordenada y estructurada o bien, la segunda categoría es polímeros amorfos, que es lo opuesto a la primera, estos últimos su estructura se conforma como desordenada.

Esta sustancia química, es sumamente compleja en contraste con otras puesto que además de su morfología y categoría, también pueden tener uniones sus monómeros los cuales generan la secuencia de la morfología, logrando tener una forma homo-polimérica o co-polimérica, el primero hace referencia a monómeros totalmente iguales, mientras que el segundo consiste en dos o más unidades monoméricas diferentes, en la actualidad se conocen 4 tipos de combinaciones de estas últimas (Méndez, 2010). Entender la morfología de los plásticos que se analizan en la herramienta propuesta, añade un valor imprescindible para el desarrollo de la misma, puesto que dependiendo de las formas moleculares que corresponden a la morfología de cada plástico, también cambian sus propiedades mecánicas, la solidificación de la proliferación es diferente en cada morfología.

3.6 Polimerización

Entendiendo lo que la morfología de los polímeros repercute en las piezas plásticas, destaca el concepto clave de “polimerización”, esta es la reacción química que sufren los polímeros ante la presencia del peso molecular de los monómeros, para generar estos enlaces que al final terminan dando la morfología final que tendrá la resina plástica. Esta formación en la polimerización puede darse de diversas maneras, teniendo como principales exponentes la polimerización aditiva y la polimerización por condensación, la primera hace referencia a aquellas que realizan enlaces dobles entre los átomos de carbono, mientras que la segunda se da cuando los monómeros contienen grupos funcionales que pueden reaccionar entre sí para formar un enlace covalente y liberar una molécula pequeña como agua (Groover et al, 2014). El primer tipo de polimerización se puede subclasificar en dos, una siendo de crecimiento en cadena (policondensación y poli-adición) y la otra en crecimiento por etapas.

Partiendo de estos dos conceptos claves analizados (morfología y polimerización), es como entendemos como los polímeros adoptan diferentes formas y como es que la humanidad ha logrado realizar combinaciones de relevancia para diseños complejos,

entender estos conceptos brinda la base para la formación de nuevos materiales y como es que se agregan aditivos a las resinas.

2.7 Cristalización de polímeros y la influencia de la temperatura

Una vez explicado cómo se conforma un polímero en la actualidad, en la práctica del moldeo por inyección plástica, el cual se realiza ante la presencia de temperaturas elevadas, llevando las resinas plásticas a la temperatura de fusión, en el ejercicio de la presión del molde, los polímeros dependiendo de su morfología y la forma en la que la polimerización ejecuto su unión, comienza el proceso químico de la cristalización de los mismos, es cuando toman la forma uniforme necesaria para la creación de piezas plásticas, ante la presencia de temperaturas más elevadas, la velocidad de cristalización es mayor y se forman más cristales, a temperaturas más bajas, la velocidad de cristalización es menor y se forman menos cristales, pero también influye la velocidad del enfriamiento de la pieza, un enfriamiento lento permite que la resina plástica pueda organizarse en su cristalización de manera más ordenada y por ende con mayor uniformidad (Rosa & Auriemma, 2022). La cristalización de los polímeros puede mejorar sus propiedades mecánicas, como la resistencia y la rigidez a medida que aumenta el grado de cristalinidad, aumenta la resistencia del polímero, sin embargo, la cristalización también puede afectar negativamente las propiedades ópticas y eléctricas de los polímeros, así como los tiempos en los que se ejecuten pueden llevar al material a un punto de carbonización perdiendo significativamente todas sus propiedades mecánicas.

2.8 Dureza de los polímeros

Siguiendo con la corriente del análisis de las propiedades mecánicas de los plásticos, como se analizó en el capítulo anterior del estado del arte, múltiples autores destacaron algunas de ellas en sus estudios en lo siguiente se pretender describir que es cada una de ellas, iniciando con la propiedad mecánica predilecta con mayor aplicación de estudio, la dureza.

Para efectos de la presente investigación se ha considerado la dureza, como la capacidad que posee un plástico de resistir la comprensión, golpes y fuerzas externas que puedan generar abolladuras, así mismo, algunos autores la describen como la propiedad mecánica que tiene la resiste a la penetración, arañazos, desgaste, etc. (G.G., 2014). Esta propiedad mecánica como puede observarse por su concepto se encuentra presente en todos los materiales, en menor o mayor escala, es por ello que es lógico pensar que esta propiedad mecánica sea tan importante, sirve como un parámetro rápido de análisis de calidad de la pieza al controlar la dureza, se puede prever su resistencia estructural, usualmente la rama de la ingeniería que estudia la calidad de las piezas plásticas, emplea el uso de un durómetro de aplicación directa en la superficie de la pieza con punta, regularmente se opera con los estándares de medición de dureza de la ISO 48:4-2018, más adelante se detallará esta norma, debido a su relevancia para la operación correcta de la herramienta propuesta.

2.9 Resistencia térmica y a la tracción de los polímeros

Continuando con el análisis de las propiedades mecánicas, los polímeros pueden llegar a poseer resistencia térmica y resistencia a la tracción, algunos tipos de familias de polímeros como se analizó en las tablas 13 a la 15 poseen estas propiedades de manera intrínseca y destacan entre las demás sin necesidad de aditivos para mejorar su comportamiento o “performance” por su referencia en inglés.

La resistencia térmica como su nombre lo dice, es la capacidad que posee un polímero de poder soportar altas o bajas temperaturas sin llegar a sufrir cambios significativos en su estética y funcionamiento (Groover et al, 2014). La familia de los polímeros termoestables destaca con esta propiedad debido que debido a su morfología, polimerización y forma en la que cristaliza permite que de manera natural pueda obtener esta propiedad.

Por otro lado, la resistencia a la tracción refiere aquella propiedad mecánica que poseen los polímeros de resistir la fuerza de elongación (tracción) sin romperse (G.G., 2014). Esto comúnmente puede llegar a confundirse con la dureza, pero lo que la diferencia de esta misma es la aplicación de la fuerza para tener una mayor longitud, pero por supuesto, está estrechamente ligada con la dureza del material.

A lo largo de la presente investigación se identifica el impacto de la temperatura sobre las resinas plásticas, de ahí es que estas propiedades pueden estar estrechamente ligadas, comúnmente se acepta que los plásticos que tienen una alta resistencia térmica también poseen una alta resistencia a la tracción pero esto no es en todos los casos y es por ello que cada propiedad mecánica se analiza de manera independiente, mientras que la primera se analiza por la temperatura de su transición vítrea o transición de vítreo a gomoso (T_g), nos indica la temperatura máxima que podrá soportar el material analizado, y la otra se evalúa en la unidad de medida de fuerza antes de romperse (S, 2014), debido a las múltiples aplicaciones que pueden tener los plásticos, es de relevancia estas propiedades en los materiales y los diseñadores deben tomarlas en cuenta para la correcta ejecución de su diseño y apoye a la funcionalidad para lo cual fue creado.

2.10 Ductilidad de los plásticos

Una vez revisado la resistencia a la tracción, una propiedad mecánica que usualmente estar conectada con esta, es la ductilidad, la cual es la capacidad de los plásticos de deformarse ante la fuerza de tracción, pero aun con esta fuerza no lograr romperse, solo presentar deformaciones pero aun continuando con la funcionalidad deseada, ejemplos comunes de la ductilidad con otros materiales, es con los metales que pueden presentar abolladuras y aun así tener la misma resistencia estructural para lo cual fueron diseñados en su aplicación, esta propiedad también se le conoce como elasticidad o plasticidad (S, 2014). Ciertos polímeros tienen esta propiedad mecánica de manera natural, un ejemplo claro puede ser el fomi o goma monomérica. Medir esta propiedad en los polímeros en ciertos casos dependiendo de su aplicación puede resultar crítica, puesto que se analiza

el performance de la pieza plástica a diversos factores a los que puede someterse durante su vida útil como carga, temperatura y ambiente, de aquí mismo radica la importancia de una correcta elección del material acorde con su aplicación.

2.11 Tensión residual de los polímeros

Como se ha observado las propiedades mecánicas que se estudien, son acorde a la aplicación deseada de la pieza moldeada, pero dentro de este espectro de propiedades mecánicas que pueden llegar a poseer los plásticos en mayor o menor medida, también se destaca la importancia de medir su tensión residual, la cual hace referencia al estado del material una vez se elimina la fuerza o energía que pudo haberlo deformado, se relaciona ampliamente con otras propiedades mecánicas analizadas, pero está en especial mide el estado en el que se encuentra la pieza después de diversos factores que pueden afectarla (Groover et al, 2014). La importancia de esta propiedad mecánica radica también en evaluar el proceso de fabricación, puesto que puede indicar mucho su resistencia residual sobre su estabilidad del moldeo, ante la posible presencia de otros factores que dañen estructuralmente la pieza y no sea perceptibles al ojo humano, es por ello que los materiales con una baja tensión residual son predilectos para aplicaciones exigentes con su precisión dimensionales durante y después del ejercicio de fuerza o energía que pueda deformarlo y por supuesto su dureza para poder calcular cuando presentará agrietamiento.

2.12 Elongación de las resinas plásticas

Una vez revisadas algunas de las propiedades mecánicas que pueden poseer los polímeros, a continuación, se describen algunos conceptos conectados directamente con estas propiedades, los cuales son de relevancia su conocimiento para la creación de la herramienta propuesta. Comenzando por el termino de “elongación”, está estrechamente ligado con las propiedades de resistencia a la tracción, puesto que es la capacidad de los polímeros cuando se somete a la fuerza de tracción, si bien podrían parecer que son iguales, no es así, pues una mide la fuerza (resistencia a la tracción) y la otra es la medida de deformación (elongación), esta última suele interpretarse de manera porcentual (James, 2015). Conocer estos dos datos al momento de diseñar o bien controlar el comportamiento del producto diseñado resulta importante para una mejor selección de materiales y el conocimiento de la manera en la que trabajara el material en distintos ambientes.

2.13 Densidad de los polímeros

Otro concepto relevante en la investigación es el de la densidad de los polímeros, por sí mismo, la densidad es la forma de medir la masa del material, en este caso serían las resinas plásticas, por unidad de volumen, usualmente es aceptado que se exprese en gramos por centímetro cubico (g/cm^3), de acuerdo con James (2015), la densidad de los materiales está estrechamente ligada con su comportamiento mecánico y por ende con todas sus propiedades relacionadas a este término. Conocer y medir la densidad de los

materiales permite conocer el peso de las piezas para calcular el llenado del molde y el costo que tendrá en el mercado por esta misma unidad de medida, para el desarrollo de la herramienta de esta investigación, conocer esta información permitió crear las bases sobre la calibración medio ambiental de la herramienta.

2.14 Módulo de la elasticidad

Para finalizar con la relación de conceptos ligados a las propiedades mecánicas analizados en el estado del arte, se tiene el concepto de módulo de elasticidad o coeficiente de elasticidad, el cual brinda el resultado numérico usualmente en unidad de medida de megapascales (MPa) o kilopondios por centímetro cuadrado (kp/cm²), ya que mide la relación entre la tensión y la deformación ante una fuerza externa, midiendo desde manera inicial la rigidez del material (Groover et al, 2014). Aunque guarda similitudes con los conceptos de elongación y resistencia a la tracción, difieren en lo que pretenden indicar cada uno de ellos, a manera de recapitulación, la elongación y la resistencia a la tracción buscan dar a conocer la capacidad de deformación de los materiales, mientras que el módulo de elasticidad o modulo Young, indica el estado de rigidez que posee el material ante las fuerzas de tracción externas.

2.15 Defectos de calidad de los componentes plásticos

A lo largo de la presente investigación se ha mencionado el término de “defectos de calidad”, ahora bien, esta palabra hace referencia en términos de moldeo por inyección plástica de acuerdo con Solanki (2018), a una protuberancia, imperfección o falla que ocasione que la pieza que fue moldeada no cumpla con los requisitos empleados por el diseñador en su estética o bien en su funcionamientos, en la figura 12, se pueden observar algunos ejemplos más comunes de estos defectos y posibles causas:

Figura 12: Defectos de calidad y posibles causas.

Hendiduras: Son grietas o fisuras en la superficie o el interior de la pieza que se producen por tensiones internas o externas. Estos defectos afectan a la resistencia y a la durabilidad de la pieza.

Líneas de flujo: Son marcas o estrías en la superficie de la pieza que se producen por el flujo del plástico en el molde. Estos defectos afectan a la estética y a la uniformidad de color de la pieza.

Quemaduras: Son manchas o decoloraciones en la superficie de la pieza que se producen por el sobrecalentamiento del plástico o por el atrapamiento de aire o gas en el molde. Estos defectos afectan a la estética y a las propiedades químicas de la pieza.

Rayones: Son marcas o arañazos en la superficie de la pieza que se producen por el contacto con herramientas, moldes u otras piezas. Estos defectos afectan a la estética y al acabado de la pieza.

Deformaciones: Son cambios en la forma o el tamaño de la pieza que se producen por una distribución desigual del plástico o por tensiones residuales. Estos defectos afectan a la precisión dimensional y al ajuste con otras piezas.

Tomas cortas: Son áreas incompletas o faltantes en la pieza que se producen cuando el plástico no llena completamente el molde. Estos defectos afectan al funcionamiento y a la resistencia de la pieza.

Destellos: Son rebabas o excesos de plástico en los bordes de la pieza que se producen cuando el plástico se escapa del molde. Estos defectos afectan a la estética y al ajuste con otras piezas.

Slugs fríos: Son áreas desiguales en la pieza que se producen cuando el plástico no se calienta adecuadamente, lo que hace que se adhiera a la parte moldeada. Estos defectos afectan a la estética y a la precisión dimensional de la pieza.

Burbujas o ampollas: Son elevaciones en la superficie de la pieza que se producen cuando el plástico está expuesto a demasiado calor o no se enfría lo suficiente. Estos defectos afectan a la estética y a la resistencia de la pieza.

Marcas de hundimiento: Son depresiones en la superficie de la pieza que se producen cuando el plástico se contrae al enfriarse. Estos defectos afectan a la estética y a la rigidez de la pieza.

Fuente: Elaboración propia con apoyo de asistente de Microsoft e información obtenida de Solanki (2018).

2.16 Instrumentos de medición de propiedades mecánicas

En tanto los defectos de calidad deben de cuidarse y priorizar su minimización, así también debe de cuidarse el comportamiento que tengan los materiales con las propiedades mecánicas deseadas, si bien los defectos de calidad en muchas ocasiones podrán ser observados al ojo humano, las se debe realizar mediciones para verificar el cumplimiento de propiedades solicitadas o indicadas en el diseño del producto. En la tabla 16 se muestran ejemplos de instrumentos y unidades de medida para algunas propiedades de los plásticos aceptadas comúnmente:

Tabla 16: Propiedades mecánicas e instrumentos de medición con unidad de medida más común.

Propiedad	Instrumento	Unidad de medida
Módulo de elasticidad	Dinamómetro	MPa o kp/cm ²
Densidad	Balanza hidrostática	g/cm ³ o kg/m ³
Elongación	Extensómetro	%
Tensión residual	Espectroscopio de infrarrojo	MPa
Ductilidad	Máquina de tracción	%
Resistencia térmica	Termogravimétrico o termomecánico	°C o J/g
Resistencia a la tracción	Máquina de tracción	MPa o kp/cm ²
Dureza	Durómetro Shore o Rockwell	Escala Shore o Rockwell
Cristalización	Calorímetro diferencial de barrido o espectroscopio de infrarrojo	°C o %

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Medrano (2017).

2.17 Norma ISO 48-4:2018: Medición de dureza de polímeros

Una vez hablado sobre la instrumentación para la evaluación de las propiedades mecánicas de los plásticos, existen múltiples normas que regulan como deben de medirse para que sean aceptadas de manera estándar y de manera global, para

efectos de la presente investigación, donde la dureza es la propiedad mecánica estudiada y a la cual hace referencia el estado del arte con mayor relevancia, es la dureza. Para lo cual la Organización Internacional de Estandarización (2018), actualizó la norma ISO 48-4:2018, la cual hace referencia a como evaluar la dureza de los materiales polímeros, establece los criterios que deben permanecer para poder ser aceptados por las normativas internacionales. Esta norma establece que las piezas plásticas cuando menos deberán tener al menos un grosor de 2 mm y utilizar un durómetro de escala Shore D para materiales base PA66, sin mencionar dimensiones adicionales y poder considerarse confiables. Es por lo que las piezas a evaluar para la etapa de experimentación de la herramienta cumplen con estos criterios para su evaluación al realizarse en moldes que permitieran la manufactura de piezas plásticas de un grosor mayor a 2 mm.

2.18 Métodos matemáticos para controlar los parámetros de moldeo:

En lo siguiente se presenta de manera informativa en qué consisten los Métodos matemáticos empleados por los autores analizados en la sección del estado del arte: análisis de varianza (ANOVA), plan de diseño de experimentos y el método Taguchi, comprender cada una de ellas resultó clave para seleccionar aquella que tuviera una mayor significancia con la creación de la herramienta propuesta.

1. Análisis de Varianza (ANOVA):

El método matemático/estadístico de análisis de varianza (ANOVA), es comúnmente utilizada para realizar la comparación entre la varianza entre las medias de diferentes conjuntos de datos, las aplicaciones resultar ser variadas y tratan de comprobar estadísticamente si estos conjuntos de datos tienen una relación significativa o no la tienen.

El ANOVA, ofrece como producto final su resultado como “Estadístico F”, que este dato debe compararse entre sí para rechazar la relación o la no la relación entre las variables y los datos analizados, a esto se le conoce como comprobación de la hipótesis nula (H_0) o bien el rechazo de la hipótesis alternativa (F_1), cuando hay una diferencia significativa entre ambas, este dato quedará a criterio del usuario y el nivel de significancia que se le asigne (Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001).

Para la utilización de ANOVA, es necesario conocer los siguientes término para una aplicación correcta.

- Variable dependiente: este es el elemento que se está midiendo y que se teoriza como afectado por las variables independientes.
- Variable(s) independiente(s): estos son los elementos que se están midiendo y que pueden tener un efecto sobre la variable dependiente.
- Una hipótesis nula (H_0): Generalmente es aceptado, que la hipótesis nula se aquella que indique no existe relación entre los datos analizados, por lo que

un resultado de hipótesis alternativa (F_1) sea mayor al de la hipótesis nula (F_0) llevará al rechazo de esta última.

- Una hipótesis alternativa (H_1): Cuando se teoriza que existe una diferencia entre los grupos y las medias.
- Factores y niveles: En la terminología ANOVA, una variable independiente se denomina factor que afecta a la variable dependiente. El nivel denota los diferentes valores de la variable independiente que se utilizan en un experimento.
- Modelo de factor fijo: algunos experimentos utilizan solo un conjunto discreto de niveles para los factores. Por ejemplo, una prueba de factor fijo evaluaría tres dosis diferentes de un medicamento y no buscaría ninguna otra dosis.
- Modelo de factor aleatorio: Para la realización de este modelo, se debe extraer un valor aleatorio de todo el conjunto de datos que se tengan de la variable independiente.

2. Plan de Diseño de Experimentos (DOE):

De acuerdo a la Sociedad de Calidad de América (2017), el diseño de experimentos (DOE) es una técnica matemática/estadística empleado en estadística aplicada para evaluar las múltiples alternativas disponibles en una o más variables de diseño. Su objetivo es manipular los factores de entrada para determinar su efecto y así obtener el resultado deseado o mejorar el resultado.

Se deben cumplir criterios básicos para poder desarrollar un DOE de manera adecuada y con significancia dentro del experimento de lo que se quiera analizar o probar, estos criterios en su mayoría son seleccionados por el investigador, pero deben de cumplir con lo siguiente:

- **Variabilidad controlada:** El diseño en concreto deberá controlar la variable o variables independientes asignadas para ver su efecto sobre la variable dependiente asignada, en todos los casos una no puede contraponerse con la otra, es decir, el experimento no tendría consistencia si no permite evaluar el efecto de las variables independientes.
- **Réplicas adecuadas:** Dependiendo del experimento se deberán contener al menos 3 datos de cada grupo de datos estudiado, pero entre más datos se obtengan de manera replicada bajo las mismas condiciones, es mayor fiabilidad la experimentación, sin que sea una regla general, pero si una corriente aceptada.
- **Aleatorización:** El orden en el que se realizan los experimentos, debe ser de manera aleatoria para poder eliminar factores externos que afecten el resultado del diseño, sin embargo, esto no es una contraindicación para que sea realizado en un ambiente controlado.
- **Bloqueo de variables:** Es de suma importancia la inclusión del bloqueo dentro del experimento, esto se refiere cuando existen otras variables independientes que no sean requeridas analizar para la variable

dependiente, deberán de mantenerse bloqueadas para no afectar el resultado del experimento o ampliar el espectro del experimento realizado.

- **Replicabilidad:** Por supuesto, como toda metodología y experimentación científica, deberá ser posible replicada en otro momento por diferentes usuarios y localizaciones.

3. Método Taguchi

El método Taguchi, no tiene sus raíces tan antiguas como otros modelos matemáticos de diseño de experimentos, fue creado por el ingeniero japonés Gen'ichi Taguchi, esta herramienta se genera en respuesta a lo complicado que en ocasiones es realizar un DOE de manera completa y detallada que algunos experimentos no requieren por su posible simplicidad (Wu & Wu, 1997), pero es igual de importante comprobarlo. De acuerdo con Hernández et al (2015) esta herramienta en general es para mejorar la calidad de los productos y sus procesos, por lo que no es raro encontrarla como una herramienta utilizada en la optimización de parámetros de moldeo de inyección.

Partiendo desde su objetivo de apoyo y la reducción de números de pruebas necesarias, siempre busca minimizar la variabilidad y maximizar la calidad, aun cuando no haya una clara referencia sobre los factores que puedan influir en el diseño, a través de la creación de matrices ortogonales, las cuales permiten reducir el número de replicas al no tener que probar todas las combinaciones posibles con los factores que se desenvuelven, con estas matrices se permite recabar datos esenciales con un menor costo de recursos.

Este método no solo innovó en el campo de requerir un menor número de experimentos, sino que también propone una nueva forma de ver la calidad, no de una manera rígida, si no como un concepto que se pierde de manera gradual, donde la pérdida de calidad deseada es 0, siendo esta la óptima para un producto.

Una vez realizados los experimentos y la calibración con la calidad, Taguchi mediante un análisis estadístico permite identificar los factores más influyentes, sin embargo, este método es sensible a otras variaciones o factores que pudieran resultar de importancia en el experimento.

2.19 Importancia del sector metalmecánico en el mundo

Como se ha mencionado, la herramienta y el contexto del planteamiento del problema toma al sector metalmecánico, sin embargo, no es un limitante para su réplica en otros sectores, ya que representa una piedra angular en la estructura económica global, desempeñando un papel estratégico en diversas industrias y contribuyendo significativamente al desarrollo industrial. A continuación, se presenta una perspectiva detallada de la importancia de este sector en 5 categorías de acuerdo con Schmid (2003):

1. Contribución a la manufactura de equipos industriales:

- El sector metalmecánico es la columna vertebral de la manufactura de equipos industriales esenciales. Hoy en día es difícil imaginar una máquina que manufacture de piezas sin apoyo de prensas metálicas, o cuchillas que generen cortes de alta precisión para industrias demandante.

2. Rol fundamental en infraestructura y construcción:

- La industria metalmecánica juega un papel muy importante en esta industria, ya que en la actualidad todas las construcciones requieren de elementos metálicos para su edificación, también lo encontramos en equipos de ingeniería civil es crucial para el desarrollo de infraestructuras. El sector metalmecánico contribuye directamente a la construcción de obras emblemáticas que impulsan el progreso económico.

3. Implicaciones en la industria automotriz y energética:

- La industria automotriz depende en gran medida del sector metalmecánico para la producción de componentes clave, como lo son motores, turbinas y sistemas de transmisión son manufacturados con precisión para cumplir con los estándares de seguridad y rendimiento.

4. Aeroespacial y defensa:

- Desde piezas críticas para aviones hasta componentes para sistemas de protección de países, o bien para aplicaciones con requerimientos de precisión sumamente demandantes o aleaciones de metales ligeros para soportar ambientes inhóspitos en el ámbito aeroespacial, la creación de componentes a través de este sector es clave para el desarrollo de estas industrias.

5. Apoyo a la electrónica:

- Si bien esta industria funciona con otros requerimientos, es necesario de la industria metalmecánica para la producción de dispositivos electrónicos y tecnológicos cuenta con la experiencia del sector metalmecánico. Esto abarca desde carcasas hasta componentes internos que forman parte de productos de consumo cotidiano.

2.20 Bloques económicos mundiales y su influencia en la industria del plástico

Una vez destacada la importancia que tiene el sector metalmecánico en el contexto actual mundial, ahora es momento de analizar la industria del plástico en dentro de este contexto, al comienzo de la presente investigación recalcamos la importancia económica que tiene esta fuerza manufacturera, al ser un recurso aparentemente en abundancia en el planeta al fabricarlo de derivados del petróleo, y como se explicó en el estado del arte, los esfuerzos para su control y sustentabilidad de la vida en el planeta son tópicos importantes para los bloques económicos mundiales.

Los bloques económicos-comerciales mundiales tienen como objetivo el promover el desarrollo económico entre los países que son miembros, y en algunos casos comparten monedas y regulaciones en común como es el caso de la Unión Europea, sin embargo, existen múltiples agrupaciones con el mismo fin, pero sin lograr la integración como lo tiene esta última incluso con las leyes para preservar la paz y la protección al ciudadano (López, 2018). Si bien la Organización Mundial de la Naciones Unidas (ONU), no representa un bloque económico, representa un referente de la unión internacional de las naciones del mundo que son miembros para perseguir objetivos en común en desarrollo, cuidado y preservación de la raza humana, entre ellos destaca el tema medio ambiental, que dentro de la agenda de dicha organización se persigue lograr una sociedad más sustentable con el medio ambiente (Banco Mundial, 2022). El desarrollo de investigación de los países miembros también asignan recursos para lograr la ecoeficiencia y esto puede tener cambios positivos o negativos en todas las industrias, a continuación se detallan algunas implicaciones que tienen los bloques económicos en la industria del plástico y el cómo la herramienta propuesta también representa una innovación en el campo de estudio para lograr el cumplimiento de la agenda de objetivos para el desarrollo sustentable impuestos por la ONU para el 2030:

- La cooperación entre países permite el intercambio de tecnologías y conocimientos que permiten el desarrollo de investigaciones innovadoras en la industria del plástico al generar elecciones más amigables y sostenibles con el medio ambiente, estos intercambios no solamente tienen que darse dentro de los estados miembros de los bloques económicos, sino también en aquellos en los que exista una buena relación de cooperación.
- Junto con el intercambio de tecnología y conocimiento, también en algunos casos existe el financiamiento para generar investigaciones de calidad frente a problemas reales y actuales de la industria, así como de la sociedad en general, tal es el caso que desde 2010 el Banco Mundial, ha financiado investigaciones sobre los bioplásticos usos y propiedades.
- De la misma manera en la que existen incentivos, también existen medidas que toman los países para el control del consumo de plásticos que puede bien impulsar o limitar las investigaciones, un ejemplo claro es

la Unión Europea que desde el 2015 ha decidido poner un frente para parar el consumo de plásticos de un solo uso para impulsar el reciclaje y la investigación en materiales biodegradables.

- Todas las medidas anteriormente mencionadas fomentan un ambiente de crecimiento del conocimiento mundial y a su vez permite el desarrollo competitivo comercial de las industrias de los países en la misma medida y con el mismo frente.

La herramienta propuesta, se muestra como una opción para que las organizaciones que la empleen puedan resultar más competitivas en el ramo siendo innovadores dentro de sus procesos de selección de materiales, revisiones de propiedades mecánicas de manera más ágil y puedan tomar decisiones más conscientes sobre su impacto en el medio ambiente.

2.21 Calentamiento global: Perspectiva para una mejor selección de materiales

Como se mencionó anteriormente en la sección del estado del arte, el cuidado y preservación del medio ambiente son importantes para el contexto actual comercial y político entre las naciones miembros de la ONU, del cual México para seguir la agenda impuesta por dicha organización. En respuesta a algunos de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de las naciones unidas como lo son la acción climática, el consumo y la producción responsables y la innovación industrial, la herramienta propuesta plantea el análisis integral de evaluación de impacto de los materiales mediante un estudio apoyado por el software Simapro de evaluación del ciclo de vida, en la categoría de calentamiento global, estas tres categorías, la forma en la que impactan y como se miden son acorde con lo comúnmente aceptado en este tipo de estudios, se toma de referencia los dispuesto por Hauschild & Huijbregts (2015):

- **Impacto en calentamiento global:** Se evalúa el impacto mediante la unidad de medida de CO₂eq, de las emisiones de gases causantes del efecto invernadero, por lo cual mediante la unidad de medida dispuesta por el estudio permite calcular la contribución al calentamiento global.
- **Impacto en agotamiento abiótico:** El agotamiento abiótico, hace referencia al consumo y desabasto de recursos naturales no renovables como minerales y combustibles fósiles, para la primera se evalúa en la unidad de medida de kilogramos de antimonio equivalente (kg Sb eq), esta permite comparar impacto ambiental de diferentes minerales y metales, mientras que para la segunda se evalúa con la unidad de medida de Megajulios (MJ), que es una unidad de energía exclusiva para el agotamiento abiótico de los fósiles.
- **Impacto en acidificación potencial:** Para terminar, se evalúa la acidificación potencial que hace referencia los óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), que pueden llevar a la formación de lluvia ácida y acidificación del suelo. Se mide en unidades de potencial de acidificación,

como kilogramos de dióxido de azufre equivalente (SO₂eq) o kilogramos de dióxido de nitrógeno equivalente (NO₂eq).

Capítulo III: Metodología

En este capítulo se detallan las distintas fases de la investigación. A continuación, se presentan cada una de ellas: delimitación del problema, búsqueda del estado del arte y elaboración del marco teórico, diseño de la herramienta y evaluación de resultados, sin contemplarse como una fase teórica la experimentación, se establece que con los resultados de la fase 2, se configura el experimento. Se procederá a describir cada etapa con mayor profundidad.

3.1 Fase I: Delimitación del problema

Para la fase inicial, es importante identificar problemática y su causa raíz, por lo que se diseñó una breve encuesta para ello, la cual pretendía conocer los métodos y procesos utilizados por los profesionales para validar y comparar resinas plásticas en aplicaciones específicas. Se enfoca en identificar los pasos seguidos, los responsables de proponer alternativas y el tiempo necesario para validar una resina, así también explora la utilidad de herramientas electrónicas para facilitar este proceso (véase el anexo 1). Dicha encuesta se aplicó a 6 proveedores de manufactura de plástico de la compañía fabricante de correderas industriales, quienes representan el 80% de la participación en su cadena de suministro, siendo cuatro localizados en China y dos con base en México, así como al equipo de ingeniería de diseño de producto en su totalidad el equipo consta de 7 ingenieros. Se realizó una extensa búsqueda de literatura para verificar el escenario actual del mercado y disponibilidad de herramientas electrónicas para la asistencia a la validación de resinas plásticas, así como un diagrama de esqueleto de pescado Ishikawa y un análisis de cinco porqués.

3.2 Fase II: Investigación del estado del arte y marco teórico para el diseño de experimento

Para el desarrollo de esta sección, se dividió en dos partes, en la sección 1 se aborda lo relacionado a moldeo por inyección plástica y parámetros del moldeo, en la sección 2 se documenta la relación de los parámetros de moldeo con las propiedades mecánicas de las resinas. Para ambas secciones se formularon preguntas guía para generar las cadenas de búsqueda, quedando establecidas de la siguiente manera para la sección 1:

1. ¿Cuántas investigaciones sobre mejoras al proceso de moldeo por inyección plástica se realizaron en los últimos 5 años?
2. ¿Cómo mejoran o aportan estas investigaciones al proceso de moldeo de inyección de plástico?

3. ¿Cuáles son los parámetros de moldeo por inyección plástica más relevantes que abordan las investigaciones realizadas?

Se generaron 6 cadenas de búsqueda implementadas en Scopus, Web Of Science, Springer Link, IOP Science y algunos estudios considerados relevantes tomados de la base de datos de Google Scholar. Las cadenas fueron implementadas solo para la búsqueda en el título, resumen y palabras clave, para artículos de revistas indexadas y estudios experimentales, excluyendo a los que se centren en congresos, tesis, ensayos, revistas de divulgación, artículos de opinión y capítulos de libros.

Como criterios de elegibilidad se contemplaron que estuvieran en idioma inglés, publicados entre el 1 de enero de 2017 al 31 de diciembre de 2022 y sean relevantes con el tema, esto último acotándolo a que abordan parcial o completamente el proceso de moldeo de inyección de plástico, incluyéndose algunas otras de otros periodos que sean consideradas relevantes al tema.

Para formar las cadenas de búsqueda se contemplaron 8 palabras clave dividiéndolas en 2 categorías, siendo la primera aquella que deberá ser utilizada en todas las combinaciones realizadas debido a su relevancia con el tema, las palabras que conforman esta categoría son `plastic` (plástico), `injection` (inyección), `mold` (molde)., en función de ello, la categoría 2 refiere a las partes del proceso al que se pueden encontrar o focalizar los resultados obtenidos, se agrupa por las siguientes palabras: `Design` (diseño) `Packing` (empaque), `Cooling` (enfriamiento), `Curation` (curación) y `Ejection` (eyección).

Se utilizaron los siguientes operadores booleanos AND y OR, posteriormente se emplearon utilizando los filtros búsqueda para limitar los resultados obtenidos a solamente, donde se encuentren estas palabras en su título, resumen y contenido. Concluida la fase búsqueda, los resultados obtenidos fueron sometidos a la herramienta de Rayyan, la cual detecta posibles duplicados de acuerdo al porcentaje de concordancia de palabras en los distintos campos de importación de los artículos y luego se revisó uno a uno los casos de posible duplicado y decidir si existe o no duplicación y eliminar el artículo que no nos interesa para efectos de la presente investigación, esta última parte se aplicó de manera general con los criterios de inclusión previamente mencionados.

Para extraer los datos de las investigaciones seleccionadas que se encuentren dentro de los criterios de elegibilidad se utilizara una hoja de cálculo de Excel, donde se incluirá las casillas de nombre autores, año de publicación, resumen, herramienta o tecnología aplicada, resultados obtenidos y fase del proceso de moldeo de inyección donde se especialice, para identificar y seleccionar aquellas publicaciones de interés para el presente estudio. Los resultados de la revisión de literatura correspondiente a la sección 1, concluyeron con un alcance de 3,913 artículos, que después de la eliminación de duplicados (2,328) y exclusión por relevancia con el

objetivo de la presente investigación (1,577), se tomaron en cuenta 40 para leer a texto completo.

En la sección 2, se estudian las propiedades mecánicas de resinas compuestas y no compuestas, con el objetivo de identificar aquellas propiedades clave para el desarrollo de la herramienta, tomándose en cuenta como las variables con mayor relevancia de entrada de información y su relación con los parámetros de moldeo. Las preguntas planteadas para generar las cadenas de búsqueda de manera preliminar son las siguientes:

1. ¿Cuántas investigaciones sobre las propiedades de mecánicas de los materiales en cuestión se realizaron en los últimos 5 años?
2. ¿Cómo mejoran o aportan estas investigaciones a la fabricación de componentes en base a sus descubrimientos?
3. ¿Cuáles son las propiedades mecánicas más relevantes para considerar al momento del diseño y fabricación de un componente plástico más relevantes que abordan las investigaciones realizadas?

Se generaron 8 cadenas de búsqueda, con los mismos criterios mencionados para la sección 1, a partir de las palabras claves que se relacionen al tema, la combinación de las palabras de estas secciones son las palabras clave mostradas en el resultado final de la presente investigación. Se analizó la información con una hoja de cálculo de Excel, con los puntos más relevantes que se consideran en el momento del desarrollo de esta, con el fin de poder eliminar investigaciones no relevantes al desarrollo de la herramienta. Los autores que más resaltaron de estas secciones, son los mostrados como base del resultado de la investigación.

Los resultados de la revisión de literatura correspondiente a la sección 2, concluyeron con un alcance de 4,740 artículos, que después de la eliminación de duplicados (2,946) y exclusión por relevancia con el objetivo de la presente investigación (1,754), se tomaron en cuenta 40 para leer a texto completo.

3.2.1 Unificación de criterios para experimentación:

A partir de la revisión exhaustiva del estado del arte y el marco teórico previamente presentado, se ha podido establecer un conjunto de variables clave que influyen en el proceso de moldeo y que son fundamentales para obtener las propiedades mecánicas deseadas en las resinas plásticas. Esta conexión entre la teoría y la práctica se convierte en un pilar esencial para la experimentación, donde se han definido parámetros específicos de moldeo que se reflejan en la Tabla 17.

Tabla 17: Parámetros de moldeo que afectan la propiedad mecánica de las resinas plásticas.

Parameter	Parámetro	Unidad
Melt Temperature	Temperatura de Fusión	°C
Mold Temperature	Temperatura del molde	°C
Cooling Time	Tiempo de enfriamiento	S
Injection Time	Tiempo de inyección	S
Holding Time	Tiempo de presión	S
Injection pressure	Presión de inyección	Mpa
Holding pressure	Fuerza de presión	Mpa
Injection volume	Volumen de Inyección	cm3

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Variables de respuesta, rangos y variables que afecten la respuesta

De la revisión de la literatura, se identifican los siguientes aspectos cruciales relacionados con la variable de respuesta.

Variable de Respuesta: Dureza (Hardness)

En el contexto de la investigación, la dureza se establece como la variable de respuesta principal. Este parámetro es de particular importancia, ya que proporciona una medida cuantitativa fundamental de la resistencia del material. La elección de la dureza como variable de respuesta se fundamenta en su relevancia en la literatura analizada en el capítulo 2 en las tablas 8, 9, 10 y 11.

Variables Independientes que Influyen en la Variable de Respuesta: Temperatura de Fusión

La experimentación se centra en la influencia de la temperatura de fusión como factor determinante. La variación de este parámetro se considera esencial, ya que se ha observado en la literatura que la temperatura de fusión puede tener un impacto significativo en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, particularmente en relación con la dureza.

Este hallazgo orienta la investigación hacia la exploración detallada de la relación entre la temperatura de fusión y la dureza, proporcionando un marco sólido

para la experimentación. De este modo, se establece una conexión directa entre la revisión de la literatura y la experimentación.

3.2.3 Configuración del experimento

En función de los resultados obtenidos en el análisis del estado del arte y el marco teórico, y tras identificar los parámetros influyentes en la propiedad mecánica de la dureza, se establece una colaboración con la empresa CIE Plasfil en la ciudad de Figueira da Foz, Portugal. CIE Plasfil, con más de 30 años de experiencia en la fabricación de plásticos mediante el moldeo por inyección, forma parte del grupo CIE, uno de los conglomerados de fabricación de plásticos más grandes del mundo, con operaciones en 108 sitios de producción distribuidos en 17 países y 4 continentes. El grupo CIE opera en América con plantas en América del Norte (11 en México y 5 en EE. UU.) y América del Sur (13 en Brasil). En Europa, cuenta con 19 plantas en España, 2 en Francia, 2 en Portugal, 3 en Italia, 5 en la República Checa, 3 en Rumania, 2 en la República Eslovaca, 1 en Lituania, 1 en Hungría y 1 en Rusia. En Asia, tiene 25 plantas en India y 11 en China, mientras que en África cuenta con una planta en Marruecos de acuerdo con datos obtenidos por Plasfil (2023).

Con el objetivo de obtener una muestra representativa de un lote de producción de piezas moldeadas en plástico, se fabricaron 45 muestras (inyecciones) con 3 diferentes temperaturas, utilizando 3 distintos materiales (PA66 Natural, PA66 GF30% y PA66 30% talco mineral), dando un total de 135 muestras fabricadas bajo estos criterios en una máquina de inyección de moldeo. Las temperaturas seleccionadas para este estudio fueron en consideración a las recomendaciones del proveedor/fabricante de la resina plástica, además, considerando lo reportado por los autores en el apartado del estado del arte, las cuales comienzan con una temperatura de 270° centígrados, al alcanzar esta temperatura es donde el polímero tiene una viscosidad y unión líquida recomendada por fabricante, y máximo 290° centígrados que es el máximo de temperatura que resiste sin calcinarse, es por ello que fueron hechas pruebas a 260° y 300° respectivamente para ver cuál era el comportamiento de los materiales.

Las configuraciones iniciales se pueden observar en la tabla 18. La producción fue realizada en una máquina inyectora modelo DEMAG D100 NCIII (Figura 13), esta máquina es genérica y según Plasfil (2023), la utilizan en la mayoría de sus plantas alrededor del mundo. La producción se llevó a cabo utilizando un molde de acero A2 (Figura 14) diseñado para piezas de prueba con dos cavidades, destinado a evaluar la resistencia al impacto requerida por la industria automotriz, este tipo de maquinaria es común en la industria manufacturera del plástico con sus diferentes vertientes en modelos y capacidad de tonelaje.

Las dimensiones de las piezas resultantes del proceso de moldeo cumplen con los requisitos de medición de dureza de plásticos, de acuerdo con los criterios establecidos en la norma ISO 48-4:2018, la cual describe el procedimiento para

medir la dureza mediante el uso de un durómetro Shore D. Esta norma específica que, para determinar la dureza de materiales plásticos, las piezas evaluadas deben contar con un espesor mínimo de 2 mm (Figura 15).

Para poder manufacturar las piezas en la maquina inyectora de plástico, fue necesario que el molde se precalentara durante una hora a la manufactura, fue colocado a una temperatura de 70 grados centígrados, para asegurar la estabilidad y uniformidad de la temperatura durante el proceso de producción de piezas

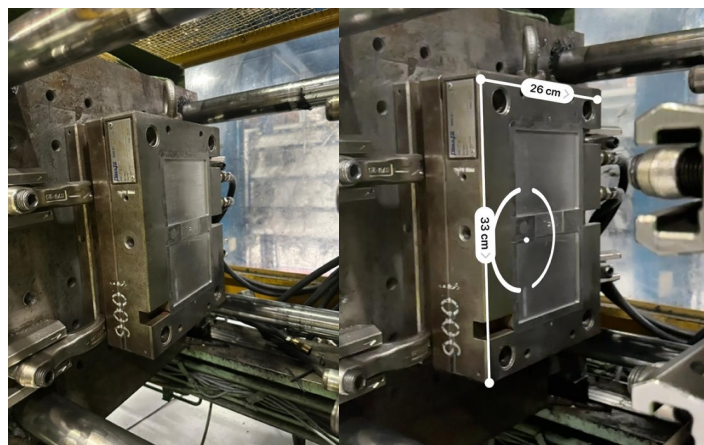
Figura 13: Máquina inyectora de plástico DEMAG D100 NCIII.



Fuente: Elaboración propia.

(Flecha naranja indica el tornillo donde se introduce y precalienta la resina plástica, mientras que la flecha azul indica en donde se ubica el molde).

Figura 14: Molde de piezas probeta, dimensiones 33x26 cm, peso aprox. 200kg.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15: Espesor de muestra probeta para evaluación de dureza 2.44 mm.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Parámetros iniciales de proceso de moldeo.

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de Fusión (Melt Temperature)	270	°C
Temperatura del Molde (Mold Temperature)	70	°C
Tiempo de Enfriamiento (Cooling Time)	25	S
Tiempo de Inyección (Injection Time)	4.4	S
Tiempo de Mantenimiento (Holding Time)	5	S
Presión de Inyección (Injection Pressure)	80	BAR
Presión de Mantenimiento (Holding Pressure)	50	BAR
Volumen de Inyección (Injection Volume)	65	MM
Tiempo Total del Ciclo (Total Time of Cycle)	50	S
Tiempo de Expulsión (Ejection Time)	2	S
Tiempo de Dosificación (Dosificacion Time)	13.6	S

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El color amarillo indica el valor modificado para la experimentación.

Un factor importante que mencionar es la humedad, la cual puede afectar a los polímeros y al proceso de molde, cuanto mayor humedad contenga genera mayores capsulas de oxígeno en el proceso, esto genera pequeños rayones de color blanco donde la resina no ha logrado llenar completamente la cavidad y por ende se ven afectadas las propiedades mecánicas.

Para poder controlar esta variable se utiliza la máquina secadora de resinas plásticas PIOVAN T 150 IX (Figura 16), la cual se ubica a 8 metros de altura y la cual se configura a una temperatura de secado mínima de 80°, máxima de 90°,

obteniendo una temperatura real de 85° centígrados, durante un proceso que dura 30 minutos por cada 50 libras de material. La humedad en las resinas puede jugar un papel muy importante en el llenado generado burbujas, es por lo que es una variable para controlar dentro del proceso para mantener todo en las condiciones en las que el fabricante de resina plástica recomienda.

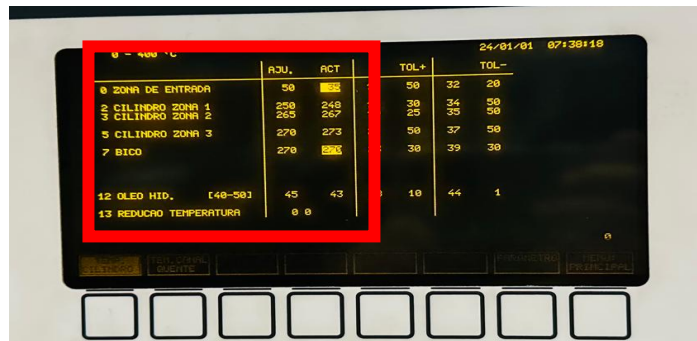
Figura 16: Maquina secadora de polimeros Pivant 150 IX.



Fuente: Elaboración propia.

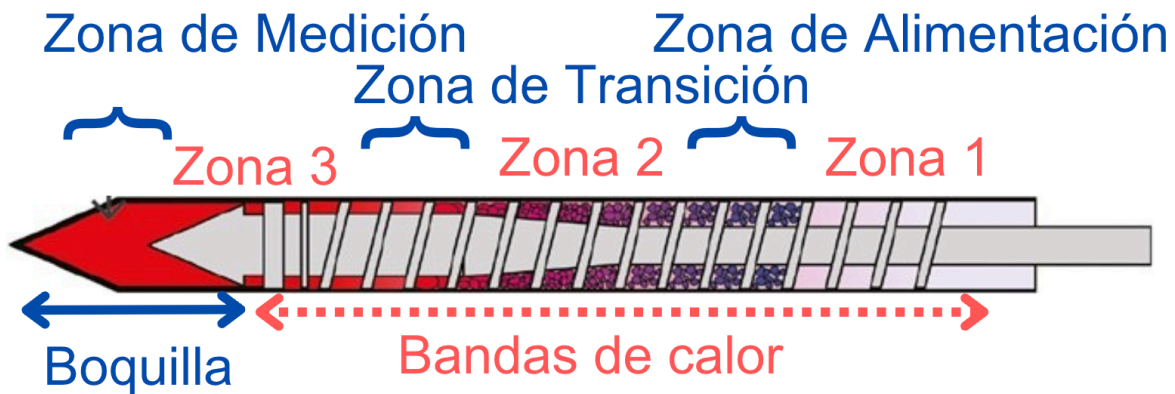
El control de la temperatura dentro del tornillo también tiene un papel importante en la estabilidad de la variable que se desea controlar como lo menciona Carrupt et al (2019), que en este caso es la temperatura melt (Zona final al inyectar), el diámetro del tornillo empleado fue de 45 mm. La configuración de las temperaturas en los diferentes materiales se observa en la figura 17 y en la figura 18 tal podemos ver la posición del tornillo y las zonas temperatura ligadas al control de la configuración.

Figura 17: Configuración de Zonas de transición de temperatura en tornillo de inyección.



Fuente: Creación propia.

Figura 18: Zonas de transición de temperatura en tornillo de inyección de plástico.



Fuente: Creación propia.

Posterior a la configuración del equipo, se fabrican 10 piezas como desperdicio, siguiendo el estándar de la compañía, donde reportan un desperdicio de menos de 1% en un lote de producción de 1,000 piezas (Plasfil, 2023), se detecta un desperdicio bajo de la materia debido a que se siguen siempre los parámetros sugeridos por el fabricante de resina plástica.

3.2.4 Medición de dureza

Una vez fabricadas las piezas, se realiza la medición de dureza shore D, con el instrumento que puede observarse en la Figura 19. Fueron tomadas 3 medidas de manera aleatoria en la superficie de la pieza y el promedio de ellas fue el utilizado para las lecturas. Se generó una base datos en Excel (figura 20) con las variables identificadas y resaltadas en color amarillo en conjunto con los resultados de dureza shore D como resultado de estas, para posteriormente ser analizados.

Figura 19: Instrumento de medición de dureza Shore D, marca genérica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20: Extracto de base de datos creada para tratamiento de la información.

Material	Melt Temperature Set	Melt Temperature Value	Mold Temperature Set	Mold Temperature Value	Cooling Time Set	Cooling Time Value	Injection Time Set	Injection Time Value	Holding Time Set	Holding Time Value	Injection volume Set	Injection volume Value	Total time of cycle Set	Total time of cycle Value	Ejection time Set	Ejection time Value	Dosificación time Set	Dosificación time Value	Hardness Shore D
PA66 Natural	270	270	70	69.5	25	25	4.4	4.59	5	5	65	65	50	49.3	2	2	13.6	12.71	77
PA66 Natural	270	270	70	69.5	25	25	4.4	4.67	5	5	65	65	50	49.7	2	2	13.6	13.03	77
PA66 Natural	270	270	70	70	25	25	4.4	4.43	5	5	65	65	50	50.2	2	2	13.6	13.77	77
PA66 Natural	270	270	70	70	25	25	4.4	4.64	5	5	65	65	50	49.2	2	2	13.6	12.56	77
PA66 Natural	270	270	70	70	25	25	4.4	4.48	5	5	65	65	50	49.5	2	2	13.6	13.02	77
PA66 Natural	270	270	70	70.1	25	25	4.4	4.55	5	5	65	65	50	51.3	2	2	13.6	14.75	77
PA66 Natural	270	270	70	69.8	25	25	4.4	4.47	5	5	65	65	50	50.6	2	2	13.6	14.13	78

Fuente: Elaboración propia.

Nota: En amarillo datos que pueden variar en 1 unidad.

Fueron analizados los datos de manera individual por tipo de resina plástica y temperatura a la que fue sometido el material para determinar el promedio de dureza que tiene a determinada temperatura y obtener la desviación estándar para ver las variaciones, de esta manera se graficaron estos datos.

Posteriormente los datos fueron analizados mediante una gráfica de dispersión con la herramienta de Excel, para obtener el coeficiente de determinación (R^2), este es una medida que indica la proporción de la variabilidad en la variable dependiente que es explicada por la variable independiente en un modelo de regresión. Si bien este dato no es del todo certero ya que no contempla otras variables, nos brinda una idea general de cómo está constituida esta relación. Para finalizar fue contemplado el total de los datos por resina plástica y encontrar su coeficiente de correlación, el cual entre más cercano su valor sea a 1 está más estrechamente relacionado, es por lo que se consideraron fórmulas polinómicas cuadradas.

Una vez concluida este análisis de los datos, se procedió a realizar un análisis de varianza (ANOVA) de 3k, para realizar la comprobación estadística de los datos y poder proseguir con la experimentación, de esta manera se validó la relación estadística y se hicieron 3 corridas de prueba por cada material a 3 diferentes temperaturas.

3.3 Fase III: Diseño de herramienta

En esta fase, se bosquejo el diseño de la herramienta para analizar las variables de los procesos identificados, utilizando el software de Microsoft Excel, en una hoja de cálculo de a manera de una macro con una interfaz amigable, en base a una evaluación comparativa con otros softwares de probabilidad que se encuentren de evaluación de compatibilidad, no delimitando solo a las resinas plásticas. Los parámetros de entrada que ya fueron identificados en el estado del arte como los actores críticos para la fabricación de componente plástico. La figura 21, bosqueja el desarrollo inicial de la herramienta.

Figura 21: Bosquejo de la herramienta.

Resin: PA66GF10 plus toughened end of production process parameters				Hardness
Parameter	set value	measured value	Unit	Result:
Melt Temperature	275	260.1	°C	
Mold Temperature	50	43	°C	
Cooling Time	30	30	s	
Injection Time	0.29	0.29	s	
Holding Time	0.5	0.5	s	
Injection pressure	200	200	Mpa	
Holding pressure	100	100	Mpa	
Injection volume	61.6	61.6	cm3	

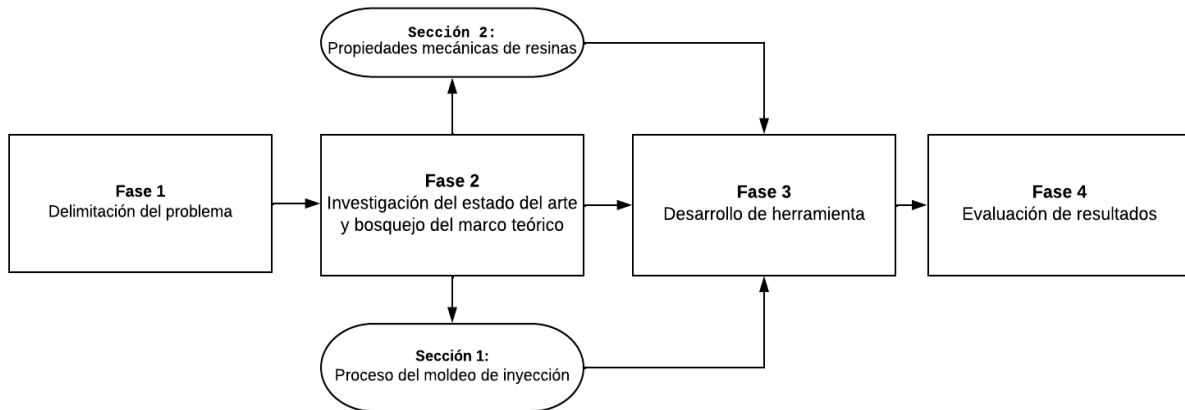
Fuente: Elaboración propia.

Se detectó en la encuesta de delimitación de problema investigación que el consultar disponibilidad en el mercado tomaba en promedio 1.33 días a los proveedores de la empresa de correderas industriales, probablemente esto se deba a falta de contactos, por lo que se contempla incluir una base de datos de proveedores, sin embargo, no es el principal objetivo de la herramienta propuesta, la base de datos de vendedores de resinas en el mercado mexicano y americano, fueron tomados de la Plasti-imagen 2022, celebrada en la CDMX. La herramienta contará con una base de datos de referencia, la cual podrá ser actualizada, referente a fichas técnicas de las resinas, para hacer más fácil la colocación de los parámetros en la herramienta y aumentar la eficacia de la herramienta.

3.4 Fase IV: Evaluación de resultados

La herramienta se valida con dos tipos de resina, el uso de las propiedades mecánicas en el componente al cual nos estamos enfocando, ya sea con el mismo diseño o uno que se asimile en dimensiones y aplicación, para que sea el sustento de la eficacia y fiabilidad de la herramienta. En la figura 22 se presenta de manera gráfica el proceso a seguir en la metodología con el fin de crear la herramienta y sustentarla mediante el conocimiento científico publicado.

Figura 22: Metodología para el diseño de la herramienta de validación de resinas.



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV: Resultados

4.1 Resultados obtenidos de la experimentación con resina PA66 natural sin cargas

Acorde con lo mencionado anteriormente los datos obtenidos para este material son los que se representan en la tabla 19.

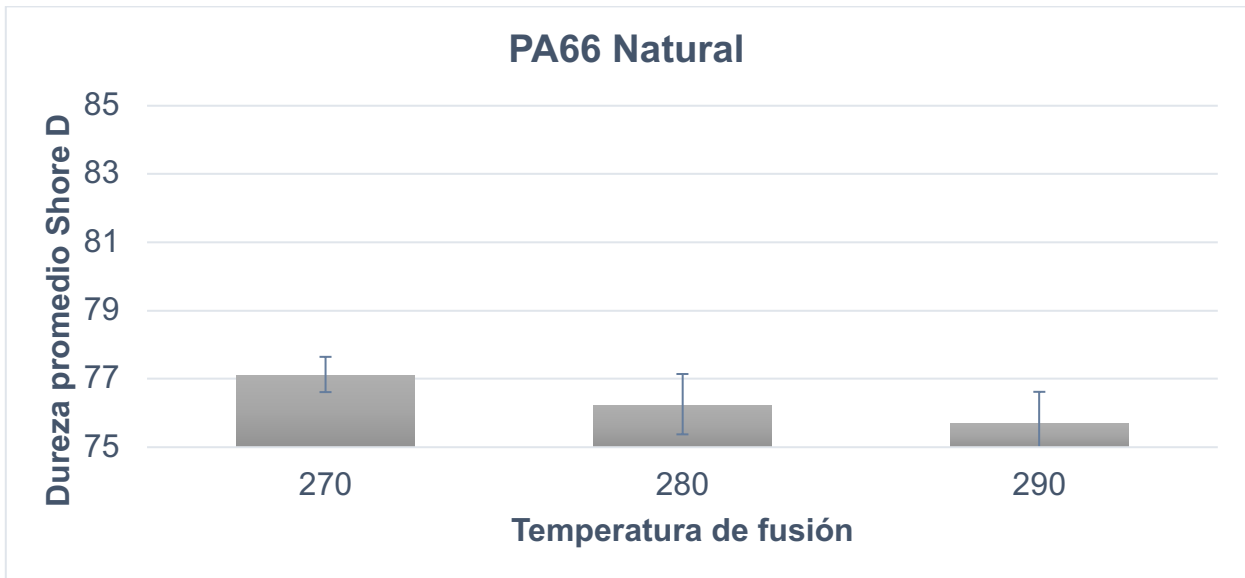
Tabla 19: Dureza y desviación estándar respecto a temperatura de PA66 Natural.

Temperatura	Dureza Promedio	Desviación Estándar
270°	77.13	0.516397779
280°	76.26	0.883715102
290°	75.7	0.921954446

Fuente: Elaboración propia.

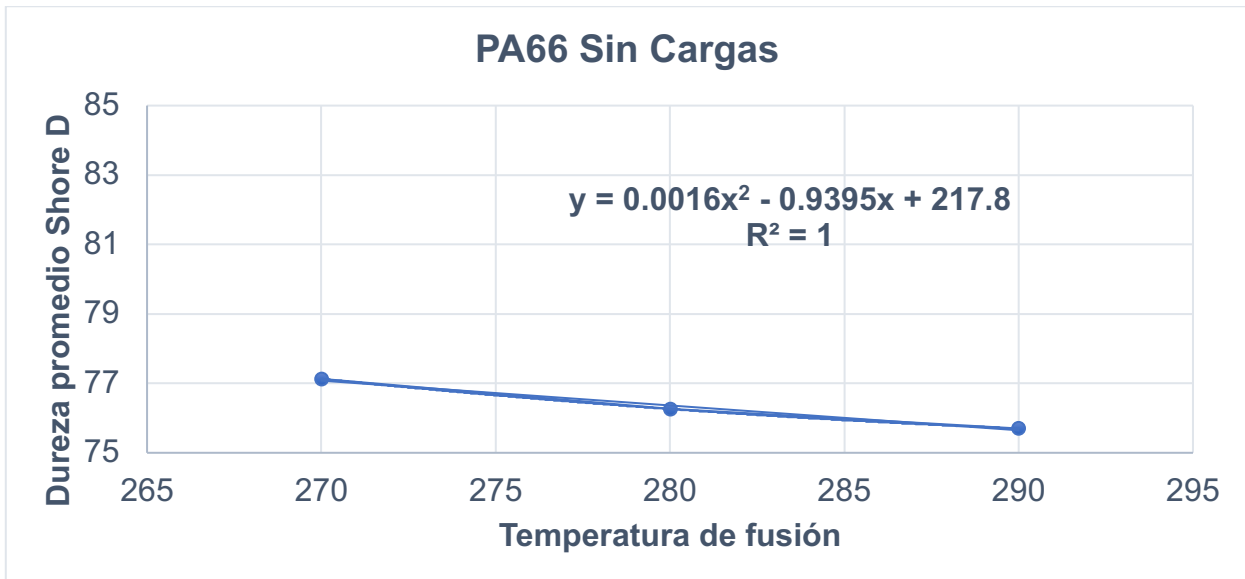
El coeficiente de correlación encontrado es **-0.604256884**. En la figura 23, se muestra la tendencia de dureza promedio por cada temperatura configurada y en la figura 24, nos representa la variabilidad que se tiene entre estos dos factores (temperatura de fusión y dureza) y se determina el valor de $R^2 = 1$.

Figura 23: Dureza promedio en diferentes temperaturas de PA66 Natural.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Variabilidad de dureza en diferentes temperaturas de PA66 Natural.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Resultados obtenidos de la experimentación con resina PA66 30% talco mineral.

Los datos obtenidos de la resina PA66 30% talco mineral se representan en la tabla 25.

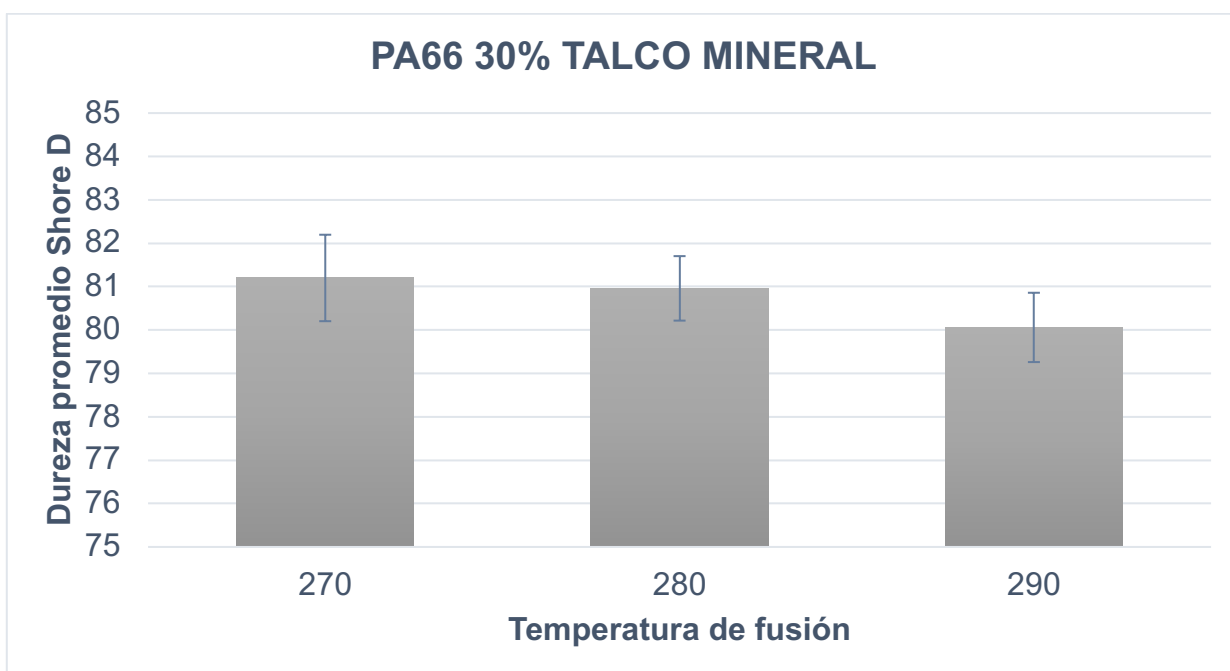
Tabla 25: Dureza y desviación estándar respecto a temperatura de PA66 30% talco mineral.

Temperatura	Dureza Promedio	Desviación Estándar
270°	81.2	0.996422171
280°	80.96	0.743223353
290°	80.06	0.798808637

Fuente: Elaboración propia.

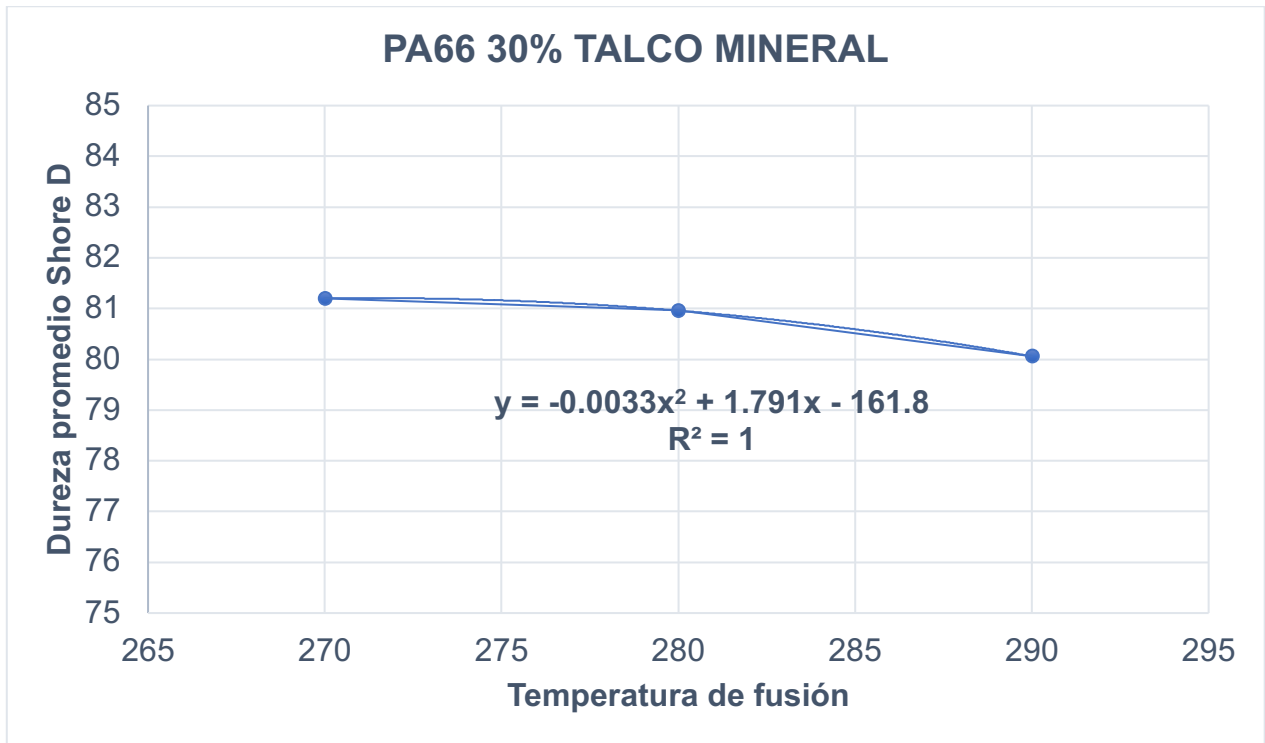
El coeficiente de correlación encontrado es **-0.482897388**. En la figura 25, se muestra la tendencia de dureza promedio por cada temperatura configurada y en la figura 26, nos representa la variabilidad que se tiene entre estos dos factores (temperatura de fusión y dureza) y se determina el valor de $R^2 = 1$

Figura 25: Dureza promedio en diferentes temperaturas de PA66 30% talco mineral.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Variabilidad de dureza en diferentes temperaturas de PA66 30% talco.



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Resultados obtenidos de la experimentación con resina PA66 30% Fibra de vidrio (GF30).

Los datos obtenidos de la resina PA66 30% fibra de vidrio (GF30) se representan en la tabla 21.

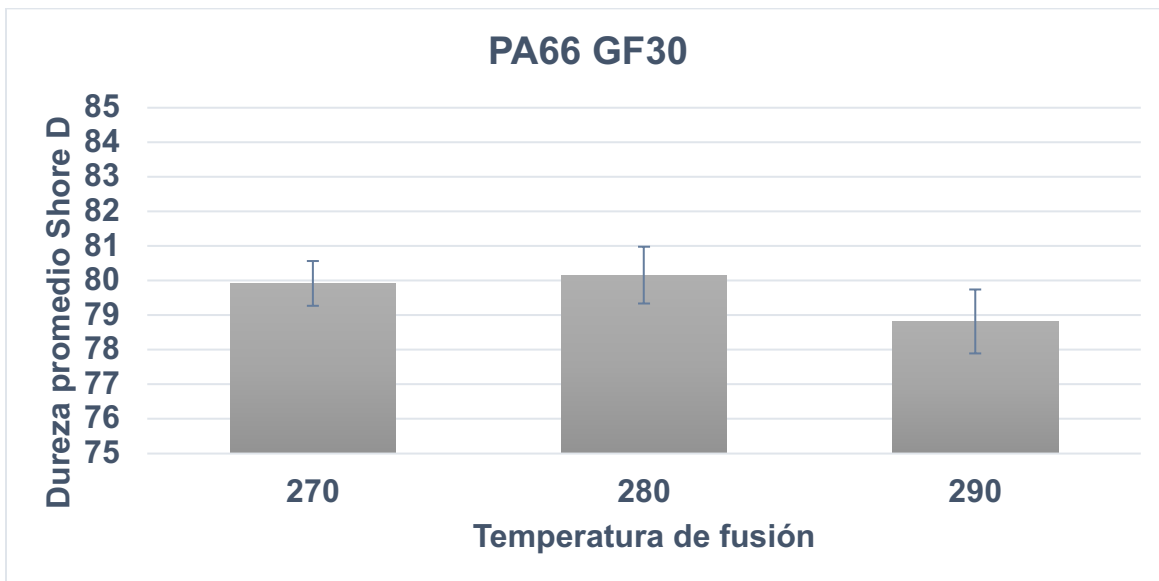
Tabla 20: Dureza y desviación estándar respecto a temperatura de PA66 GF30

Temperatura	Dureza Promedio	Desviación Estándar
270°	79.92	0.647485981
280°	80.16	0.82097503
290°	78.82	0.924636351

Fuente: Elaboración propia.

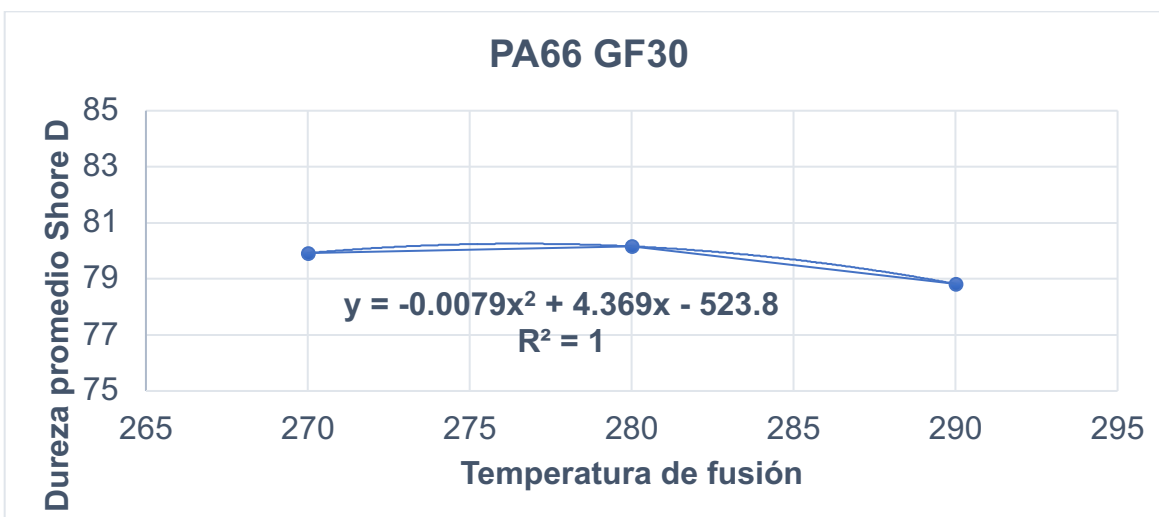
El coeficiente de correlación encontrado es **-0.46216976456563**. En la figura 27, se muestra la tendencia de dureza promedio por cada temperatura configurada y en la figura 28, nos representa la variabilidad que se tiene entre estos dos factores (temperatura de fusión y dureza) y se determina el valor de $R^2 = 1$.

Figura 27: Dureza promedio en diferentes temperaturas de PA66 GF30.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28: Variabilidad de dureza en diferentes temperaturas de PA66 GF30.



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Comparativo de resultados de la experimentación de las resinas (PA66 sin cargas, PA66 GF30 y PA66 30% talco mineral)

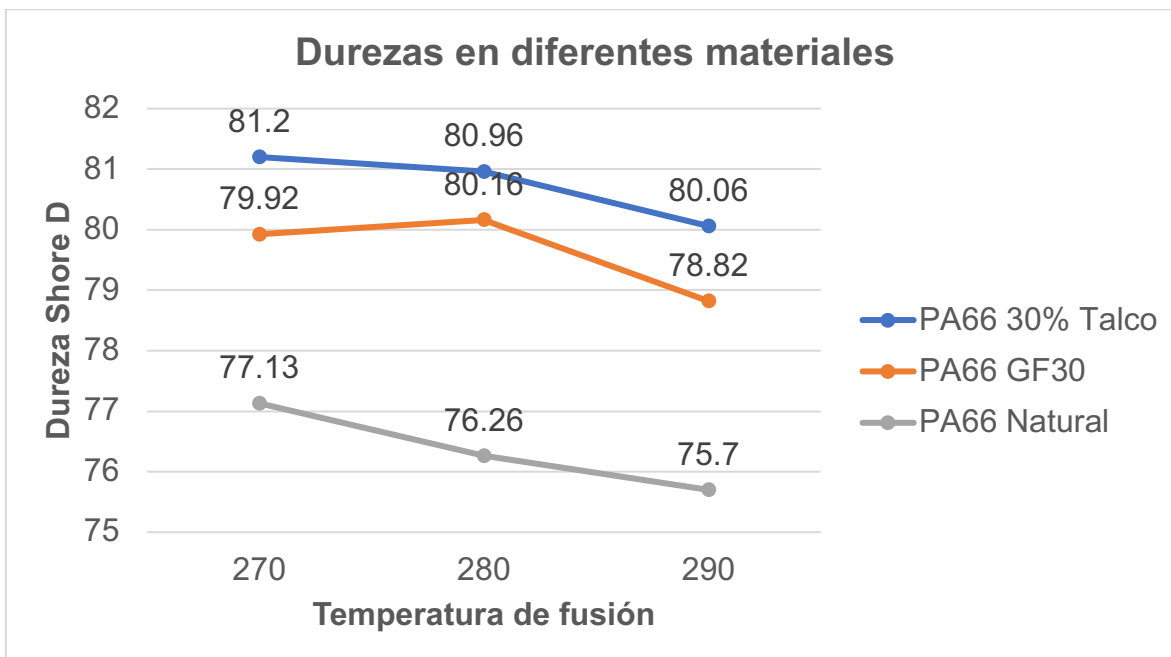
En la tabla 22, se representa la variación de durezas en las mismas temperaturas en los materiales objetos de análisis, y el cual se representa en la figura 29, donde se visualiza con mayor claridad las diferencias y semejanzas entre estos materiales. Ofreciendo un panorama más claro sobre cual oferta mayor dureza o menor según sea el caso y el parámetro de temperatura promedio para obtener estos datos.

Tabla 21: Comparativo de durezas en diferentes materiales.

Temperatura	Materiales		
	PA66 30% Talco	PA66 GF30	PA66 sin cargas
	Dureza Shore D		
270	81.2	79.92	77.13
280	80.96	80.16	76.26
290	80.06	78.82	75.7

Fuente: Elaboración propia.

Figura 29: Comparativo de durezas en diferentes materiales.



Fuente: Elaboración propia.

4.5 Validación estadística con análisis de varianza (ANOVA) mediante diseño factorial general de 3 factores.

Para la evaluación estadística y documentar que las dos variables se encuentran estadísticamente relacionadas, se empleó el uso del método ANOVA, debido a que la experimentación se realizó en grupos de 3 fue considerado el diseño factorial 3k para la validación de los datos. El ANOVA fue realizado con apoyo del software Microsoft Excel versión 2022, con los datos mostrados en la tabla 23:

Tabla 22: Agrupación de datos para ANOVA.

Nivel del Factor A a = 3		Nivel del Factor B b = 3			Cantidad de Replicas n = 15			Muestras Totales N = a x b x n = 135	
Factor A Temperatura	Factor B TIPOS DE RESINAS PA66								
	PA66			PA66 GF30			PA66TALC		
270	77	77	78	80	80.8	80.8	81.5	82	82
	77	77	78	79.8	81.3	79	80	80	80
	77	77	78	79.8	80	80	82	81.5	82
	77	77	76	79	80	79.6	83	82	80
	77	77	77	79.5	80	79.3	81	81	80
280	76.5	75	76	80	80.8	81	81.5	82	80
	76.5	76	76	80.1	79.2	81	81.5	81.5	80.5
	77.5	77.5	76.5	80	79	80.6	80	81.5	82
	76.5	74	76.5	80	80	78.5	80.5	80	81
	76	76.5	77	81.6	80	80.6	81.5	81	80
290	75	76.5	74	81.3	79.5	78.5	80	81	81
	76.5	76	75.5	78	78	79	80	80	79
	76	77.5	75.5	78.3	78	79	79	80	81
	76	75	75	79.8	79	78	79	81	79
	77	75	75	79.5	78.5	78	80	81	80

Fuente: Elaboración propia.

Después de haber concentrado los datos de la experimentación, se utilizó la función en el software de “Análisis de Varianza” bajo el supuesto de la hipótesis nula es que el factor A no tiene ninguna relación con el factor B en ninguna circunstancia y como hipótesis alternativa es que si tiene efecto, obteniendo de esta manera los siguientes resultados a un nivel de significancia del 0.05, en las tablas 24, 25, 26 y, se observan los datos a temperatura de 270, 280 y 290 grados respectivamente, finalizando con la tabla 27 con un resumen general de sumas de las anteriores 3 tablas mencionadas:

Tabla 23: Análisis para ANOVA de factor A-270.

Temperatura Factor A	Tipo de Material Factor B			
	PA66 sin cargas	PA66 GF30	PA66 30% Talco Mineral	Total
270.00				
Cuenta	15.00	15.00	15.00	45.00
Suma	1,157.00	1,198.90	1,218.00	3,573.90
Promedio	77.13	79.93	81.20	79.42
Varianza	0.27	0.42	0.99	3.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24: Análisis para ANOVA de factor A-280.

Temperatura Factor A	Tipo de Material Factor B			
	PA66 sin cargas	PA66 GF30	PA66 30% Talco Mineral	Total
280				
Cuenta	15.00	15.00	15.00	45.00
Suma	1,144.00	1,202.40	1,214.50	3,560.90
Promedio	76.27	80.16	80.97	79.13
Varianza	0.78	0.67	0.55	4.95

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25: Análisis para ANOVA de factor A-290.

Temperatura Factor A	Tipo de Material Factor B			
	PA66 sin cargas	PA66 GF30	PA66 30% Talco Mineral	Total
290				
Cuenta	15.00	15.00	15.00	45.00
Suma	1,135.50	1,182.40	1,201.00	3,518.90
Promedio	75.70	78.82	80.06	78.19
Varianza	0.85	0.85	0.63	4.19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26: Resumen de totales para ANOVA.

Resumen de Totales			
Concepto	PA66 sin cargas	PA66 GF30	PA66 30% Talco Mineral
Cuenta muestras por material	45.00	45.00	45.00
Suma de durezas totales por material	3,436.50	3,583.70	3,633.50
Promedio de dureza	76.36	79.63	80.74
Varianza	0.95	0.96	0.93

Fuente: Elaboración propia.

En este análisis de las tablas 25, 26 y 27, se puede observar como la dureza varía entre una resina y otra, documentándose una dureza mayor en la resina PA66 30% talco mineral, mientras que la dureza media es la PA66 30% fibra de vidrio y la de menor dureza siendo la PA66 sin aditivos. Una vez obtenidos los datos presentados en las tablas 24 a 27, se procede a realizar el análisis de varianza (ANOVA), obteniendo como resultados lo documentado en la tabla 28, en donde se identifican la relación que se tienen las variables previamente identificadas.

Tabla 27: ANOVA de datos factor A y B.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Fo	Fc
Temperatura (A)	36.73	2.00	18.36	27.41	3.07
Material (B)	466.35	2.00	233.17	348.07	3.07
Interacción (AB)	4.86	4.00	1.22	1.81	2.44
Dentro del grupo	84.41	126.00	0.67		
Total	592.34	134.00			

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se concluyen con estos resultados de ANOVA, que el factor A (temperatura) con Fo 27.1 mayor que Fc 3.06 efectivamente influye en la variable de respuesta (dureza), así también como el factor B (tipo de material) también influye en el mismo con esto se rechaza la hipótesis nula con Fo 348.06 el cual es mayor que Fc 3.06, sin embargo no existe evidencia estadística que la combinación de los factores A y B influyan directamente en la variable de respuesta, reflejándose que Fo 1.81 es menor que Fc 2.44, por lo que en este caso no se puede comprobar la hipótesis nula, esto es lógico puesto que la naturaleza del propio material es lo que genera cambios en la variable de respuesta y no por sí mismo la combinación de estos factores.

4.6 Validación de datos con Minitab 2018

Con el propósito de evaluar los datos obtenidos en el ANOVA de regresión factorial general: Dureza Shore D vs. Material, Temperatura en Microsoft Excel, se realizó el mismo procedimiento con ayuda del software de asistencia de probabilidad y estadística Minitab versión 2018. Procediendo en primera instancia con la organización de la información, tal como se muestra en la figura 30, en la que se puede observar que la agrupación es similar a lo planteado en el primer estudio realizado en Excel, con la diferencia de la agregación del reconocimiento del modelo requerido por Minitab.

Figura 30: Agrupación de información para realizar ANOVA con asistencia de Minitab

	C1-T	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	Material	Temperatura	Dureza Shore D	OrdenEst	OrdenCorrida	Bloques	TipoPt	RESI1	
1	PA66	270	77.0	1	1	1	1	-0.13333	
2	PA66	270	77.0	2	2	1	1	-0.13333	
3	PA66	270	78.0	3	3	1	1	0.86667	
4	PA66	270	77.0	4	4	1	1	-0.13333	
5	PA66	270	77.0	5	5	1	1	-0.13333	
6	PA66	270	78.0	6	6	1	1	0.86667	
7	PA66	270	77.0	7	7	1	1	-0.13333	
8	PA66	270	77.0	8	8	1	1	-0.13333	
9	PA66	270	78.0	9	9	1	1	0.86667	
10	PA66	270	77.0	10	10	1	1	-0.13333	
11	PA66	270	77.0	11	11	1	1	-0.13333	
12	PA66	270	76.0	12	12	1	1	-1.13333	

Fuente: Elaboración propia.

Una vez agrupada la información se procedió a utilizar la función de ANOVA ofrecida por este software, validando un análisis de factores de 3 niveles, y validando el modelo de regresión factorial como se observa en la tabla 28, en donde observamos un R cuadrado del 85.75% lo cual nos indica un ajuste alto y con gran fiabilidad de predicción de los datos con nuevos datos.

Tabla 28. Resumen de modelo de ANOVA

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.818477	85.75%	84.85%	83.64%

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente el software muestra los resultados del análisis de varianza, el detalle se establece en la tabla 30, donde ambos estudios de ANOVA revelan que tanto el material como la temperatura son factores que influyen significativamente

en la variable de respuesta que es la dureza. En ambos casos, el material tiene un Fo de 348.07, mayor que el Fc de 3.0681, con un valor p de 0.000, indicando que el tipo de material impacta de forma significativa. La temperatura también muestra un Fo de 27.41, mayor que el Fc de 3.0681, y un valor p de 0.000, lo que confirma su influencia significativa. Sin embargo, la interacción entre material y temperatura no presenta un efecto significativo en ninguno de los estudios, con un Fo de 1.81, menor que el Fc de 2.4436, y un valor p de 0.130, lo que indica que la combinación de estos factores no afecta significativamente la variable de respuesta.

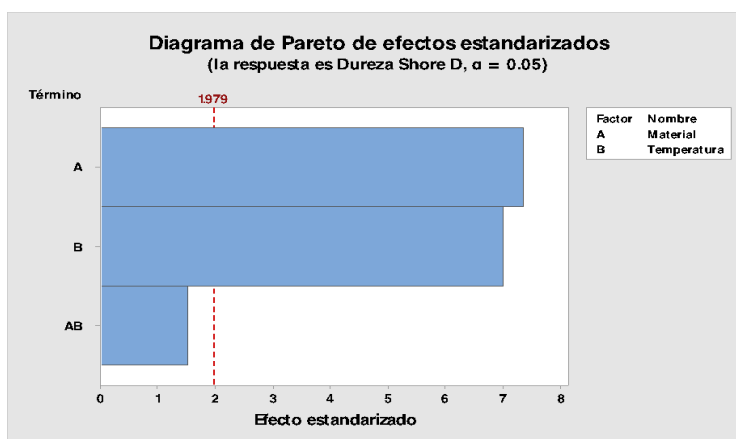
Tabla 29. Resultado de ANOVA por Minitab

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	507.936	63.492	94.78	0.000
Lineal	4	503.073	125.768	187.74	0.000
Material	2	466.347	233.174	348.07	0.000
Temperatura	2	36.726	18.363	27.41	0.000
Material*Temperatura	4	4.863	1.216	1.81	0.130
Error	126	84.408	0.670		
Total	134	592.344			

Fuente: Elaboración propia

Una vez validada la información de ambos análisis de varianza, la figura 31, nos muestra con un nivel de significancia de 0.05, es decir un nivel de confianza del 95% que el punto para comprobar que estadísticamente que las variables tienen relación con la variable de respuesta es de 1.979, siendo las únicas que superan ello el factor A y B por separado, pero no en interacción.

Figura 31: Diagrama de Pareto de relación de factores A, B y AB



Fuente: Elaboración propia.

4.7 Validación con corridas de prueba

Una vez concluidas las pruebas experimentales para el desarrollo de la herramienta, se realizaron en el mismo día y en la misma organización, con las variables posibles que puedan afectar el experimento en las mismas condiciones, 3 corridas de prueba por cada material, obteniendo de esta manera los siguientes resultados documentados en la tabla 29, para el último parámetro no presenta carbonización física, pero mostró un comportamiento diferente en el desmoldeo.

Tabla 30: Resultados de corridas de validación de temperatura y su dureza

Temperatura	Dureza PA66 sin cargas	Dureza PA66 GF30	Dureza PA66 30% Talco Mineral
275	77	80	81.5
	77	79.8	80
	77	79.8	82
285	76.5	80	81.5
	76.5	80.1	81.5
	77.5	80	80
295	75	81.3	80
	76.5	78	80
	76	78.3	79

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 31, no se presentan variaciones mayores al 5% entre los datos de las muestras por lo que se concluye que la herramienta se encuentra calibrada y validada de manera correcta para su operación. Por lo tanto, la herramienta cumple con su propósito probabilístico con los criterios de un diseño de experimentos correctamente determinados.

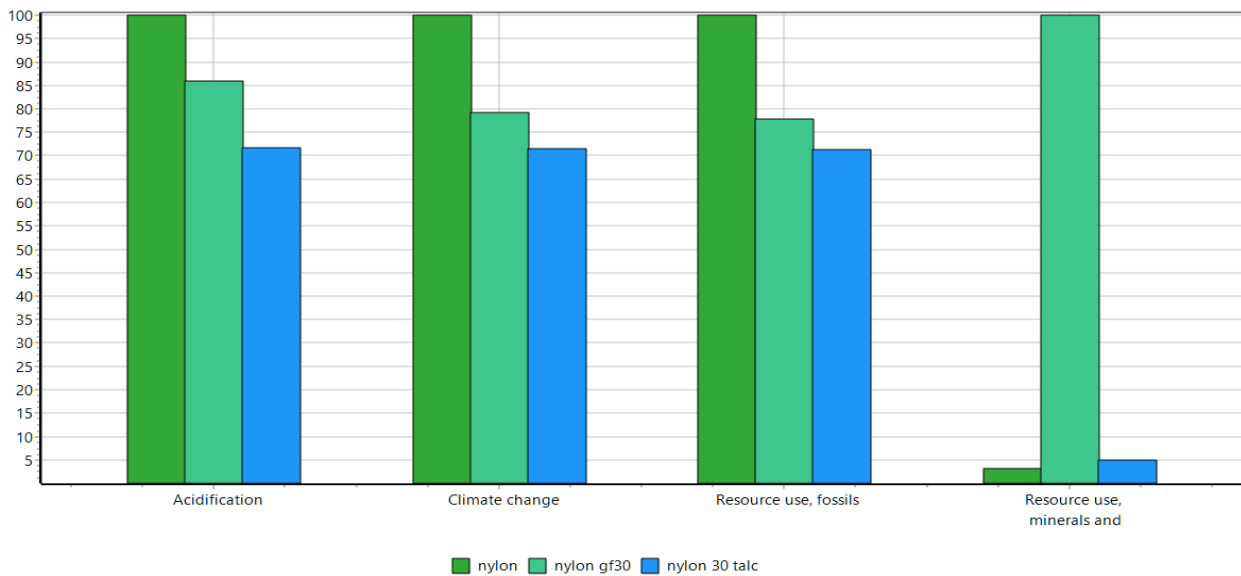
4.8 Modelado de funciones de cuidado del medio ambiente considerando evaluación del ciclo de vida

Para la evaluación de los criterios que toma en cuenta la herramienta para la toma de decisiones más conscientes sobre el impacto en el medio ambiente, se consideran los impactos relativos al calentamiento global (Climate change), agotamiento abiótico (Resource use, fossils, minerals and metals) y acidificación (Acidification), utilizando el software SimaPro 9.5.0.1 y la base de datos Ecoinvent 3, el método designado para esta investigación es el conjunto de normalización y ponderación de Huella Ambiental 3.1 (adaptado) V1.00 / EF 3.1, con aplicación en la Unión Europea en los términos generales del mercado.

El objetivo del análisis es evaluar y comparar los impactos ambientales asociados con los ciclos de vida de tres variantes diferentes de PA66: PA66 sin aditivos, PA66 con 30% de fibra de vidrio (GF 30) y PA66 con 30% de talco mineral. El alcance del estudio incluye todas las etapas del ciclo de vida de cada variante, desde la adquisición de materias primas hasta la fabricación. Para PA66 natural, se considerará la extracción y procesamiento de los precursores de polímeros, mientras que para PA66 GF 30 se incluirá además la adquisición de fibras de vidrio, y para PA66 con 30% de talco, la adquisición de mineral de talco. En la etapa de fabricación, se analizarán la producción de PA66, la incorporación de aditivos (fibra de vidrio o talco) al polímero, así como el consumo de energía, las emisiones, incluyendo los gases de efecto invernadero, y la generación de residuos asociados a los procesos de fabricación de cada variante. La unidad funcional se fijó en 1 kilogramo (kg) de cada variante de PA66, lo que estandariza la evaluación y facilita una comparación directa de los impactos ambientales asociados con la producción de una cantidad constante de cada material. Este análisis integral permitirá identificar y comparar los impactos ambientales de cada variante, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas en la selección de materiales.

Según los datos obtenidos del software SimaPro 9.5, la figura 32 y la tabla 30 ilustran que el nailon (PA66) sin cargas de aditivos adicionales exhibe un mayor impacto ambiental que las categorías mencionadas anteriormente. Después de esto, el nailon GF30 demuestra un mayor impacto, observándose el menor impacto en el nailon con un 30 % de talco (calcio). Sin embargo, un análisis granular de cada variante es crucial, particularmente en la categoría de agotamiento abiótico relacionado con el uso de minerales y metales. Contrariamente a lo esperado, en esta categoría destaca el PA66 GF30, aunque lógicamente el contenido mineral de talco debería ser el factor predominante entre estas variantes. Identificar la cadena de fabricación de PA66 GF30 se vuelve fundamental para una comprensión más matizada. Posteriormente, cada variante fue sometida a un análisis individual. En la tabla 39, los valores que indican el menor impacto entre las variables analizadas están resaltados en amarillo. Esta evaluación detallada es esencial para comprender la intrincada dinámica ambiental asociada con cada variante.

Figura 32: Resultados de la comparación de variantes de PA66 con SimaPro 9.5.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31: Resultados de comparación de variantes de PA66 con SimaPro 9.5.

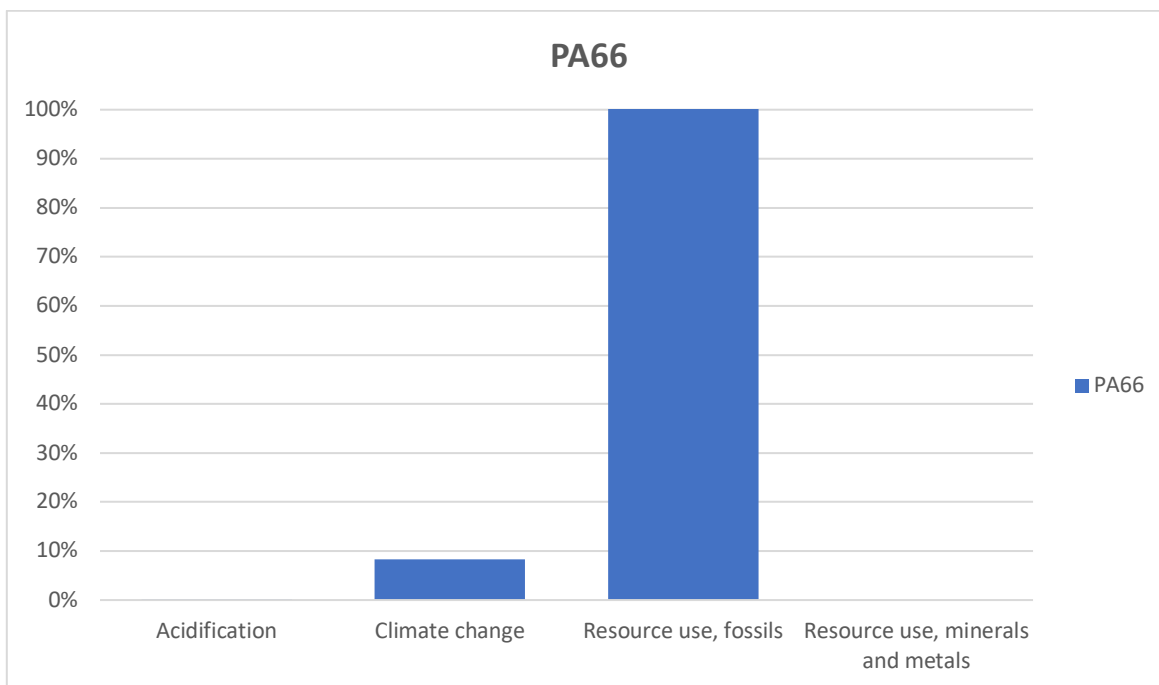
Categoría de Daño	Unidad	PA66	PA66 GF30	PA66 30% Talco mineral
Acidificación (Acidification)	mol H+ eq	0.035	0.03	0.02
Cambio Climático (Climate change)	kg CO2 eq	8.25	6.53	5.89
Agotamiento abiótico fósiles (Resource use, fossils)	MJ	126.62	98.56	90.24
Agotamiento abiótico minerales y metales (Resource use, minerals, and metals)	kg Sb eq	2.92	9.00	4.45

Fuente: Elaboración propia.

La figura 33, ilustra la contribución del impacto a la acidificación del PA66 en el estado actual, según lo evaluado en este estudio. Si bien, el impacto de la acidificación parece relativamente insignificante, PA66 demuestra una contribución más sustancial al cambio climático. Esta conexión se atribuye a su pronunciado impacto en el agotamiento abiótico de los recursos fósiles, ya que el uso de este material en estado puro influye significativamente en estas categorías. Las

características distintivas de PA66 subrayan la necesidad de una comprensión integral de sus contribuciones ambientales en varias categorías.

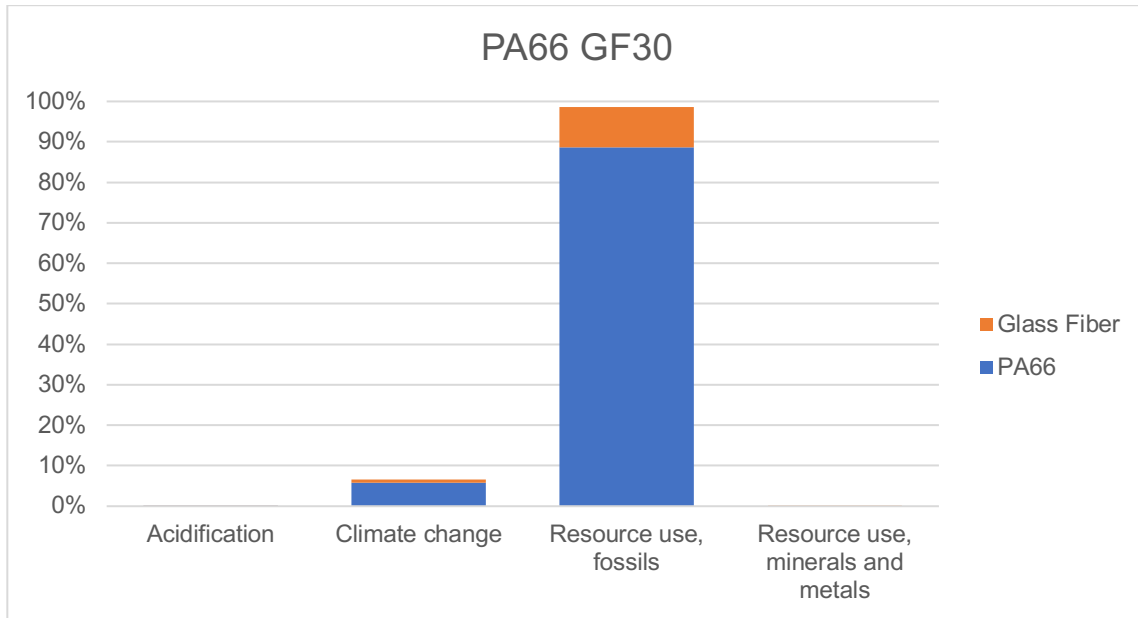
Figura 33: Resultados de los impactos de las categorías PA66 con SimaPro 9.5



Fuente: Elaboración propia.

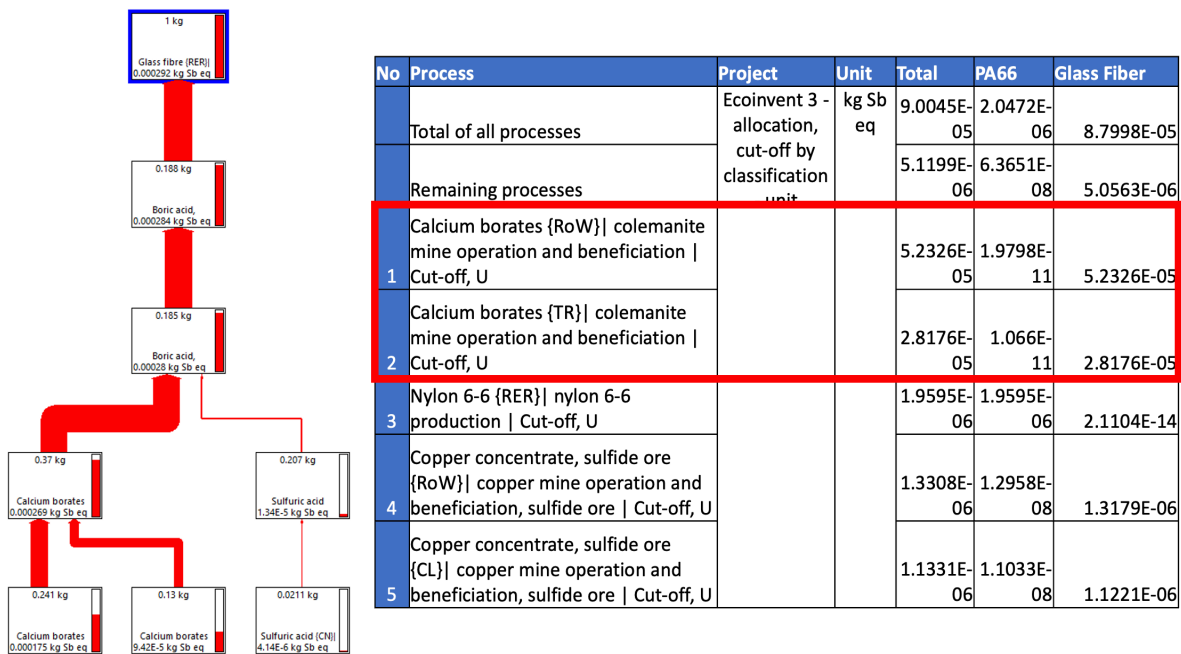
En la figura 34, evaluando PA66GF30, observamos una similitud con PA66 sin cargas adicionales en las categorías de acidificación y agotamiento abiótico relacionados con el uso de metales y minerales. Sin embargo, el uso de fibras de vidrio amplifica significativamente el agotamiento abiótico relacionado con el uso de fósiles, lo que en consecuencia impacta el cambio climático. Este hallazgo es de gran importancia para la investigación, ya que indica que el uso de este aditivo produce un mayor daño ambiental en las categorías de agotamiento abiótico y cambio climático. El notable incremento en estas categorías se explica en la figura 35, donde se evidencia que la producción y uso de ácido bórico son necesarios para la creación del aditivo de fibra de vidrio, representando más del 30% del proceso de fabricación.

Figura 34: Resultados de los impactos de las categorías PA66 GF30 con SimaPro 9.5.



Fuente: Elaboración propia.

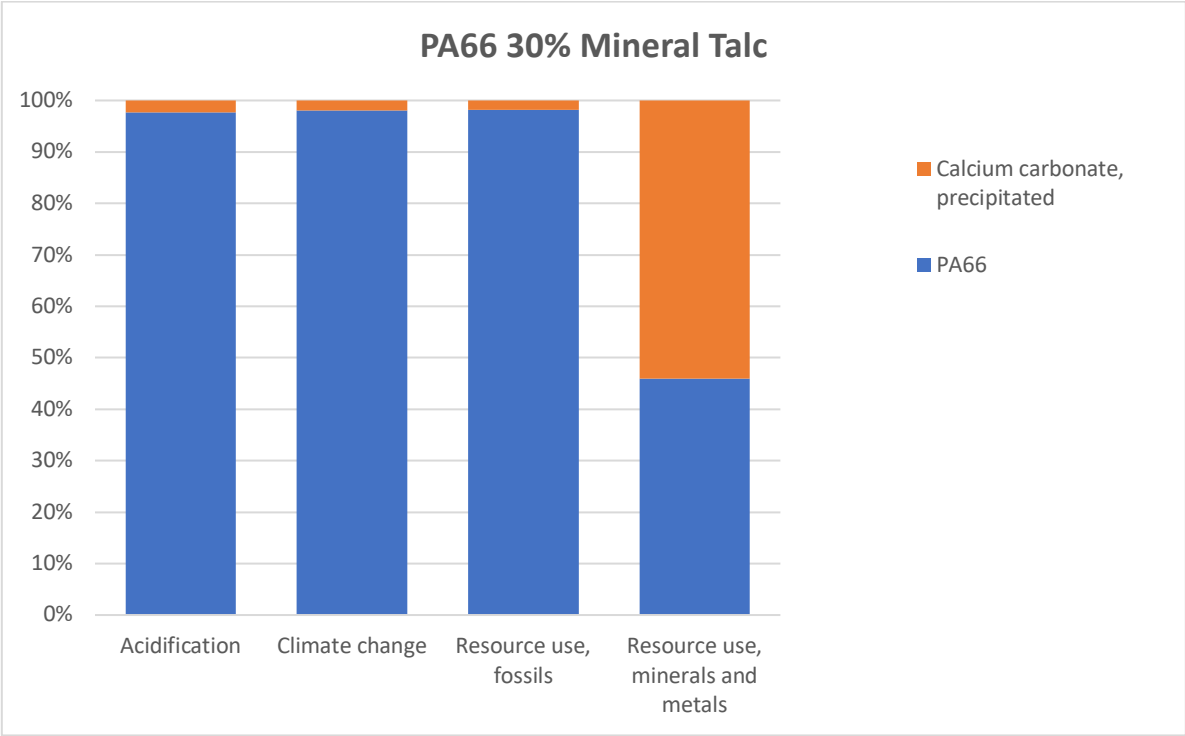
Figura 35: Resultados de producción de PA66 GF30 con SimaPro 9.5.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 36, observamos el análisis de impacto para la fabricación de talco mineral PA66 30%. La mayoría de sus contribuciones a las categorías de impacto seleccionadas provienen de la materia prima primaria o de mayor tamaño para su producción, que es el PA66 sin aditivos (70%). Cabe destacar que el uso de este mineral tiene un menor impacto en prácticamente cada una de las variables analizadas, representando lógicamente una mayor contribución en el agotamiento abiótico del uso de minerales.

Figura 36: Resultados de los impactos de las categorías de talco mineral PA66 30% con SimaPro 9.5.



Fuente: Elaboración propia.

En resumen, PA66 30% Talco demuestra el menor impacto de acidificación, lo que indica una ventaja ambiental potencial en términos de formación de lluvia ácida en comparación con PA66 y PA66 GF30. Además, PA66 30% talco mineral exhibe las emisiones de gases de efecto invernadero más bajas en términos de kg de CO2 equivalente, lo que sugiere que puede ser una opción más respetuosa con el medio ambiente para mitigar el cambio climático en comparación con PA66 y PA66 GF30. En el aspecto del uso de recursos, PA66 30% Talco requiere la menor cantidad de recursos fósiles, lo que muestra su potencial como una opción más sostenible en términos de consumo de energía durante su ciclo de vida. Además, PA66 30% Talco tiene un impacto mínimo en el uso de minerales y metales, lo que lo convierte en una opción prometedora para reducir el agotamiento de recursos en comparación con PA66 y PA66 GF30.

4.9 Modelación de herramienta

Para la modelación de la herramienta, se han considerado las ecuaciones cuadráticas mostradas en las gráficas 2, 4 y 6, este tipo de ecuaciones de segundo grado se expresan estas ecuaciones de esta manera $y=ax^2+bx+c$, en este caso para poder predecir la dureza del material $y= \text{dureza}$ y $x=\text{temperatura}$, de esta manera se realiza el modelo predictivo para cada una de ellas, debajo se describe el proceso para cada tipo de material y la manera de predecir la dureza en base a la temperatura deseada:

PA66 Sin cargas:

$$y = 0.0016x^2 - 0.9395x + 217.8$$

Dureza (y) = 0.0016 (a) temperatura deseada (x)² - 0.9395 (b) temperatura deseada (x) + 217.8 (c)

PA66 30% Talco mineral:

$$y = -0.0033x^2 + 1.791x - 161.8$$

Dureza (y) = -0.0033 (a) temperatura deseada (x)² + 1.71 (b) temperatura deseada (x) + 161.8 (c)

PA66 GF30:

$$y = -0.0079x^2 + 4.369x - 523.8$$

Dureza (y) = -0.0079 (a) temperatura deseada (x)² + 4.369 (b) temperatura deseada (x) - 523.8 (c)

Para poder ejecutar la fórmula y encontrar la temperatura a una dureza deseada, resulta en ecuaciones de un nivel complejo e inexacto, debido a que la variación usualmente se realiza en decimales de la unidad fija de temperatura, debido a ello con la aplicación de las fórmulas anteriormente mencionadas, se realizó un esquema de rangos de temperaturas estudiadas, por unidades completas sin decimales en escala shore D para cada material. En la figura 37, se observa la manera en la que se opera la herramienta.

Figura 37: Modelo de herramienta de predicción de dureza.

EcoPolyRate

Por favor seleccione una opción

Seleccione un material:

Solo para predecir dureza

Concepto	Valor	Unidad de medida
Temperatura de fusión deseada:		C
Dureza pronosticada:	0	Shore D

Solo para predecir temperatura

Concepto	Valor	Unidad de medida
Dureza deseada:		Shore D
Rango de temperatura pronosticada:		C

Análisis Ambiental

	Valor	Unidad de medida
Peso de la pieza		gr
Piezas Anuales		pieza
Total		0 kg
	Valor	Unidad de medida
Impacto en Acidificación Potencia		mol H+ eq
Impacto en Calentamiento Global		kg CO2 eq
Impacto en Agotamiento Abiótico (Fosiles)		MJ
Impacto en Agotamiento Abiótico (Metales y Minerales)		kg Sb eq

* Método de huella de carbono en SimaPro 9.5.0.1

** Datos obtenidos de evaluación del ciclo de vida de Ecoinvent 3.

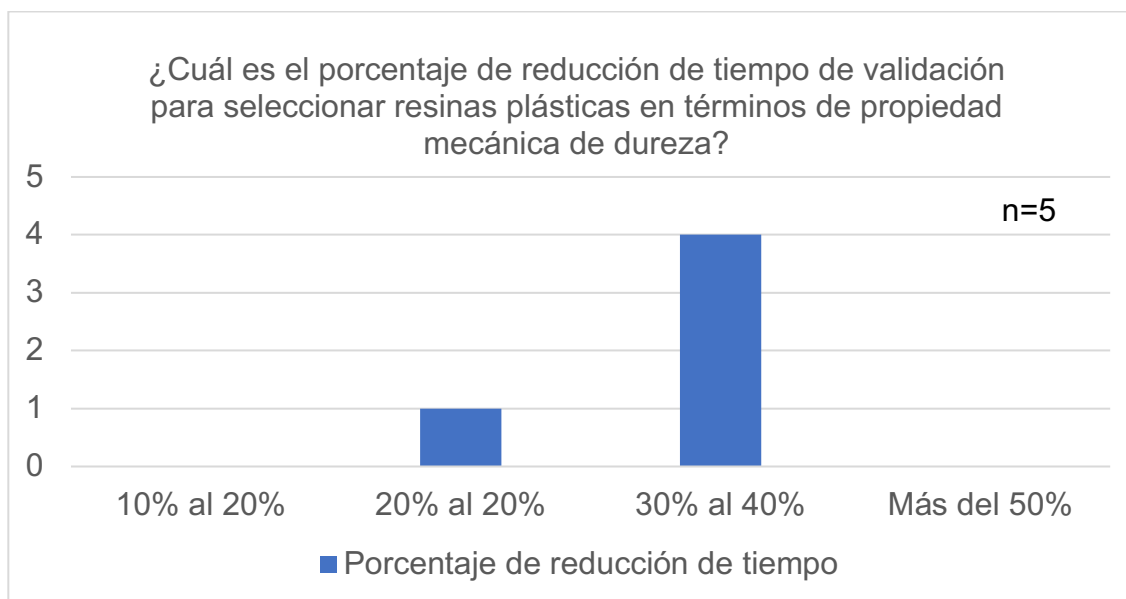
Fuente: Elaboración propia.

4.10 Validación de resultados

Siguiendo el proceso planteado en la metodología de la figura 16, una vez creada la herramienta se realizó una encuesta a un grupo focal, el cual está compuesto por 2 líderes de ingeniería y un ingeniero III (Sr), se incluye a la red de proveeduría de dicha empresa, la cual consta de 1 empresa ubicada en China a la cual le corresponde el 75% de los plásticos solicitados a esa región, 1 empresa ubicada en el norte de México a la cual se le atribuye el 80% de los plásticos solicitados en México, que en conjunto suman el 70% del consumo mensual de piezas creadas con polímeros de dicha organización. Por último, también fue considerada la organización en donde se facilitó el estudio experimental de las pruebas para la creación de la herramienta en el país de Portugal por su relevancia en el mercado automovilístico y metal mecánico.

El instrumento creado para realizar el grupo focal se centra en buscar cual es la mejora de los tiempos de validación de resinas plásticas al utilizar la herramienta propuesta, la facilidad de su uso, recomendaciones que se tengan para su mejora en el futuro. Los resultados de la encuesta se muestran a continuación en la figura 38, donde se puede observar que los tiempos de validación de resina plástica se optimizan en promedio en un 30-40%, lo cual representa un gran avance y significancia económica al reducir casi a la mitad el tiempo de validación de las resinas plásticas.

Figura 38: Porcentaje de reducción de tiempo de validación para seleccionar resinas plásticas en términos de propiedad mecánica de dureza



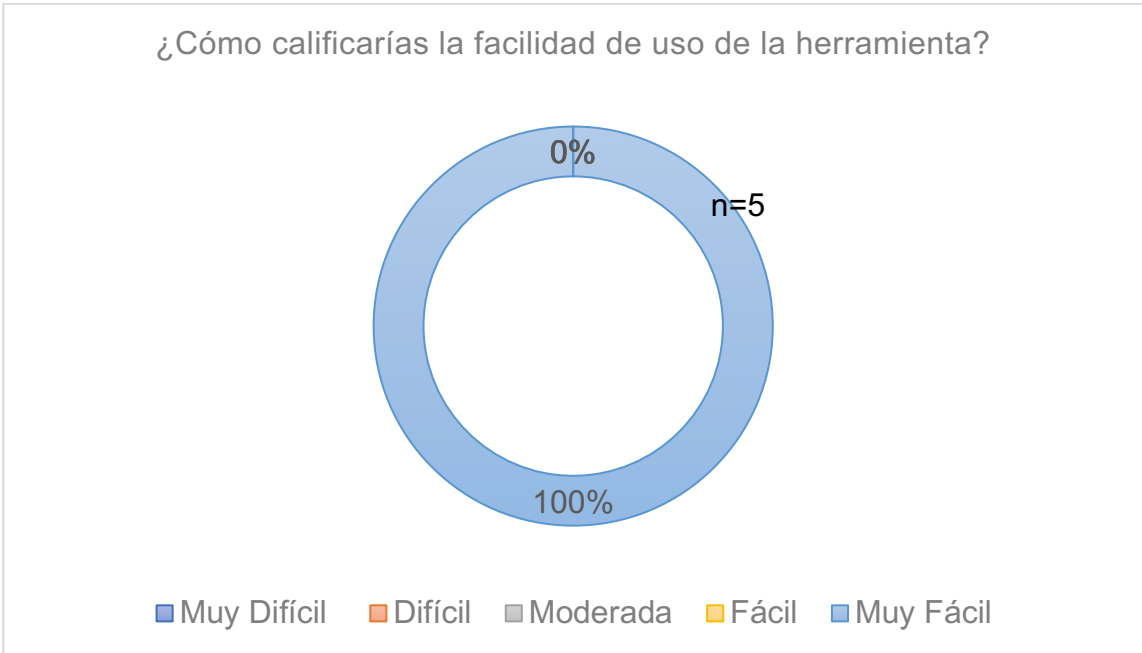
Fuente: Elaboración propia.

Como se observó en el apartado 1.1, el tiempo que le toma a la organización es de 30.43 días hábiles, de acuerdo con datos de Glassdor Mexico (2023), el salario promedio de un ingeniero de diseño y validación en la ciudad de Mexicali, Baja California es de \$1,166.00 pesos mexicanos diarios, lo cual representaba solamente en salarios sin contar gastos de operación y amortización de equipos, en un monto de \$35,481.38 pesos mexicanos el validar solo una resina plástica, contemplando una homologación de salario entre empresa objeto de estudio y red de proveeduría de esta última.

Asumiendo que el porcentaje de reducción de tiempo de validación de resinas plásticas es del 40%, con el empleo de esta herramienta, dicho lapso se reduce a 21.73 días hábiles y un costo de \$24,337.18 pesos mexicanos, representando un ahorro en costos de \$10,144.20 pesos mexicanos, al realizarse este proceso en promedio 1.5 veces por ingeniero de manera anual (Accuride, 2023) lo que equivale a 9 veces en promedio al año, se traduce en un ahorro anual de \$91,297.80 pesos mexicanos.

Respecto a la facilidad y practicidad de la herramienta el 100% del grupo focal estuvo de acuerdo en que es “muy fácil” manejar, detallado en la figura 39, de esta manera se asegura que el entendimiento de la funcionalidad de esta sea claro para todo aquel que llegue a operarla.

Figura 39: Facilidad de uso de la herramienta propuesta



Fuente: Elaboración propia.

Para concluir con la validación de la herramienta con el grupo focal, fue cuestionado acerca de sus comentarios respecto a la mejora que pudiera tener este instrumento de apoyo en el futuro, se muestran en la tabla 31 a manera abierta al ser datos de carácter cualitativo.

Tabla 32: Comentarios del grupo focal de la herramienta propuesta.

Usuario	Comentarios
<i>Empresa de estudio</i>	Ampliar la base de datos a otras resinas diferentes a PA66 haría esta herramienta esencial para los diseñadores de producto.
	Brindar los datos de impacto ambiental de manera explícita. Tal vez haciendo comparaciones contra otras resinas diferentes a PA66 o contra casos prácticos documentados (en términos de estabilidad de los ecosistemas y la biodiversidad)
	Excelente Herramienta, ayuda a optimizar proceso de información respecto a dureza y temperatura obteniendo resultados comprobables.
	Uso practico ambiental de manera estadística y evaluar el impacto.
<i>Empresa en China</i>	Es excelente para optimizar los datos de dureza y temperatura con resultados verificables y admite evaluaciones ambientales prácticas.
<i>Empresa en México</i>	Es de beneficio conocer el impacto que se genera en el ecosistema, nos gustaría ver la base de datos con otras resinas y no solo con PA66.
<i>Empresa en Portugal</i>	Las aplicaciones automotrices apenas se ven impulsadas por la dureza de la superficie, o incluso con la dureza de la superficie como factor principal.

Varias otras propiedades suelen ocupar un lugar anterior a la dureza de la superficie, estructurales, tribológicas dentro de las mecánicas o de densidad, resistencia o retardo a la llama, emisiones, dentro de las físicas y/o químicas. Y, sobre todo, el precio, entre polímeros técnicos equivalentes de primera categoría.

Además, en el sector automovilístico, con mucha frecuencia, incluso para aquellos de nosotros que trabajamos en campos de suministro de servicios completos con capacidades de diseño en nuestro ámbito, las materias primas suelen ser exigidas por los principales fabricantes de equipos originales.

Los datos relacionados con el medio ambiente están empezando a ser clave, prosperando a través de las emisiones equivalentes de CO2 como una forma de traducir las emisiones del efecto invernadero en los diferentes alcances, pero pronto ampliándose a diferentes impactos.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 31, los comentarios son tanto favorables como críticos respecto a la herramienta. Estos comentarios se centran en la necesidad de seguir evaluando el impacto ambiental de los materiales poliméricos y el interés en obtener información sobre otros tipos de materiales, así como en la evaluación de diferentes propiedades mecánicas. La metodología propuesta por esta herramienta para evaluar las propiedades mecánicas abre nuevas vías de investigación, al permitir la recopilación de datos necesarios para obtener conclusiones estadísticamente firmes sobre las propiedades mecánicas de los materiales bajo distintos parámetros de moldeo.

Capítulo V: Discusión

En este capítulo se discuten hallazgos, así como comparaciones con la literatura y las contribuciones realizadas durante el presente estudio.

5.1 Relación de los parámetros de moldeo y la dureza de los polímeros.

La temperatura, tal como lo describen más del 90% de los autores de la literatura presentada en este estudio, como lo son A Traxler et al. (2023), Açıkbaş et al. (2022), Zhou et al. (2022), Hu (2022) y Garbacz et al. (2021), (resumen en la tabla 11), demuestra la importancia y la significancia de este parámetro en los efectos que genera sobre los polímeros en sus propiedades mecánicas. Como se describió en los capítulos I, II y III, para el método experimental del desarrollo de la herramienta, el manejo de esta fue la base para el modelo predictivo validado con el análisis de varianza, encontrándose que existe una fuerte relación entre la alteración de esta y la dureza de los materiales polímeros estudiados.

Se observó que, al pasar de un estado sólido a uno líquido, los polímeros se reagrupan para formar la figura del molde; al solidificarse y enfriarse, cristalizan de diferente manera a distintas temperaturas, lo que da como resultado variaciones en sus propiedades mecánicas tal como lo describen los autores Carrupt & Piedade (2021), Rachid et al. (2020) y Koffi et al. (2021). En este estudio solo se evaluó la dureza, sin embargo, se infiere que se alteran todas las propiedades debido a su estrecha relación entre ellas. Además, se encontró que una diferencia de +/- 5 grados centígrados no genera una diferencia significativa en los resultados finales, por lo que se recomienda emplear cambios de temperatura en su transición por el tornillo en múltiplos de 10 grados centígrados, si bien esto no se detalla en la literatura, mediante el proceso experimental se concluye esta cifra, siendo este un aporte adicional al conocimiento científico sobre el proceso de moldeo de inyección plástica.

Como se observó en las Tablas 07-11, los autores de manera teórica y práctica denotaban que la dureza de los materiales polímeros estaba estrechamente ligada con la temperatura a la cual se moldeaban las piezas en las máquinas inyectoras de plástico, lo cual el presente estudio reafirmó de manera experimental. Los resultados del ANOVA (Tablas 28 y 30) brindan claridad sobre el interés de la comunidad científica internacional, autores como ejemplo Ghani et al. (2003) y Kramar & Cica (2017) enfocaron sus estudios basados en modelos matemáticos para encontrar la relación entre las propiedades mecánicas y optimización del proceso de moldeo por inyección plástica. Esta información en conjunto permite a los diseñadores saber que la temperatura a la cual se manufacturan las piezas plásticas y la naturaleza de los propios materiales están estrechamente ligadas a la dureza de estos mismos, permitiendo enfocar el diseño conforme a las necesidades del mercado y la sociedad, al tener esta información de primera mano.

Con la información recabada de los datos de las muestras, se encontró que los tiempos de llegada del polímero por el corredor a la cavidad representan una constante que debe mantenerse dentro del molde al momento de inyectarse para poder establecer las propiedades deseadas. Cualquier alteración de estos factores puede llevar a una rápida cristalización del polímero, lo que puede generar carbonización del material previo o durante su proceso de moldeo, este dato lo refuerzan en su investigación Carrupt & Piedade (2021). Esta herramienta permite identificar posibles escenarios negativos, relacionados con la calidad, se pueden presentar dentro de la producción en masa de lotes de producción de plásticos, así como posibles causas y soluciones con un entendimiento lógico de la influencia de los parámetros en el proceso de moldeo. Por lo tanto, la herramienta no solo es de ayuda para el diseño, sino que también es eficaz para encontrar problemas durante la manufactura de algún producto en base a moldeo de inyección que se encuentre en fase de producción en masa (tabla 33).

5.2 Comparación de propiedades de dureza de las variables de resina.

Una vez modelado el experimento, determinando que la temperatura de fusión en la de zona medición (zona 3, figura 28) sería la variable para modificar y que todos los demás parámetros de la tabla 18 permanecerían constantes, se encontró que las resinas analizadas (PA66 sin cargas, PA66 GF30 y PA66 con 30% de talco mineral) tenían durezas relativamente similares (detalle en la figura 31), siendo en promedio de 76-77 shore D. La dureza de la resina PA66 sin cargas resultó inferior a sus variables con aditivos, que en promedio ambas tenían 79-80 shore D, lo que implica que esta primera tiene una tendencia a ser más flexible y menos frágil ante los impactos, proporcionando al diseñador un aspecto clave a considerar en la aplicación del componente plástico que desea manufacturar.

El objetivo de esta herramienta no solo radica en conocer cómo se comporta el material a distintas temperaturas respecto a la dureza, sino que también pretende informar al diseñador sobre su impacto en el medio ambiente. Si bien los otros materiales, PA66 GF30 y PA66 30% talco mineral, pueden resultar con un mayor grado de rigidez, si la aplicación del componente plástico lo permite, se puede tomar en cuenta los resultados de la evaluación del ciclo de vida para tomar decisiones sobre la elección de material para manufactura en masa.

5.3 Evaluación del ciclo de vida y concientización del impacto en el medio ambiente del uso de los plásticos.

Como lo menciona Amato (2011), la comunidad global empezó a generar conciencia sobre el uso de los plásticos con mayor auge desde 1990. Las preocupaciones actuales no solo se enfocan en los efectos negativos que se crean en el medio ambiente, sino también en las repercusiones sobre el cuerpo humano. En el marco del cumplimiento de la agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre la sostenibilidad de los recursos, la cadena de suministro y la

innovación industrial, es importante recalcar que la presente herramienta se muestra como una opción para las industrias que deseen utilizarla para mejorar el uso de los recursos, cuidando la huella de carbono en el medio ambiente y cumpliendo con las exigencias de la sociedad actual.

La herramienta es capaz de realizar un análisis de ciclo de vida enfocado en la revisión del impacto de la explotación del recurso hasta la entrega en fábrica de manufactura, considerando los parámetros de calentamiento global, agotamiento abiótico y acidificación. Los diseñadores pueden enfocar sus recursos y selección de materiales en aquellos que sean más amigables con el medio ambiente, siempre que las aplicaciones lo permitan. Otro beneficio esperado con la herramienta es que, si se elige un material amigable con el medio ambiente, puede generar un valor agregado al producto en el mercado.

Como se muestra en la figura 37, dentro de las configuraciones del alcance de evaluación del ciclo de vida, el análisis se enfoca en la manufactura de la resina hasta su entrega en la planta de manufactura del componente plástico, sin considerar el impacto en su desecho, ya que esto depende del tipo de pieza que se pretende fabricar. Los resultados indican que el material más amigable con el medio ambiente es el PA66 30% talco mineral, que presenta durezas similares, pero superiores a las del PA66 GF30 (figura 30). Esto se debe a que la extracción de calcio borato necesario para la producción del talco mineral es menos contaminante que la fibra de vidrio del PA66 GF30, como se muestra en la figura 36. En conclusión, el PA66 30% talco mineral tiene un menor impacto en el medio ambiente en términos de su producción.

5.4 Validación de resultados y eficacia del modelo predictivo

El ANOVA realizado, corroborado mediante corridas de validación y utilizando los softwares Microsoft Excel y Minitab, la relación estrecha entre las variables influyen en los resultados finales del comportamiento de un material en cuanto a sus propiedades mecánicas. Para este estudio, el análisis se enfocó en validar teóricamente la información obtenida respecto a la dureza del material. Aunque la investigación se centra en la dureza, el método también puede aplicarse para validar otras propiedades, ampliando así el alcance de la investigación. Esto deja abierta la posibilidad de futuros desarrollos según las necesidades de la industria global.

El estudio demuestra en la tabla 29 la validez del modelo de la herramienta, con un coeficiente de determinación (R^2) superior al 85%, lo que indica la fiabilidad de los datos de predicción y, de forma probabilística, la validación de la información obtenida.

A pesar de que el coeficiente de determinación resultó en un 85% de fiabilidad, en las pruebas documentadas en las corridas de validación de la tabla 31 se

encuentra que la variabilidad respecto a la herramienta es menor al 5%. Esto, para efectos de toma de decisiones, no es representativo, lo cual demuestra la eficacia del diseño de experimentos planteado para la creación de la herramienta. Los resultados del experimento resultan prometedores para evaluar otras propiedades mecánicas y su relación con el resto de los parámetros y variables dentro del moldeo por inyección plástica.

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones

A lo largo de la extensión del presente estudio, se ha identificado y analizado a profundidad el proceso de moldeo por inyección de plástico y cómo múltiples de sus variables pueden afectar las propiedades mecánicas de los materiales. De acuerdo con la literatura, se ha determinado que la temperatura y sus controles dentro del proceso de moldeo son clave para el comportamiento de los polímeros una vez son manufacturados. Si bien existen múltiples propiedades mecánicas, una de las cruciales, que depende directamente de su grado de cristalización, es la dureza. De acuerdo con varios autores, entre ellos Carrupt & Piedade (2021) y Fu & Ma (2019), esta propiedad es clave estudiarla en relación con los parámetros que se tienen durante el proceso.

Asimismo, se destaca el interés de la comunidad científica por comprender y documentar el efecto de los aditivos naturales en las resinas plásticas con el objetivo de igualar o mejorar el comportamiento de las piezas a base de polímeros y reducir su impacto en el medio ambiente, tal como se describe en la agenda del 2030 de las Naciones Unidas para frenar el impacto del calentamiento global causado por la huella de carbono del ser humano.

Recordando que el objetivo principal de esta investigación es diseñar una herramienta que optimice el análisis de comparación de resinas mejorando los tiempos de respuesta para seleccionar una resina plástica, los resultados demuestran que el objetivo se ha cumplido, ya que se ha desarrollado una herramienta que efectúa esta función, generando así un producto adicional a la investigación con aplicabilidad en la industria en general y aportando al desarrollo de este sector a nivel nacional e internacional. Los resultados del ANOVA y el modelo predictivo establecen un coeficiente de determinación del 85% de fiabilidad; en las pruebas documentadas en las corridas de validación de la tabla 31, se encuentra que la variabilidad respecto a la herramienta es menor al 5%. Esto, para efectos de toma de decisiones, no es representativo, lo cual demuestra la eficacia del diseño de experimentos planteado para la creación de la herramienta.

Con relación con los objetivos específicos, se cumple la comparación de propiedades mecánicas entre las resinas PA66, PA66 GF30, y PA66 con 30% de talco mineral, destacando que la herramienta permite evaluar la dureza de las distintas resinas y concluir que el PA66 con 30% de talco mineral muestra un comportamiento favorable tanto en resistencia como en impacto ambiental. Además, se generó un listado de requisitos mínimos comparables que facilita la identificación de una resina alternativa, ofreciendo un enfoque estructurado y objetivo para la selección de materiales. Igualmente, se ha evaluado la relación entre los parámetros de moldeo y las propiedades mecánicas de las resinas plásticas comparadas, confirmando que el control de la temperatura y otros factores del proceso de moldeo afecta de manera significativa la dureza de las piezas finales. Finalmente, el diseño y validación de la herramienta de comparación fue realizado considerando tanto los parámetros de entrada identificados en el estado del arte

como las propiedades mecánicas finales deseadas en el componente, validando su aplicabilidad mediante un análisis estadístico.

Las pruebas presentadas en la figura 40 confirman que la hipótesis planteada inicialmente, que estimaba reducir los tiempos de validación en un 40%, fue cumplida, y de acuerdo con los datos obtenidos del grupo focal, el 80% de los encuestados estuvo de acuerdo con dicha cifra. De esta manera, se confirma la aplicabilidad y eficacia de la herramienta, lográndose un ahorro anual en salarios de \$91,297.80 pesos mexicanos en una homologación salarial entre la empresa y la red de proveeduría, sin contemplar gastos de operación y amortización de equipos.

Los hallazgos de esta investigación tienen importantes implicaciones para las industrias que utilicen piezas plásticas en sus productos terminados y para el sector manufacturero de plástico en general. No solamente validan el conocimiento existente, sino que también permiten que usuarios no familiarizados con los polímeros puedan hacer uso de la herramienta y fundamentar sus diseños en el sustento científico que esta proporciona.

A pesar de las limitaciones encontradas, que incluyen capacidad económica y de tiempo para efectuar más pruebas con otros materiales y analizar propiedades mecánicas adicionales, así como accesibilidad a diferentes instalaciones de producción, esta investigación ha logrado crear una herramienta funcional que permite predecir la dureza de los polímeros estudiados y facilita un análisis integral de sus efectos en el medio ambiente. Además, se documenta un proceso en el que se analiza y estudia la propiedad mecánica de dureza con validez estadística, ofreciendo un protocolo base que puede replicarse para el estudio de otras propiedades mecánicas, definiendo el proceso y metodología a emplear para dicho análisis. Sin duda, esta contribución es clave para el desarrollo de herramientas futuras en el ámbito de la ingeniería de materiales.

A partir de los resultados obtenidos, se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en el estudio de otros polímeros, tanto con aditivos naturales como sintéticos, con aplicaciones en los sectores automotriz y aeroespacial. Además, se considera valioso actualizar los resultados del análisis de ciclo de vida a una escala global, con el objetivo de contar con medidas más realistas sobre el impacto ambiental. Es crucial comprender los cambios moleculares que ocurren en la transición de los materiales con los efectos del proceso de moldeo de inyección, profundizando en los efectos atómicos que tienen en el flujo de los materiales.

Es esencial que estos hallazgos impulsen la conciencia sobre el impacto ambiental de los plásticos en la manufactura a gran escala, promoviendo la creación de productos que igualen o mejoren las propiedades mecánicas con menor impacto ambiental. Como se determinó en los estudios de evaluación de ciclo de vida, dentro de las configuraciones de alcance, el PA66 con 30% de talco mineral es el material más amigable con el medio ambiente, presentando durezas superiores a las del PA66 GF30. Si bien el PA66 sin cargas tiene una dureza inferior, no por ello es

menos contaminante. En conclusión, el PA66 con 30% de talco mineral resulta ser la opción más sostenible en términos de producción.

Finalmente, esta investigación muestra el proceso del moldeo por inyección plástica, subrayando su importancia y efectos sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento de las piezas de plástico. Además, proporciona un panorama claro de cómo añadir valor a la cadena de suministros mediante el análisis de ciclo de vida. Es imperativo que el sector manufacturero e industrial en general reúnan esfuerzos para reducir la huella de carbono, preservando nuestro hogar, la Tierra.

Bibliografía

- 1) Accuride International. (10 de 11 de 2022). Empleo Nuevo. Obtenido de Sr. Mechanical Design Engineer: <https://www.empleonuevo.com/empleo/baja-california/mexicali/sr-mechanical-design-engineer/26a728d9-2137-41f5-b913-2076723b53cc>
- 2) Acerca de Deloitte. (2015, febrero 9). Deloitte Paraguay. <https://www2.deloitte.com/py/es/pages/careers/articles/acercadedeloitte.html>
- 3) Açıkbaş, G., Özcan, S., & Çalış Açıkbaş, N. (2018). Production and characterization of a hybrid polymer matrix composite. *Polymer Composites*, 39(11), 4080–4093. <https://doi.org/10.1002/pc.24471>
- 4) Afiqah Hamzah, N., Razak, N. A. A., Sayuti Ab Karim, M., & Gholizadeh, H. (2021). A review of history of CAD/CAM system application in the production of transtibial prosthetic socket in developing countries (from 1980 to 2019). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine*, 235(12), 1359–1374. <https://doi.org/10.1177/09544119211035200>
- 5) "Agrawal, A. R., Pandelidis, I. O., & Pecht, M. (1987). Injection-molding process control—A review. *Polymer Engineering & Science*, 27(18), 1345–1357. <https://doi.org/10.1002/pen.760271802>
- 6) Alhallak, L. M., Tirkes, S., & Tayfun, U. (2020). Mechanical, thermal, melt-flow and morphological characterizations of bentonite-filled ABS copolymer. *Rapid Prototyping Journal*, 26(7), 1305–1312. <https://doi.org/10.1108/rpj-12-2019-0321>
- 7) Altan, M. (2010). Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods. *Materials in Engineering*, 31(1), 599–604. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.049>
- 8) Amran Md Ali, M., Idayu, N., Izamshah, R., Shahir Kasim, M., Shukor Salleh, M., & Sivarao. (2018). Multiobjective optimization of injection moulding process parameters on mechanical properties using Taguchi method and Grey Relational Analysis. *International journal of engineering & technology*, 7(3.7), 14. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.7.16196>
- 9) Andrzejewski, J., Danielak, A., Piasecki, A., Islam, A., & Szostak, M. (2023). Biocarbon-based sustainable reinforcing system for technical polymers. The structure-properties correlation between polycarbonate (PC) and polybutylene terephthalate (PBT)-based blends containing acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS). *Sustainable Materials and Technologies*, 36(e00612), e00612. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00612>
- 10) Aumentan 300% costos de fletes por crisis global de escasez de contenedores. (2021, junio 18). *Com.mx*. <https://t21.com.mx/maritimo-2021-06-18-aumentan-300-costos-fletes-crisis-global-escasez-contenedores/>
- 11) Banxico. (2020). Banxico Educa. Obtenido de ¿Por qué aumentan los precios?: http://educa.banxico.org.mx/banco_mexico_banca_central/politica-monetaria-banco-mexi.html

- 12) Basso, M., Pupure, L., Simonato, M., Furlanetto, R., De Nardo, L., & Joffe, R. (2019). Nonlinear creep behaviour of glass fiber reinforced polypropylene: Impact of aging on stiffness degradation. *Composites. Part B, Engineering*, 163, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.052>
- 13) Bataineh, O. M., & Klamecki, B. E. (2005). Prediction of local part-mold and ejection force in injection molding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(3), 598–604. <https://doi.org/10.1115/1.1951785>
- 14) Bozzelli, J. (2017, abril 1). Entendiendo la relación de intensificación en moldeo por inyección. *Plastics Technology México*. <https://www.pt-mexico.com/columnas/como-comprender-la-relacion-de-intensificacion>
- 15) Brizuela Guerra, N., Ferreira, E., Duarte, J., Weber, J. S., Zeni, M., Figueroa, C. A., & Michels, A. F. (2023). Effect of hydration conditions in thermal and mechanical properties of injection-molded glass fiber/polyamide-6. *Polymer Bulletin* (Berlin, Germany), 80(4), 3761–3774. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04111-7>
- 16) Carrupt, M. C., & Piedade, A. P. (2021). Modification of the cavity of plastic injection molds: A brief review of materials and influence on the cooling rates. *Materials*, 14(23), 7249. <https://doi.org/10.3390/ma14237249>
- 17) Černý, M., Petruš, J., & Chamradová, I. (2023). The influence of porosity on mechanical properties of PUR-based composites: Experimentally derived mathematical approach. *Polymers*, 15(8), 1960. <https://doi.org/10.3390/polym15081960>
- 18) Ceskova, M., & Lenfeld, P. (2018). Polymer cavity made by freeformer® 3d printer: An influence on injection moulded parts. *MM Science Journal*, 12(2018), 2710–2714. https://doi.org/10.17973/mmsj.2018_12_2018125
- 19) Chen, J., Deng, C., Hong, R., Fu, Q., & Zhang, J. (2020). Effect of thermal annealing on crystal structure and properties of PLLA/PCL blend. *Journal of Polymer Research*, 27(8). <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02206-1>
- 20) Chu, W.-S., Kim, M.-S., Jang, K.-H., Song, J.-H., Rodrigue, H., Chun, D.-M., Cho, Y. T., Ko, S. H., Cho, K.-J., Cha, S. W., Min, S., Jeong, S. H., Jeong, H., Lee, C.-M., Chu, C. N., & Ahn, S.-H. (2016). From design for manufacturing (DFM) to manufacturing for design (MFD) via hybrid manufacturing and smart factory: A review and perspective of paradigm shift. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(2), 209–222. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0028-0>
- 21) Cobián Romero, L. (2012). Valores críticos para la evaluación de una empresa que inicia (START-UP) con opciones reales de crecimiento [Colegio de Postgraduados]. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/688>
- 22) COVID-19: Orchestrating the recovery of organizations and supply chains. (2020, marzo 26). Deloitte Canada. <https://www2.deloitte.com/ca/en/pages/finance/articles/covid-19-orchestrating-recovery-of-organizations-supply-chains.html>

- 23) CyFrame, E. P. (s/f). Ciclo de Moldeo: Medida de rendimiento crítica – CyFrame. Cyframe.com. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de <https://www.cyframe.com/es/tiempo-del-ciclo-de-moldeo/>
- 24) De Rosa, C., & Auriemma, F. (2013). Crystals and crystallinity in polymers: Diffraction analysis of ordered and disordered crystals. John Wiley & Sons.
- 25) Dhaduti, S. C., Sarganachari, S. G., Patil, A. Y., & Yunus Khan, T. M. (2020). Prediction of injection molding parameters for symmetric spur gear. *Journal of Molecular Modeling*, 26(11). <https://doi.org/10.1007/s00894-020-04560-9>
- 26) Diaz del Castillo Rodriguez, F. (2012). UNAM OLIMPIA . Obtenido de Lecturas de Ingenieria 21 Conformado de Materiales Plasticos: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_me c/m6/conformado%20de%20plasticos.pdf
- 27) "Diseño de experimentos DOE ¿Qué es? Objetivos. (2017, enero 17). TCM Consultoría y Formación; Técnicas de Control Metrológico S.L. <https://www.tcmetrologia.com/blog/diseño-de-experimentos-2/>
- 28) Divya, H. V., Jeevan, T. P., Ashrith, H. S., & Rudresh, B. M. (2022). Effect of wood filler on the mechanical and thermal behavior of polypropylene/short glass/short carbon fiber-reinforced hybrid composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(7). <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03573-0>
- 29) "Economía, N. (s/f). 3er Informa del acuerdo Nacional para la Nueva Economía del plástico en México. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2023/01/TERCER-INFORME-ACUERDO-NACIONAL-1.pdf>
- 30) Ernst, L. J., Zhang, G. Q., Jansen, K. M. B., & Bressers, H. J. L. (2003). Time- and temperature-dependent Thermo-mechanical modeling of a packaging molding compound and its effect on packaging process stresses. *Journal of Electronic Packaging*, 125(4), 539–548. <https://doi.org/10.1115/1.1604156>
- 31) Farooque, R., Asjad, M., & Rizvi, S. J. A. (2021). A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 441–446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.967>
- 32) Farotti, E., & Natalini, M. (2018). Injection molding. Influence of process parameters on mechanical properties of polypropylene polymer. A first study. *Procedia Structural Integrity*, 8, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.027>
- 33) Fedulov, B. N. (2018). Modeling of manufacturing of thermoplastic composites and residual stress prediction. *Aerospace Systems*, 1(2), 81–86. <https://doi.org/10.1007/s42401-018-0018-8>
- 34) Feng, Q., Liu, L., & Zhou, X. (2020). Automated multi-objective optimization for thin-walled plastic products using Taguchi, ANOVA, and hybrid ANN-MOGA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1–2), 559–575. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04488-2>
- 35) Gao, Y., & Wang, X. (2008). An effective warpage optimization method in injection molding based on the Kriging model. *The International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology, 37(9–10), 953–960.
<https://doi.org/10.1007/s00170-007-1044-6>
- 36) Garbacz, Ł., Klepka, T., & Longwic, F. (2021). The influence of the aging process on the change of selected strength properties of polypropylene compositions with mineral fillers. *Advances in Science and Technology – Research Journal*, 15(2), 65–74. <https://doi.org/10.12913/22998624/135512>
- 37) Ghani, J. A., Choudhury, I. A., & Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 84–92. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00865-3](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00865-3)
- 38) Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., Plamondon, M., & Lura, P. (2019). On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 115, 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.015>
- 39) Giboz, J., Copponex, T., & Mélé, P. (2007). Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review. *Journal of micromechanics and microengineering: structures, devices, and systems*, 17(6), R96–R109. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/6/r02>
- 40) Harrington, H. J., & Voehl, F. (2016). *The innovation tools handbook, volume 2*. Productivity Press.
- 41) Hinojosa, R. (2018). *Introducción Al Proceso de Moldeo Por Inyección de Plásticos*. Independently Published.
- 42) Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262(113640), 113640. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- 43) Hu, W.-B. (2022). Polymer features in crystallization. *Chinese Journal of Polymer Science*, 40(6), 545–555. <https://doi.org/10.1007/s10118-022-2710-8>
- 44) Hurtado, F. A. (2005). *Gestión y auditoría de la calidad para organizaciones públicas: normas NTCGP 1000:2004 conforme a la ley 872 de 2003*. Universidad de Antioquia.
- 45) Janostik, V., Stanek, M., Manas, D., Manas, M., & Senkerik, V. (2016). The Influence of runner system on production of injection molds. *MATEC web of conferences*, 76, 02022. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167602022>
- 46) Jasso, S. G. R. (2009). *Moldeo por inyección de doble disparo [Centro de Investigación de Química Aplicada]*. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/417/1/Samantha%20Guadalupe%20Rios%20Jasso.pdf>
- 47) Jiun, Y. L., Tze, C. T., Moosa, U., & Tawawneh, M. A. (2016). Effects of recycling cycle on used thermoplastic polymer and thermoplastic elastomer polymer. *Polymers and Polymer Composites*, 24(9), 735–740. <https://doi.org/10.1177/096739111602400909>
- 48) Kanbur, B. B., Suping, S., & Duan, F. (2020). Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review. *The International*

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106(7–8), 3253–3271. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04697-9>
- 49) Karagöz, İ. (2019). Hardness change due to carburization time and material thickness during heat treatment of SAE 8620 (21NiCrMo2) plates. *Obtenido de Dergi Park*: <https://doi.org/10.31202/ecjse.578057>
- 50) Kashyap, S., & Datta, D. (2015). Process parameter optimization of plastic injection molding: a review. *International Journal of Plastics Technology*, 19(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9115-2>
- 51) Kent, R. (2016). *Quality management in Plastics Processing*. Elsevier.
- 52) Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J.-Y. (2011). A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry*, 62(7), 684–692. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.04.003>
- 53) Khan, M., Afaq, S. K., Khan, N. U., & Ahmad, S. (2014). Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design. *ISRN Mechanical Engineering*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/968484>
- 54) Koffi, A., Koffi, D., & Toubal, L. (2021). Mechanical properties and drop-weight impact performance of injection-molded HDPE/birch fiber composites. *Polymer Testing*, 93(106956), 106956. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106956>
- 55) Kondratiev, A., Píštěk, V., Vambol, O., Otrosh, Y., Kučera, P., & Kučera, O. (2022). Determination of the composite panel moulding pressure value. *Polymers*, 14(12), 2392. <https://doi.org/10.3390/polym14122392>
- 56) Kusić, D., & Hančić, A. (2016). Influence of molding conditions on the shrinkage and warpage behavior of standardized test specimens. *AIP Conference Proceedings*.
- 57) Kyzy, B. K., Lanzutti, A., Magnan, M., Rondinella, A., Simonato, M., Furlanetto, R., & Fedrizzi, L. (2021). Creep study of glass reinforced polypropylene: Effect of temperature and presence of notches. *Engineering Failure Analysis*, 128(105624), 105624. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105624>
- 58) Lopez, R. H. (2018). *Repositorio de Recursos Digitales Unid. Obtenido de Los Bloques Económicos en la Globalización*: https://brd.unid.edu.mx/recursos/ADI_MI/MI03/Los_bloques_economicos_en_la_globalizacion.pdf
- 59) Luo, J., Liang, Z., Zhang, C., & Wang, B. (2001). Optimum tooling design for resin transfer molding with virtual manufacturing and artificial intelligence. *Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing*, 32(6), 877–888. [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(00\)00147-0](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(00)00147-0)
- 60) Maito, E. E., & Universidad de Buenos Aires. (2016). Distribución del ingreso, rotación del capital y niveles de rentabilidad. *Economía teoría y práctica*, 45. <https://doi.org/10.24275/etypuam/ne/452016/maito>
- 61) Marković, Z. M., Kováčová, M., Jeremić, S. R., Nagy, Š., Milivojević, D. D., Kubat, P., Kleinová, A., Budimir, M. D., Mojsin, M. M., Stevanović, M. J., Anušová, A., Špitalský, Z., & Todorović Marković, B. M. (2022). Highly efficient antibacterial polymer composites based on hydrophobic riboflavin

- carbon polymerized dots. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 12(22), 4070. <https://doi.org/10.3390/nano12224070>
- 62) McGraw-Hill Interamericana. (2014). *Introducción a los procesos de manufactura* (1a ed.). Mexico.
- 63) Medrano, J. A. M. (2017). *Fundamentos De Medición Y Control De Procesos*. Palibrio.
- 64) Meikle, J. L. (1997). *American Plastic: A Cultural History*. Rutgers University Press.
- 65) Méndez, J. E. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*. Mexico: Trillas.
- 66) "Mettler-Toledo International Inc. all rights reserved. (2021, mayo 10). Melting point of rubber. Mettler-Toledo International Inc. all rights reserved. <https://www.mt.com/mx/es/home/library/applications/lab-analytical-instruments/melting-point-of-rubber.html>
- 67) "Mittal, P., Naresh, S., Luthra, P., Singh, A., Dhaliwal, J. S., & Kapur, G. S. (2019). Polypropylene composites reinforced with hybrid inorganic fillers: Morphological, mechanical, and rheological properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32(6), 848–864. <https://doi.org/10.1177/0892705718785674>
- 68) Mohd Radzuan, N. A., Khalid, N. N., Foudzi, F. M., Rajendran Royan, N. R., & Sulong, A. B. (2023). Mechanical analysis of 3D printed polyamide composites under different filler loadings. *Polymers*, 15(8), 1846. <https://doi.org/10.3390/polym15081846>
- 69) Mouhmid, B., Imad, A., Benseddiq, N., Benmedakhène, S., & Maazouz, A. (2006). A study of the mechanical behaviour of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: Experimental investigation. *Polymer Testing*, 25(4), 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.03.008>
- 70) Newell, J. A. (2010). *Ciencia de materiales: aplicaciones en ingeniería*.
- 71) Notta-Cuvier, D., Nciri, M., Lauro, F., Delille, R., Chaari, F., Robache, F., Haugou, G., & Maalej, Y. (2016). Coupled influence of strain rate and heterogeneous fibre orientation on the mechanical behaviour of short-glass-fibre reinforced polypropylene. *Mechanics of Materials: An International Journal*, 100, 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.06.013>
- 72) Ogorodnyk, O., & Martinsen, K. (2018). Monitoring and control for thermoplastics injection molding A review. *Procedia CIRP*, 67, 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.229>
- 73) Ozcelik, B., & Erzurumlu, T. (2006). Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 171(3), 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.120>
- 74) Páramo, J. J., Reveles Arredondo, J. F., Mora, H. P., & Gómez, E. A. (2019). Análisis de un proceso de inyección de plástico por interacción fluido estructural y cambio de estado. *Acta universitaria*, 29, 1–18. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2150>

- 75) Park, H.-S., & Dang, X.-P. (2017). Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. *Procedia Manufacturing*, 10, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.020>
- 76) Perfil, V. T. mi. (s/f). PROPIEDADES FISICAS. Blogspot.com. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-fisicas.html>
- 77) Plástico: producción mundial 1950-2021. (s/f). Statista. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de <https://es.statista.com/estadisticas/636183/produccion-mundial-de-plastico/>
- 78) Plásticos – Situación en 2020. (2021, noviembre 18). Plastics Europe ES. <https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plasticos-situacion-en-2020/>
- 79) Plásticos Universales. (3 de Julio de 2019). Interempresas. Obtenido de Gracias a China, Asia es líder en la industria mundial de los plásticos: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/247891-Gracias-a-China-Asia-es-lider-en-la-industria-mundial-de-los-plasticos.html>
- 80) Rahaman, K. (2020). Uniqueness of solution of upper convected maxwell flows through some uniform tubes. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1-3.
- 81) Romero, J. M. L. (2013). Transformación de materiales termoplásticos.
- 82) Rosales C., R. A. (18 de Agosto de 2018). El Economista. Obtenido de Baja California presenta el mayor crecimiento manufacturero del país: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Baja-California-presenta-el-mayor-crecimiento-manufacturero-del-pais-20210818-0143.html>
- 83) Rosato, D. V., Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2000). The complete injection molding process. En *Injection Molding Handbook* (pp. 1–27). Springer US.
- 84) Samouh, Z., Molnar, K., Boussu, F., Cherkaoui, O., & El Moznine, R. (2019). Mechanical and thermal characterization of sisal fiber reinforced polylactic acid composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(3), 529–537. <https://doi.org/10.1002/pat.4488>
- 85) Sang, L., Zheng, G., Hou, W., Yang, X., & Wei, Z. (2018). Crystallization and mechanical properties of basalt fiber-reinforced polypropylene composites with different elastomers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 134(3), 1531–1543. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7509-z>
- 86) Self-study templates. (2015, agosto 19). ABET. <https://www.abet.org/accreditation/accreditation-criteria/self-study-templates/>
- 87) Serope., K., Steven S. (2014). *Manufactura, ingeniería y tecnología Volumen 1* (7a ed.). Mexico: Pearson Educación.
- 88) Shackelford, J. F. (2006). *Introducción a la Ciencia de Materiales Para Ingenieros*. Pearson Educación.
- 89) Shen, C., Wang, L., & Li, Q. (2007). Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2–3), 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.036>

- 90)"Shinde, M. S., Ashtankar, K. M., Kuthe, A. M., Dahake, S. W., & Mawale, M. B. (2018). Direct rapid manufacturing of molds with conformal cooling channels. *Rapid Prototyping Journal*, 24(8), 1347–1364. <https://doi.org/10.1108/rpj-12-2016-0199>
- 91)Simo, J. C., Taylor, R. L., & Pister, K. S. (1985). Variational and projection methods for the volume constraint in finite deformation elasto-plasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 51(1–3), 177–208. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(85\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0045-7825(85)90033-7)
- 92)Singh, G., Pradhan, M. K., & Verma, A. (2018). Multi Response optimization of injection moulding Process parameters to reduce cycle time and warpage. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 8398–8405. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.534>
- 93)"Smith-Wong, K. (2021). A plastic revolution. *New Scientist* (1971), 250(3341), 31. [https://doi.org/10.1016/s0262-4079\(21\)01151-9](https://doi.org/10.1016/s0262-4079(21)01151-9)
- 94)Solanki, S. (2018). *Why materials matter: Responsible design for a better world*. Prestel.
- 95)"Solucionar la contaminación por plásticos aprovechando los conocimientos, las políticas y la innovación, con el fin de mejorar la vida de las personas. (s/f). World Bank. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2022/07/01/unpacking-the-plastics-challenge>
- 96)Sthle, L., & Wold, S. (1989). Analysis of variance (ANOVA). *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems: An International Journal Sponsored by the Chemometrics Society*, 6(4), 259–272. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80095-4](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80095-4)
- 97)"Sui, X., & Xie, X.-M. (2019). Creating super-tough and strong PA6/ABS blends using multi-phase compatibilizers. *Zhongguo Hua Xue Kuai Bao [Chinese Chemical Letters]*, 30(1), 149–152. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2018.04.035>
- 98)Suleiman, S., Hanafy M., O., & Al-Mufadi, F. (26 de Abril de 2019). *Arabian Journal for Science and Engineering*. Obtenido de Experimental-Based Multi-objective Optimization of Injection Molding Process Parameters: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03855-1>
- 99)Sundarakannan, R., Balamurugan, K., Jyothi, Y., Arumugaprabu, V., Sathish, T., Mahmoud, Z., Yousef, E. S., Basheer, D., & Shaik, S. (2023). Importance of fiber-/nanofiller-based polymer composites in mechanical and erosion performance: A review. *Journal of Nanomaterials*, 2023, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2023/3528977>
- 100) Tang, L., Wang, L., Chen, P., Fu, J., Xiao, P., Ye, N., & Zhang, M. (2018). Toughness of ABS/PBT blends: The relationship between composition, morphology, and fracture behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(13). <https://doi.org/10.1002/app.46051>
- 101) Tao Wang, J. (15 de Enero de 2006). *Materials Science Forum* (Volumenes 503-504). Obtenido de Historic Retrospection and Present Status of Severe Plastic Deformation in China: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.503-504.363>

- 102) Temperatura de molde (V). (s/f). Interempresas. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de [https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/227098-Temperatura-de-molde-\(V\).html](https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/227098-Temperatura-de-molde-(V).html)
- 103) The World Bank. (2024). Global economic prospects, January 2024 (The World Bank, Ed.). World Bank Publications.
- 104) Tipos de secado, endurecimiento y curado, ¿cuál es la diferencia? (s/f). Axalta.com. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de https://www.axalta.com/blog_mx/es_ES/repintado-automotriz/proceso-repintado/tipos-de-secado-curado-diferencias.html
- 105) "Traxler, I., Kaineder, H., & Fischer, J. (2023). Simultaneous modification of properties relevant to the processing and application of virgin and post-consumer polypropylene. *Polymers*, 15(7), 1717. <https://doi.org/10.3390/polym15071717>
- 106) Tsui, K.-L. (1992). An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design. *IIE Transactions: Industrial Engineering Research & Development*, 24(5), 44–57. <https://doi.org/10.1080/07408179208964244>
- 107) Univeridad Politecnica de Valencia . (2020). Univeridad Politecnica de Valencia . Obtenido de Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_4.html
- 108) Von Freeden, J., Rodenwaldt, B., & Nebel, D. (2023). Investigation of the influence of multiple thermoforming processes on the properties of continuous fiber-reinforced thermoplastics to enable structural reuse. *SN Applied Sciences*, 5(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05273-3>
- 109) Wang, H.-G., Jian, L.-Q., Pan, B.-L., Zhang, J.-Y., Yang, S.-R., & Wang, H.-G. (2007). Mechanical and tribological behaviors of polyamide 66/ultra high molecular weight polyethylene blends. *Polymer Engineering & Science*, 47(5), 738–744. <https://doi.org/10.1002/pen.20748>
- 110) Xiaochun, Y., Youhua, Y., Yanhong, F., Guizhen, Z., & Jinsong, W. (2018). Preparation and characterization of carbon fiber/polypropylene composites via a tri-screw in-line compounding and injection molding. *Advances in Polymer Technology*, 37(8), 3861–3872. <https://doi.org/10.1002/adv.22169>
- 111) Zepeda, C. (2022, abril 1). Superaron las exportaciones en 2021 niveles prepandemia. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/04/01/economia/superaron-las-exportaciones-en-2021-niveles-prepandemia/>
- 112) "Zhang, D., He, M., Luo, H., Qin, S., Yu, J., & Guo, J. (2018). Performance of long glass fiber-reinforced polypropylene composites at different injection temperature. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 24(3), 233–238. <https://doi.org/10.1002/vnl.21563>
- 113) Zhao, J., Mayes, R. H., Chen, G., Xie, H., & Chan, P. S. (2003). Effects of process parameters on the micro molding process. *Polymer Engineering & Science*, 43(9), 1542–1554. <https://doi.org/10.1002/pen.10130>
- 114) Zhou, T., Zhou, L., Liu, Y.-X., Lu, J.-T., He, S., Li, W., Li, G., Yao, F.-Z., Shen, Y., & Wang, K. (2022). Concurrently enhanced mechanical

properties and capacitive performance in all-organic dielectric polymer blend via phase separation. Journal of Applied Physics, 131(12). <https://doi.org/10.1063/5.0084679>

Anexo 1: Encuesta aplicada para delimitación del problema

Datos personales:

- Edad:
- Fecha:
- Carrera:
- Sexo:
- Año de egreso de Lic./Ing.:
- Correo electrónico:
- Institución de egreso de Lic./Ing.:

Encuesta

1. ¿Dentro de las funciones que realiza en su puesto, le solicitan ocasionalmente comparar resinas plásticas para determinar cuál es mejor para una aplicación específica?

- a) Sí
- b) No

2. ¿Cuántas veces al año le solicitan realizar la actividad mencionada en la pregunta anterior?

- a) 1-2 veces
- b) 3-4 veces
- c) 5-6 veces
- d) Más de 7 veces

3. Ante la ausencia de la resina planteada en el diseño original o si esta no pasa las pruebas requeridas, ¿quién considera que debería proponer una alternativa según su experiencia?

- a) Cliente
- b) Proveedor de manufactura del plástico
- c) Diseñador del componente plástico
- d) Personal de otros departamentos de la misma empresa (Compras, Calidad, Manufactura, etc.)
- e) Otro: _____

4. Cuando valida un tipo de resina diferente a la originalmente utilizada, ¿también verifica que el flujo del material dentro del molde no se vea afectado?

- a) Sí
- b) No

5. Enumere los pasos que sigue en orden para describir su proceso cuando necesita una resina alternativa o tiene dudas sobre la aplicación de la misma. Si considera algún paso adicional, favor de agregarlo.

- Realiza el comparativo en base a parámetros técnicos de las resinas a comparar.
- Solicita soporte del departamento de compras o algún otro departamento de apoyo.
- Consulta a un proveedor/técnico especialista en materiales plásticos.
- Inicia el proceso de validación del componente plástico con la resina elegida.
- Investiga situaciones similares en el pasado y selecciona una resina con aplicación similar a la deseada.
- Otro(s): _____

6. De los pasos anteriores, indique el número de días hábiles que le toma cada fase del proceso según su criterio y experiencia. Al final, realice la sumatoria total de días.

- Realiza el comparativo en base a parámetros técnicos de las resinas a comparar.
- Solicita soporte del departamento de compras o algún otro departamento de apoyo.
- Consulta a un proveedor/técnico especialista en materiales plásticos.
- Inicia el proceso de validación del componente plástico con la resina elegida.
- Investiga situaciones similares en el pasado y selecciona una resina con aplicación similar a la deseada.
- Otro(s): _____

Total en días necesarios para validar otra opción de resina: _____

7. Si existiera una herramienta electrónica que le permitiera realizar la validación de resinas y determinar su porcentaje de similitud en propiedades mecánicas para la aplicación deseada, ¿cómo la clasificaría?

- a) Muy bueno
- b) Bueno
- c) Me da igual
- d) Malo