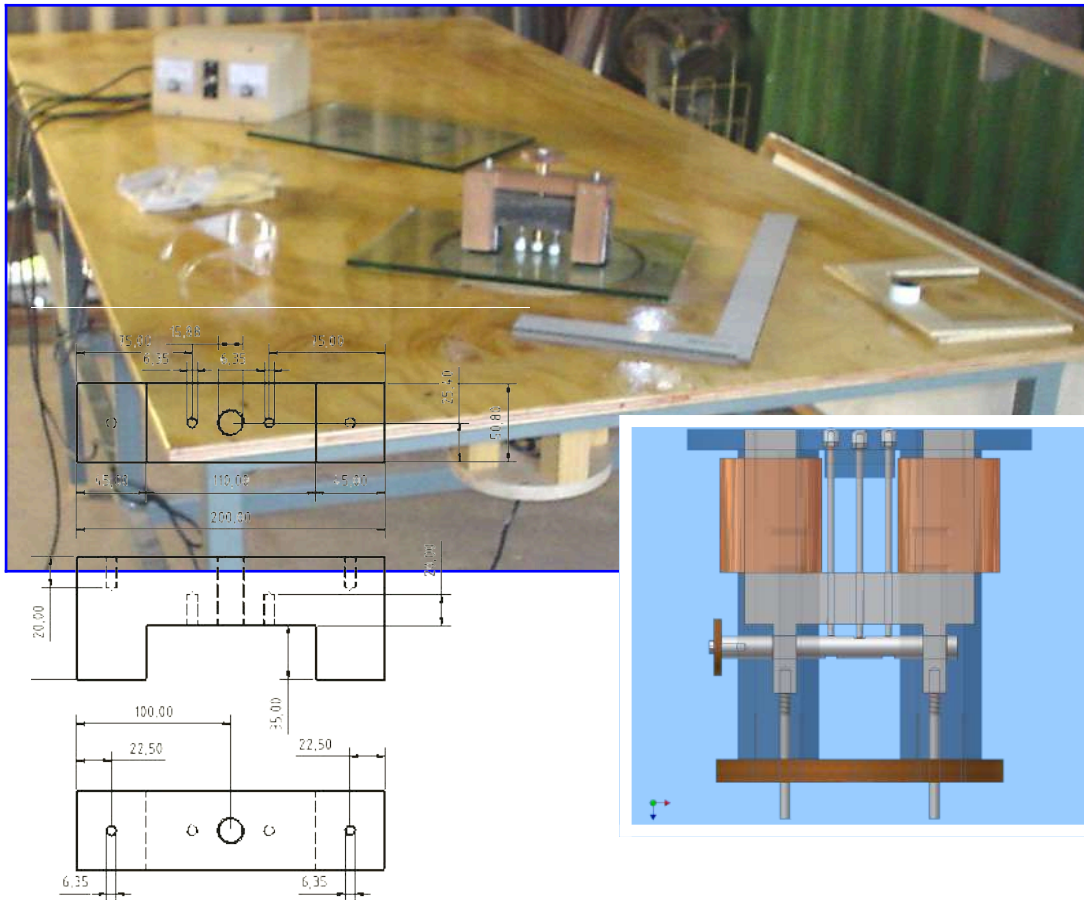


PROYECTO FINAL

Diseño y construcción del Abreschnitt Master 1.0, apertura de cortes de vidrio con fuerza electromagnética



CARRERA: Ingeniería Electromecánica

ALUMNO: Gerardo Gabriel Ghiguly

MATRICULA: 8716

DIRECTOR DE TESINA: Prof.: Ing. Aníbal Márquez (parte mecánica)
Prof.: Ing. Mario G. Macri (parte eléctrica)

Fecha: Diciembre de 2006

Calificación:

Resumen

El proyecto nace al observar las limitaciones de orden técnico, y de herramental, que existen en la actualidad para realizar cortes en vidrios planos.

Por esto se decide desarrollar una máquina que permita expandir y facilitar la utilización de las técnicas tradicionales. El diseño y construcción de dicha máquina, a la que se le ha dado el nombre Abreschnitt Master 1.0, es el objeto del presente trabajo.

Durante los años 2002 y 2003 en la empresa BOLHE.A.G. se tuvo la oportunidad de aprender y desarrollar técnicas de corte manual en vidrio plano por el método del prefisurado y apertura de fisura en forma dirigida. Esta tecnología está explicada y desarrollada en el trabajo.

Para el diseño y construcción de la máquina Abreschnitt Master 1.0 se debieron realizar prototipos con el objeto de obtener la información necesaria respecto de los diferentes parámetros que inciden en el proceso del corte del vidrio.

El producto del presente trabajo resulta en un prototipo totalmente operativo y un aporte de información sobre el tema que no está disponible en la bibliografía.

Objetivos

Diseñar y construir una máquina que permita realizar la apertura de cortes previamente marcados con cortavidrios, en forma precisa y prolija con las siguientes características:

- Que tenga capacidad de apertura de cortes en grandes placas, en forma continua.
- Reducción de desperdicios de cortes
- Reducción de tensiones secundarias en las zonas de corte por defecto de los mismos cortes.
- Condiciones de trabajo más seguras para el mecánico (vidriero), en el momento de efectuar la apertura del corte.
- Expandir el horizonte creativo en los diseños de acristalamientos.

Es necesario para avanzar en el trabajo:

- El desarrollo de los prototipos y sistemas de medición de los parámetros del corte
- La obtención de los datos que generan los prototipos y sistemas de medición
- Calcular y modelar el comportamiento de electroimanes, para la generación de la fuerza necesaria, a través de una placa de vidrio.
- Integrar los conocimientos del rubro vidriería con los adquiridos en la facultad.

Resultados

Se han obtenido gran cantidad de datos experimentales de la fuerza necesaria para producir la apertura del corte, la fuerza de atracción de electroimanes a través de las placas de vidrio a partir de la energía electromagnética almacenada en el sistema, la resistencia mecánica del vidrio, etc. y se han comparado resultados teóricos con experimentales pudiendo determinar en que grado de exactitud se encontraron los desarrollos efectuados.

Se han construido dispositivos para la obtención de los datos, estos dispositivos pueden utilizarse para el ensayo de muchas configuraciones de esfuerzos aplicados a los vidrios, espesores de vidrio, tipos de vidrios planos, etc. Así mismo los dispositivos pueden servir de base para normalizar ensayos o como prototipos para futuros dispositivos a este fin.

Se han condensado en el trabajo información práctica en las técnicas de corte, material que no se encuentra en la bibliografía disponible.

Se ha conseguido una excelente integración de las técnicas de corte de vidrio con los conocimientos adquiridos en diferentes materias de la carrera de ingeniería electromecánica.

Se ha diseñado y construido una máquina de acuerdo a los objetivos propuestos, generando la posibilidad de la expansión de un horizonte creativo en el diseño de acristalamientos y condiciones más seguras de trabajo.

Resta una etapa de calibración, puesta a punto y mejora de controles, aún así los resultados obtenidos con la misma son altamente satisfactorios y existe la posibilidad de la fabricación varias unidades a pedido.

Con todo esto los objetivos del trabajo se han satisfecho ampliamente tal vez en mayor medida de las expectativas iniciales.

Índice del proyecto

• Introducción	Pag. 1
Parte 1 (definiciones)	Pag. 2
• Definición del vidrio	Pag. 3
• Composición química de los vidrios	Pag. 4
• Clasificación del vidrio	Pag. 5
• Propiedades del vidrio	Pag. 9
• La superficie de los vidrios	Pag. 17
• Método de fabricación del vidrio plano	Pag. 19
• Solicitaciones térmicas y mecánicas del vidrio plano	Pag. 22
• Diferentes procesos mecánicos del vidrio plano	Pag. 30
• Procesos de templado y laminado	Pag. 32
• Diferentes técnicas de corte del vidrio	Pag. 34
Parte 2 (análisis de la fractura del vidrio)	Pag. 35
• Teoría de la resistencia mecánica del vidrio plano.	Pag. 36
• Teoría de Griffith y de la concentración de tensiones.	Pag. 46
• Fatiga del vidrio (Fractura diferida).	Pag. 50
• Surco de la rulina, diferentes rulinas.	Pag. 52
• Teoría de los tres puntos, determinación de su ubicación	Pag. 62
• Determinación de la fuerza necesaria para el comienzo de fisura y fuerza de propagación de la fisura.	Pag. 72
Parte 3 (diferentes tipos de corte)	Pag. 86
• 7 tipos básicos de cortes	Pag. 87
• Corte longitudinal regular con cortavidrios (condición de masa)	Pag. 90
• Corte longitudinal de borde (énfasis en vidrio de 6 [mm])	Pag. 94
• Corte recto en triángulo (cuidados con las puntas)	Pag. 97
• Corte de semicírculo (cuidados con las puntas)	Pag. 101
• Corte de círculo central	Pag. 105
• Corte entrante de esquina	Pag. 112
• Corte entrante de lado	Pag. 119
• Limitaciones de las herramientas de corte	Pag. 127

Parte 4 (Nacimiento de la idea. Abreschnitt Master 1.0)	Pag. 128
<ul style="list-style-type: none">• Reconocimiento de la problemática, determinación de la posible solución y análisis de las diferentes alternativas tecnológicas.	Pag. 129
<ul style="list-style-type: none">• Análisis de la energía electromagnética y determinación de la fuerza de atracción	Pag. 131
<ul style="list-style-type: none">• Diseño del aparato de simulación y justificación de su forma frente a las demás alternativas	Pag. 144
<ul style="list-style-type: none">• Análisis dinámico en Simulink del prototipo	Pag. 149
<ul style="list-style-type: none">• Ensayos del prototipo y comparación de resultados con los del análisis dinámico en Simulink	Pag. 177
<ul style="list-style-type: none">• Abreschnitt Master 1.0	Pag. 193
<ul style="list-style-type: none">• Conclusiones	Pag. 210
<ul style="list-style-type: none">• Anexo 1, planos del Abreschnitt Master 1.0	Pag. 211
<ul style="list-style-type: none">• apéndice 1, normas IRAM referentes a los vidrios planos	Pag. 223
<ul style="list-style-type: none">• apéndice 2, Instrumental eléctrico utilizado	Pag. 225
<ul style="list-style-type: none">• apéndice 3, reciclado del vidrio.	Pag. 226
<ul style="list-style-type: none">• Apéndice 4, análisis económico.	Pag. 227
<ul style="list-style-type: none">• Agradecimientos.	Pag. 229
<ul style="list-style-type: none">• Bibliografía	Pag. 230

Introducción

El trabajo final consiste en el diseño y construcción de un equipo para poder realizar aperturas de cortes de vidrio de geometrías complicadas. Este podrá realizar aperturas de cortes en vidrios planos en forma precisa y con una calidad de corte que en la actualidad no se puede lograr con las herramientas que hay disponibles en el mercado.

Este trabajo consta de cuatro partes. En la primera parte se encuentran las definiciones y el material anexo del trabajo final; la segunda parte condensa todo lo relativo al análisis de la fractura en placas de vidrio. La tercera parte presenta una explicación completa de la técnica de corte manual de la placa de vidrio y la cuarta parte contiene los estudios de simulación, medición y construcción de la herramienta Abreschnitt Master 1.0 objetivo de este trabajo final.

Cabe destacar que este es un equipo novedoso, el cual no existe en el mercado y del cual se realizarán las reservas para su patente en el futuro.

DEFINICIONES

(Parte 1)

Definición del vidrio

Debido a la diversidad de aplicaciones, composiciones químicas, significado de la propia palabra (en diferentes idiomas tiene más de un significado o se refiere más de un objeto a la vez), etc. se hace difícil dar una definición exacta de que son los vidrios, ya que es muy probable que una definición deje de incluir a una clase de vidrios, por el hecho de que no se considera una aplicación determinada.

Hay que considerar que los vidrios, son sistemas que no se encuentran en equilibrio termodinámico, pero si se encuentran perfectamente estables, y que tampoco se los puede definir por su composición ya que un determinado compuesto se lo puede encontrar, en un ordenamiento perfectamente cristalino, así como también en fase vítrea, esto quiere decir en un estado totalmente amorfo.

Hace tiempo se tenía una definición de que los vidrios eran líquidos subenfriados con un valor excesivamente alto de viscosidad, debido a que tampoco presentan una temperatura determinada de transición, la cual no es correcta.

Si es cierto que los vidrios no poseen una temperatura definida de transición, y todavía no hay una definición que pueda cubrir todo el espectro, pero por el lado tecnológico (no el científico) se ha llegado a una definición bien aceptada: Los vidrios son materiales sólidos que se obtienen por enfriamiento rápido de una masa fundida, impidiendo su cristalización. En síntesis se puede decir que los vidrios son sólidos amorfos.

Los materiales cerámicos difieren de los vítreos porque los primeros se obtienen por consolidación (sintetizado) de una mezcla de sustancias en polvo conformada a temperatura ambiente y sometida a la acción del calor, dando origen a un material policristalino, en tanto que los vidrios se fabrica por fusión total de una mezcla más o menos similar, a temperaturas más elevadas, obteniéndose los objetos por conformado del material a alta temperatura, cuando la masa fundida tiene baja viscosidad.

No hay una línea divisoria entre vidrios y cerámicos, pero los vidrios no son una rama particular de los cerámicos (como en algún momento se pensó) en sentido estricto, pero si están estrechamente emparentados.

Composición química de los vidrios

Entre los materiales vítreos que pueden obtenerse por procedimientos sofisticado, en pequeñas cantidades, en escala de laboratorio, y los vidrios comerciales, es decir, los producidos en escala industrial en grandes tonelajes, abarcan un rango de composiciones relativamente restringido. Se observa en el vidrio industrial que, con pocas excepciones el componente principal es la sílice o dióxido de silicio, por lo cual estos materiales se denominan vidrios silicatos o silicaticos. Los vidrios constituidos por óxidos, y en particular los vidrios silicaticos son los que habitualmente llamamos vidrios.

Podemos decir, salvo los gases nobles, no hay elemento de la tabla periódica que, en mayor o menor proporción, no entre en la composición de algún vidrio.

Tabla de proporción porcentual en peso de cada componente.

Tipo de vidrio	Si O ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Ca O +Mg O	Ba O	Pb O	Al ₂ O ₃	Zn O
Común p/ventana	72-75	---	13-15	---	9-14	---	---	0-1	---
Común p/espejo	70.6	---	11.8	---	16.9	---	---	0.6	---
Botella blanco	72.1	0.2	14.04	0.4	10.4	0.3	---	1.9	---
Botella verde	67.4	0.1	11.9	1.7	10.0	---	---	5.9	---
Termoresistente	81.0	12.0	4.5	---	---	---	---	2.0	---
Óptico crown	70.1	1.0	1.0	15.0	12.4	---	---	1.0	---
Óptico flint	45.2	---	---	6.8	0.4	---	47.1	0.8	---
Cristal al plomo	52.4	---	0.1	10.4	0.8	---	35.2	1.0	---
Neutro p/ampollas	71.6	9.9	7.9	1.4	0.3	2.8	---	5.5	0.4
p/termómetros	72.9	10.4	9.8	0.1	0.6	---	---	6.2	---
Fibra (tipo E)	54.5	8.5	0.5	---	22.0	---	---	14.5	---
Tubo de televisión	68.2	2.0	8.2	8.0	---	7.2	---	4.8	---
p/lámparas eléctricas	70-72	---	16-18	0.9-1	8-9	1-2	---	0.8-1.4	---
Laboratorio	70-73	5-6	6-8	0.9-2	1-8	0-5	---	1.8-4.7	0.3
Fotosensible	80.0	---	---	2.5	---	---	---	4.0	---
Abs/rayos X	63.5	1.0	6.5	8.0	---	11.0	5.5	4.5	---
Abs/rayos γ	---	---	---	---	---	---	59.2	---	---
Resistente al sodio	8.0	48.0	14.0	---	6.0	---	---	24.0	---
p/soldar al molibdeno	72.0	13.0	3.5	4.0	3.5	---	---	4.0	---
Opal	67.5	---	8.5	3.3	10.5	---	0.1	4.0	0.1

Clasificación del vidrio

Existen diversas formas de clasificar los tipos de vidrios, los artículos que se fabrican a base de este y los nuevos vidrios que van surgiendo. Para lograr una racional clasificación y un lenguaje común la comisión internacional del vidrio (ICG), se ocupó de determinar cinco categorías de clasificación

- a) Según la composición
- b) Clasificación según su estructura
- c) Clasificación según sus propiedades
- d) Clasificación según las tecnologías de fabricación
- e) Clasificación según su uso.

a) Clasificación según la composición:

Cuando se aplica en la práctica este criterio, es habitual que los vidrios se denominen por su componente principal, o bien por el que interesa por una propiedad o aplicación determinada. Los más usuales son:

- 1) Vidrios de óxidos: son los vidrios que contienen oxígeno como formador de puentes entre átomos de otros elementos, consolidando la estructura. Los principales son:
 - Vidrios silicatos (o silicáticos): componente principal SiO_2 . Son comercialmente los más importantes. Los más comunes son los denominados vidrios de soda-cal, que contienen como componentes principales, luego del SiO_2 , a los óxidos Na_2O y CaO . También están los vidrios potásicos (con K_2O reemplazando al Na_2O), etc. En menores proporciones contienen MgO y Al_2O_3 .
 - Vidrios borosilicatos: componentes principales: SiO_2 y B_2O_3 . Hay diversos tipos de gran importancia industrial: vidrios neutros (de gran resistencia al ataque del agua); vidrios termoresistentes o "términos" (de bajo coeficiente de dilatación), etc. El contenido de B_2O_3 oscila entre el 8 y el 18 %.
 - Vidrios aluminosilicatos: componentes principales: SiO_2 y Al_2O_3 . son vidrios de alto punto de ablandamiento, usados para materiales espaciales de laboratorios y como base de muchos vidrios cerámicos. Si contienen B_2O_3 se denominan "aluminoborosilicatos".
 - Vidrios de sílice: Contienen más del 95% SiO_2 , y existen diversos tipos, caracterizados por sus denominaciones comerciales. (se lo llama, incorrectamente, "vidrio de cuarzo").
 - Vidrios boratos: Componente principal: boratos alcalinos.
 - Vidrios de fosfatos: componente principal: metafosfato alcalino. Existen también vidrios fosfosilicatos.
 - Vidrios al plomo (o, más correctamente, vidrios de plomo): contienen PbO en su composición en cantidades variables, pudiendo no ser el componente principal. Se fabrican comercialmente vidrios de plomo con contenidos entre el 5 y el 80 % de PbO . (en Europa se reserva esta denominación para los vidrios con más del 18% de PbO).

- 2) Vidrios de calcogenuros: formados por compuestos de S, Se y/o Te.
- 3) Vidrios de alogenuros: BeF_2 , etc.
- 4) Vidrios orgánicos: formados por sustancias orgánicas simples o polimerizadas.
- 5) Vidrios Metálicos: se los obtiene por la técnica de splat-cooling, que consiste en hacer impactar gotas fundidas de la aleación sobre una superficie muy fría.

Hay dos denominaciones aun utilizadas, pero que pueden inducir a confusión: son las de “vidrio crown” y “vidrio flint”, ambas de origen inglés. Si bien su significado es bastante impreciso por vidrio crown se entiende por lo general un vidrio silicato de soda-cal común, y por vidrio flint un vidrio de alta densidad e índice de refracción, generalmente conteniendo óxido de plomo. Son términos utilizados más en relación con los vidrios ópticos. Sin embargo, es también habitual denominar flint al vidrio incoloro para envases. Todo eso hace que las denominaciones crown y flint sean desaconsejables.

b) Clasificación según la estructura.

Esta distinción ha adquirido importancia solo recientemente, con el advenimiento de los vidrios cerámicos, que deben incluirse entre los materiales vítreos. Por lo tanto, desde este punto de vista tenemos:

- 1) Vidrios (propriadamente dichos), con mayor o menor homogeneidad e incluyendo los vidrios con fases amorfas separadas.
- 2) Vidrios cerámicos: todos aquellos materiales vítreos que por medio de una desvitrificación controlada quedan constituidos por una matriz vítrea y fases cristalinas separadas. Los vidrios cerámicos, pueden ser transparentes (si el tamaño de los cristales es lo suficientemente pequeños), o traslucidos. Entre ellos incluyen los vidrios opales, a veces denominados “opalinas”. Los vidrios cerámicos se clasifican a su vez, según sus propiedades más sobresalientes: así, los hay fotosensitivos, fotoeléctricos, trabajables mecánicamente, etc.

c) Clasificación según las propiedades.

Las propiedades que más se han utilizado para clasificar a los vidrios son el coeficiente de dilatación térmica, la resistencia al ataque químico y, en el caso particular de los vidrios ópticos, el índice de refracción y la dispersión. El coeficiente de dilatación ha sido propuesto por la ISO, ya que refleja el comportamiento de los materiales vítreos frente a cambios de temperatura y la posibilidad de soldar distintos vidrios entre sí; para ello se utiliza la cifra que, multiplicada por 10^{-6} , da el coeficiente de dilatación entre 0 y 300 °C. Por ejemplo un vidrio común sódico-calcico es, en esta clasificación, 8.5 a 9; un vidrio borosilicato termoresistente es un vidrio 3.3, etc.

d) Clasificación según las tecnologías de fabricación.

Es una de las más utilizadas en la industria, y en líneas generales se basa en la técnica de conformado el producto.

Denominación según proceso	Ejemplos de productos
Vidrio soplado	Vidrio plano (proceso antiguo); vidrio hueco (envases, vajilla, adornos, etc.).
Vidrio laminado	Vidrio plano traslucido y pulido
Vidrio colado	Vidrio plano traslucido
Vidrio flotado	Vidrio plano flotado
Vidrio estirado	Vidrio de ventana; tubo, varilla y fibra de vidrio
Vidrio prensado	Objetos huecos y macizos (adorno, vajilla, aisladores eléctricos, etc.).

Hay otros procesos menos usuales, o “no tradicionales”, como el sinterizado, el centrifugado la deposición en fase vapor o el método del “sol-gel”, o bien combinaciones de dos procesos, como la fabricación de envases por el método de “prensado-soplado”. También se denomina a los vidrios según los procesos de segunda elaboración a que deben ser sometidos: vidrios tallados, pulidos, decorados, etc., o por tratamientos especiales (templados, tratados en la superficie con ácidos, etc.), o bien recubiertos (con siliconas, capas plásticas o capas metálicas).

e) Clasificación según los usos.

Esta es, en realidad, una clasificación de los productos de vidrio y no del vidrio en sí, y tiene fundamental importancia comercial. Usualmente se dividen cuatro grandes categorías:

1) Vidrio hueco y prensado. Incluye: envases de vidrio (botellas y frascos); bulbos para lámpara incandescentes, de vapor, etc.; bulbos para tubos de TV; bulbos para lámparas electrónicas, tubos y capilares de vidrio; artículos de vidrio para laboratorio; instalaciones industriales de vidrio; vidrio para semáforos y señalización; artículos para bazar, menaje, adorno, escritorio, uso artístico, etc.

2) Vidrio plano. Incluye vidrio laminado (colado); transparente pulido (incorrectamente llamado cristal); estirado (vidrio para ventanas); vidrio armado (con armazón metálico interior); vidrios atérmicos; vidrios en general para la industria de la construcción.

3) Fibra de vidrio. Incluye fibra de vidrio textil; fibra para refuerzos de materiales plásticos; lana de vidrio; fibra de vidrio para aislaciones térmicas y acústicas; hilados y tejidos de vidrio, etc.

4) Vidrios especiales. Incluyen los vidrios fabricados en pequeñas cantidades o de alta tecnología, que no están englobados en ninguna de las tres categorías anteriores: vidrios ópticos; vidrios cerámicos; vidrios para soldar; vidrios semiconductores; vidrios foto cromáticos y otros.

Una clasificación de este tipo más importantes, y utilizadas para la reglamentación comercial entre todos los países del mundo, es la que figura en el capítulo 70 de la NAB (Nomenclatura Arancelaria de Bruselas), titulado: Vidrio y manufacturación del vidrio. En esta nomenclatura cada posición esta individualizada por cuatro cifras; a su vez cada país puede subdividirla , según sus necesidades o conveniencias, agregando cuatro cifras más, de manera que cada producto esta identificado finalmente por un código de ocho cifras. Esta nomenclatura es muy detallada e incluye definiciones, características, dimensiones, etc.

Propiedades del vidrio

Al considerar en su conjunto las propiedades de materiales sólido, es importante entender, de que dependen, si pueden predecirse y de que forma pueden predecirse dichas propiedades. Al considerar sólidos cristalinos, en forma muy resumida, estas se pueden empezar a formular a partir de su estructura cristalina y de los defectos que esta pueda tener. En el caso de los vidrios, o con los sólidos no cristalinos en general. El problema es mucho más complejo, dado que no existe una composición ni una estructura determinada, sino que ambas pueden variar dentro de límites muy amplios. Por lo tanto no tiene sentido de tratar de interpretar, efectos de impurezas, etc. en los vidrios, aunque se sigue trabajando intensamente en este terreno para poder predecir el comportamiento de los vidrios, todavía se está muy lejos de alcanzar resultados satisfactorios.

Desde fines del siglo 19 se sabe que algunas propiedades de los vidrios pueden calcularse aproximadamente sobre la base de su composición, y se las denominan propiedades aditivas, ejemplos de esta son: densidad, el índice de refracción, el coeficiente de dilatación térmica, el calor específico, la constante dieléctrica, etc. en contraste, hay otras propiedades que, si bien dependen de la composición, no pueden calcularse de esta manera, porque dependen fundamentalmente de la estructura del material, son ejemplos de estas propiedades no aditivas: la viscosidad, la conductividad térmica, las pérdidas eléctricas, etc. por último, hay un tercer grupo de propiedades del vidrio, que si bien dependen en última instancia de la composición y estructura del vidrio, están fundamentalmente determinadas a nivel microscópico, por el estado de la superficie del material, ejemplos típicos son: resistencia mecánica, la resistencia al agua y a los ácidos, la reflexión de la luz, la conductividad eléctrica a temperatura ambiente, etc.

Propiedades térmicas:

La fabricación de todo material vítreo es un proceso que pone en juego temperaturas elevadas. De manera que el conocimiento de las propiedades de estos materiales a altas temperaturas es de fundamental importancia. Entre estas propiedades mencionaremos el calor específico, la conductividad calorífica, la viscosidad, la dilatación, la tensión superficial del vidrio fundido, etc.

Calor específico. El conocimiento del calor específico de los vidrios y de su variación con la composición es de importancia en el balance calorífico en los hornos de fusión, para la selección de los combustibles y el diseño de los hornos para tratamientos térmicos. En el caso de los vidrios se utiliza el calor específico a presión constante el cual anda en el orden de los $0.2 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Transferencia de calor. La transferencia de calor en los vidrios puede tener lugar por conducción y por radiación. El mecanismo de radiación es el que predomina a altas temperaturas, mientras que a bajas temperaturas lo hace el de conducción. Para cada uno de ellos se define una conductividad térmica, k , como la cantidad de calor que se transfiere durante un determinado tiempo t perpendicularmente a una superficie S y para un gradiente de temperatura dt/dx . Se tiene entonces que:

- Conductividad térmica por conducción: k_t
- Conductividad térmica por radiación: k_r

- Conductividad térmica efectiva: $k = k_t + k_r$.

Siendo el vidrio un material no poroso, no hay conductividad térmica por convección en estado sólido; si en el vidrio fundido.

Las unidades comúnmente utilizadas para k son: $\text{cal cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$.

Viscosidad:

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de los vidrios en lo que respecta a su fabricación. En efecto, los valores de viscosidad a distintas temperaturas son las que determinan las características de las operaciones y los equipos, muy especialmente en la fabricación automática.

Dilatación:

Las dilataciones tienen una importancia fundamental, tanto en los procesos de fabricación de los objetos de vidrio (en particular durante el conformado y el recocido), como durante su uso, especialmente cuando se los somete a choque térmico. También es importante la dilatación en el caso de las soldaduras, ya sea entre diferentes vidrios entre sí como con metales y cerámicos.

Por ejemplo el vidrio sodocalcico de composición Si O_2 75%, $\text{Na}_2 \text{O}$ 15,51% y Ca O 9,35% en peso, entre 20 y 300 °C, su coeficiente de dilatación es: $\alpha_{20-300 \text{ °C}} = 9.35 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$.

El intervalo 20-300 °C es el más comúnmente utilizado, y el valor de α es el coeficiente del valor medio para este intervalo.

Las dilataciones y contracciones son también las causas de las roturas cuando se somete al material a cambios bruscos de temperatura. En efecto, siendo el vidrio un mal conductor del calor, no alcanza inmediatamente una homogeneidad de la temperatura y entonces las zonas más calientes se dilatan más que las frías, originando tensiones que pueden alcanzar la rotura. Cuando mayor es el coeficiente de dilatación, mayores serán las tensiones originadas por diferencias de temperatura en distintos puntos del material. Por este motivo, los vidrios con bajo coeficiente de dilatación son los que resisten mejor los choques térmicos.

Para determinar el coeficiente de dilatación térmica lineal, existen métodos estandarizados, en diversas normas de las cuales podemos citar la ASTM E 228-71 y la DIN 52328.

Finalmente, mencionaremos que es común llamar vidrios duros a aquellos con bajo coeficiente de dilatación térmica (menores que $6 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$) y vidrios blandos a aquellos que tienen un coeficiente de dilatación superior a este. Naturalmente, la dilatación no tiene nada que ver con la dureza y, por lo tanto, aquellas denominaciones, comunes en la jerga vidriera, deberían descartarse, ya que carecen de significado preciso y pueden originar confusión.

Densidad:

Densidad, tratamiento térmico y estructura. En el intervalo de transformación, la curva densidad/temperatura sufre un cambio brusco y su pendiente se acentúa, de manera que la densidad del vidrio fundido es considerablemente menor que en estado sólido. Por ejemplo, un vidrio silicático sodocalcico común, cuya densidad, a temperatura ambiente, es de 2.50 g/cm^3 , presenta una densidad de $2,38 \text{ g/cm}^3$ a 1000 °C, en estado fluido.

Así como la dilatación depende de la historia térmica del vidrio, también los tratamientos térmicos afectan a la densidad. Si la velocidad de enfriamiento a partir del estado líquido es elevada, se congela la estructura que existe a alta temperatura, y en consecuencia el material presenta una estructura a temperatura ambiente más desordenada y más abierta, y, por lo tanto, una densidad menor.

Cuanto más lenta es la velocidad de enfriamiento, es decir, cuanto más perfecto es el recocido, más elevada es la densidad. Por ello, los vidrios templados presentan una menor viscosidad que los bien recocidos.

De todo lo anterior se deduce que las densidades de los vidrios, solo son comparables si han sido sometidos a los mismos tratamientos térmicos. De la misma manera, también son diferentes las densidades de los vidrios templados si el proceso de enfriamiento se hace partiendo de temperaturas diferentes. La medición de la densidad es, por consecuencia, un buen método para estudiar la variación de la estructura de un vidrio con los tratamientos térmicos. Entre los problemas prácticos más importantes relacionados con la variación de la densidad de un vidrio al variar su estructura, está el de la variación de los puntos fijos de los termómetros de vidrio.

Propiedades mecánicas:

El vidrio es un material elástico casi ideal, si bien la deformación elástica que sufre por aplicación de una tensión es pequeña, y superando un determinado límite, se fractura. El vidrio cumple con la ley de Hooke.

M es el módulo de elasticidad, y su valor depende del esfuerzo aplicado:

- a) tracción: $M = E$, módulo de Young.
- b) torsión: $M = G$, módulo de torsión o esfuerzo de corte.
- c) compresión $M = K$, módulo de compresibilidad.

Los tres módulos están relacionados por la siguiente fórmula:

$$E = 2(1+\mu)G = 3(1-2\mu)K,$$

siendo μ el coeficiente de Poisson.

En la siguiente tabla se representan estos coeficientes para un vidrio sodico-calcico común de composición. Si O_2 74%, Na_2O 17%, CaO 9%.

M	Valor en $N\ m^{-2}$
E	$7.13 \cdot 10^{10}$
G	$2.93 \cdot 10^{10}$
K	$4.22 \cdot 10^{10}$
μ	0.218

El módulo de elasticidad de un vidrio varía con su composición.

Tipo de vidrio	E en $N\ m^{-2} \cdot 10^{10}$
Vidrio de sílice	7.2
Sodo-calcico común	7.1 a 7.5
Borosilicato termoresistente	6.2 a 6.5
Borosilicato neutro	7.0 a 7.3
Aluminosilicato	7.3 a 7.5
Vidrio de plomo (20% Pb O)	6.4 a 6.8

En lo que respecta a la influencia de temperatura, el valor de E disminuye ligeramente al aumentar esta; al llegar al intervalo de transformación E sufre una

brusca disminución, ya que se pasa a la región viscoplastica. Al igual que en el caso de otras propiedades, los valores de e medidos sobre una muestra dependen de la historia térmica previa de esta.

La resistencia mecánica teórica de los vidrios, esta calculada sobre la energía necesaria para romper los enlaces del silicio con el oxígeno, la cual es elevadísima, del orden de 10^{10} N m^{-2} , muy superior a la de los aceros y muchos otros materiales. En la practica, sin embargo, dicha resistencia rara vez supera los $5 \cdot 10^7 \text{ N m}^{-2}$, es decir que resulta tres ordenes de magnitud menor.

En la siguiente tabla se muestran algunas tensiones de ruptura y sus causas:

Ensayo	Resist en 10^7 N m^{-2}	Causa de la disminución
Resistencia teórica	1000	Rotura de enlaces Si-O
Resistencia a la tracción de fibra de vidrio prístinas, diámetro menor a $10 \mu\text{m}$	200 a 500	Defectos submicroscopicos
Resistencia a la compresión de vidrio común	50 a 100	Defectos microscópicos
Resistencia a la flexión de vidrio templado	10 a 30	Defectos microscópicos
Resistencia a la tracción de vidrio bien recocido	5 a 10	Defectos microscópicos
Resistencia a la tracción de vidrio esmerilado	2 a 3	Defectos microscópicos
Resistencia a la tracción de vidrio dañado (rayas, chacaduras, fisuras, etc.)	Menor de 1	Defectos microscópicos

Los resultados experimentales de los ensayos mas comunes muestran siempre las mismas características:

- El vidrio se rompe siempre por tracción, y la fractura tiene siempre su origen en un punto de la superficie.
- Los valores obtenidos no guardan ninguna relación aparente con la composición de los vidrios ensayados ni con los módulos de elasticidad.
- Los valores de resistencia mecánica medidos son siempre dos o tres ordenes de magnitud inferiores a la resistencia teórica.
- Los resultados presentan gran dispersión y muy baja repetibilidad.
- El estado de la superficie tiene una enorme influencia sobre los resultados.

Luego del tratamiento con ácido fluorhídrico, la resistencia aumenta entre 5 y 10 veces, porque el HF elimino, por disolución, la capa superficial alterada, creando una nueva superficie, muy lisa. Con el transcurso del tiempo, esta nueva superficie se vuelve a alterar y la resistencia vuelve a caer a los valores normales.

Propiedades eléctricas:

A temperatura ambiente, los vidrios en general se comportan como aisladores, es decir no son buenos conductores de la electricidad y, por lo tanto, su aplicación predominantes la electrotécnica. Las propiedades eléctricas mas importantes son, entonces, la conductividad eléctrica, la constante dieléctrica y las perdidas dieléctricas. A temperaturas elevadas, cuando el vidrio esta fundido, ya no es mas un aislador, sino que se transforma en un buen conductor de la electricidad, debido a que la movilidad de los iones aumenta notablemente al disminuir la viscosidad con el aumento de la temperatura. Este ultimo aspecto interesa desde el

punto de vista de las tecnologías de fusión eléctrica de los vidrios. En lo que respecta al mecanismo de conducción, tanto a bajas temperaturas como a altas temperaturas, es en todos los casos el mismo, la movilidad de los iones que forman parte de su estructura: los iones positivos alcalinos o alcalinotérreos y los aniones negativos del reticulado del silicato. Podemos decir, entonces, que los vidrios son conductores electrolíticos, como las soluciones acuosas de compuestos iónicos y como sales fundidas, y que la conducción eléctrica de los mismos esta acompañada de transporte de materia, cumpliéndose las leyes de la electrolisis.

Conductividad eléctrica. La medición de la conductividad eléctrica de los vidrios a temperatura ambiente presenta considerables dificultades prácticas, derivadas de su pequeño valor (del orden de $10^{-10} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ para el vidrio sodocalcico común, valor unas 10^{17} veces menor que el correspondiente al cobre), y al hecho de que la conductividad superficial del vidrio, debida a la existencia de una capa superficial hidratada, es varios ordenes de magnitud superior, lo que hace que la corriente, a temperatura ambiente, sea conducida por la superficie y no por la masa del material. Por lo tanto, las mediciones a temperaturas bajas (inferiores a 200°C) deben llevarse a cabo previa eliminación de la capa superficial y en vacío elevado. El dispositivo más común consiste en fabricar discos o prismas delgados, de 5 mm de espesor y 10 mm de diámetro o bien 10×10 de sección, con las caras planas, paralelas y pulidas y luego mecanizadas, y medir la resistencia eléctrica en corriente continua con un puente adecuado, en forma a otros materiales, pero con las precauciones apuntadas. El uso de alambres de platino, soldados a ambos extremos de la muestra no es aconsejable, porque da resultados erráticos a causa de la pequeña zona de contacto vidrio/metal. Para aclarar que se han eliminado de alguna manera los efectos de la superficie, a la conductividad eléctrica específica, o verdadera, de un vidrio, se la denomina muchas veces conductividad volumétrica.

Midiendo la conductividad eléctrica en corriente continua se produce el fenómeno de polarización de los electrodos, dado que la conducción es electrolítica. Para evitarlo, se puede medir en corriente alterna. En este caso, además del bajo costo de los equipos de medición, aparecen otros efectos (conducción anómala), relacionados con el comportamiento dieléctrico de los vidrios, que hacen que la resistividad medida en corriente alterna sea significativamente mayor de la medida en corriente continua. Por otra parte, a baja temperatura la conductividad eléctrica, esta fuertemente influenciada por la frecuencia y por el tipo de corriente utilizada.

Por encima de los $150\text{-}200^\circ \text{C}$, la influencia de la conducción superficial desaparece al evaporarse el agua de la superficie, y las mediciones son más precisas, aunque se ha encontrado que hasta los 400°C pueden quedar moléculas de agua o iones hidroxilo (OH^-), firmemente unidos a la capa superficial, que influyen sobre las mediciones.

La medición de la conductividad eléctrica del vidrio fundido se lleva a cabo de manera similar a la de las soluciones, sumergiendo dos electrodos de platino en la masa fundida contenida en el crisol dentro de un horno a temperatura controlada. La resistividad de los vidrios fundidos es de unos pocos $\Omega \text{ m}$, o sea casi diez ordenes de magnitud menor que a temperatura ambiente.

La conductividad eléctrica de los vidrios varia con su composición, dado que los iones más débilmente unidos –fundamentalmente los alcalinos– son los que transportan la corriente. Es así como un vidrio de sílice pura posee una conductividad sumamente baja, que aumenta rápidamente con la inclusión de pequeñas cantidades de óxido de sodio. El óxido de potasio tiene un efecto menos pronunciado, pero la mezcla de óxidos de sodio y potasio tiene una influencia mucho mayor (efecto de álcali mixto). Los óxidos alcalinotérreos (CaO , MgO , etc.), también aumentan la conductividad eléctrica, aunque en mucha menor proporción

que los alcalinos, y la introducción de B_2O_3 , Al_2O_3 , PbO , ZnO y otros óxidos tienen efectos diversos, aunque no muy pronunciados, y que en general dependen del resto de los componentes, especialmente de la proporción de álcalis. Para vidrios con muchos componentes, la predicción de su conductividad eléctrica a partir de sus componentes es prácticamente imposible, ya que se presentan efectos mixtos, debido a la influencia recíproca de los iones, aun no del todo dilucidados. Hay que señalar que la facilidad con que los iones pueden llevar la corriente depende no solo de su composición, sino de la estructura de cada vidrio, la cual está determinada por la composición global; en este aspecto, por poseer una estructura rígida, los vidrios se diferencian de las soluciones acuosas. Hay que señalar, además, que pequeñas cantidades de H_2O e iones OH^- en los vidrios pueden influir en la conductividad eléctrica en más de un orden de magnitud. También los tratamientos térmicos –que influyen en la estructura– hacen variar el valor de la conductividad eléctrica: un vidrio templado tiene un valor de conductividad eléctrica mayor que el de un vidrio bien recocido. Por todas estas razones, a diferencia de otras propiedades, la conductividad eléctrica de los vidrios no puede calcularse en forma aditiva, y debe determinarse experimentalmente.

Para caracterizar a los vidrios desde el punto de vista de la conductividad eléctrica, se utiliza el valor denominado T_{k100} , que es la temperatura a la cual la conductividad eléctrica k toma el siguiente valor:

$$K = 100 \cdot 10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}.$$

Como para todos los vidrios la conductividad eléctrica aumenta con la temperatura, un valor elevado de T_{k100} corresponde a una baja conductividad, o sea a una alta resistividad.

Tipos de vidrios	Resistividad $\log \rho, \Omega \text{ cm}$		T_{k100} °C	Constantes de la ecuación de Ransch-Hinrichsen entre 20 °C y T_g		ϵ	$T_g \bar{\alpha}$ *10 ⁴	Factor de pérdida %
	25°	250°		A	B*10 ⁻³			
Sodico-calcico	12.5	6.5	160	-2.2	4.5	7.0	80	6.5
Borosilicato térmico	15.0	8.1	250	-1.4	4.9	4.2	44	2.1
Borosilicato neutro	17.0	9.2	195	-1.4	4.4	4.9	47	1.3
Vidrio al plomo	17.0	11.8	310	-2.2	5.9	9.5	21	0.85
Vidrio al sílice	18.0	12.6	---	---	---	3.7	1	0.07

En lo que respecta a la conductividad eléctrica de los vidrios, gran número de estudios han confirmado la validez de la ecuación de Rasch-Hinrichsen:

$$\log k = A - B/T.$$

(es decir, que la gráfica de $\log k$ en función de la inversa de la temperatura es siempre una recta). A y B son constantes características de cada vidrio: A está relacionada con la composición, y B con la energía de activación necesaria para que un ion pueda vencer la barrera de potencial (para los vidrios comunes sodico-calcicos, dicha energía de activación es del orden de 20 kcal/mol).

Por encima del punto de transformación T_g , la conductividad eléctrica aumenta más fuertemente con la temperatura, la relación sigue siendo lineal, pero la recta experimenta un quiebre. Este cambio de pendiente no solo afecta a la conductividad eléctrica sino que también afecta a otras propiedades.

Propiedades dieléctrica. Los vidrios son, en general, buenos dieléctricos a temperatura ambiente. La constante dieléctrica (también denominada permeabilidad relativa) está definida como la relación entre la capacidad de un condensador cuyo dieléctrico sea un vidrio (C) y el mismo condensador cuyo dieléctrico es el vacío (C_v):
$$\epsilon = C/C_v.$$

y está relacionada con el índice de refracción por la relación de Maxwell: $\epsilon = n^2$, que para el vidrio se cumple solo a frecuencias elevadas, y en algunos casos, como el vidrio de sílice, no se cumple.

La frecuencia utilizada en la medición experimental de ϵ influye sobre su valor: al aumentar la frecuencia la constante dieléctrica disminuye, efecto que se hace más notable a medida que aumenta la temperatura. En lo que respecta a esta última, tiene una marcada influencia: para los vidrios comunes sodico-cálcicos ϵ aumenta linealmente con T hasta el punto de transformación T_g , donde sufre una variación brusca. A bajas temperaturas dicha influencia es importante: a 100°C , por ejemplo, la constante dieléctrica de un vidrio sodico-cálcico común es entre 10 y 20% mayor que a temperatura ambiente. Resulta evidente que toda medición de la constante dieléctrica de un vidrio debe estar acompañada de la temperatura y la frecuencia a la que se realizó la medición.

Como la constante dieléctrica, el factor de disipación depende de la composición del vidrio, de la temperatura a la cual se llevó a cabo la medición y la frecuencia de la corriente utilizada. La influencia conjunta de estos tres factores es compleja.

La pérdida de potencia de un dieléctrico es proporcional al producto de ϵ y de $\tan\delta$, de modo que para utilizar un vidrio como aislador en líneas de corriente alterna hay que elegir aquellas composiciones que tengan bajos valores de ambas propiedades. Sin embargo, en la práctica hay dos factores mucho más importantes que deciden la elección del tipo de vidrio para un aislador, y son la resistencia química al ataque atmosférico (ya que debe evitarse al máximo la capa superficial hidratada conductora de la electricidad que anule los efectos aislantes), y la resistencia mecánica, dados los esfuerzos considerables que debe soportar un aislador, ya que sobre él descansa el peso de los cables.

Si se aumenta la tensión aplicada, llega un momento en que se destruye el carácter aislante del material, y se produce el pasaje instantáneo de corriente a través de una descarga por chispa. En materiales porosos esta descarga puede producirse a través de los canales que pueden conectar una serie de poros abiertos, pero en el vidrio, dado que no posee poros, la misma está acompañada generalmente por una fisuración del aislador. El valor del campo eléctrico en ese momento se denomina rigidez dieléctrica del material, o también ruptura dieléctrica. En los vidrios dicho valor es muy elevado con respecto a materiales porosos como la porcelana, situándose entre 10^8 y 10^9 V/m para frecuencias de 10^2 a 10^6 Hz. La determinación experimental de la rigidez dieléctrica presenta una serie de dificultades, dado por la facilidad con la que se distorsiona el campo eléctrico en los bordes del material a tensiones elevadas.

Propiedades químicas:

Mecanismos de ataque. Los mecanismos de ataque químico de los vidrios son variados, dependiendo de la naturaleza del agente atacante. Este es un tema que a merecido una enorme cantidad de trabajos e investigaciones, pero que solo en los últimos años ha podido ser esclarecido casi en su totalidad. A continuación se harán una breve síntesis de los casos principales, comenzando por las sustancias que atacan mas fuertemente al vidrio: el ácido fluorhídrico, en primer lugar y, en menor grado, el ácido fosforito concentrado y los álcalis concentrados y calientes.

El ataque por el ácido fluorhídrico lleva a la disolución del vidrio por destrucción del retículo, es decir, por disolución de todos sus componentes, formándose fuorsilicatos alcalinos solubles, y alcalinotérreos poco solubles, en una reacción que puede sintetizarse como sigue:



El ataque del vidrio por el ácido fluorhídrico, ya sea en solución o por sus vapores, es conocido desde hace dos siglos, y se lo utilizo y utiliza para el grabado del vidrio. También se lo utiliza, en forma controlada, para eliminar capas superficiales alteradas y, en química analítica, en análisis de vidrios y silicatos en general para eliminar la sílice por evaporación, ya que el ácido fluorsilísico se descompone por calentamiento.

Con respecto a los ataques químicos las normas DIN son las que mejores especificaciones tienen al respecto, de las cuales pueden ser citadas las siguientes: resistencia al ataque de ácidos DIN 121116; resistencia al ataque de los álcalis DIN 523222, resistencia al ataque hídrico DIN 12111.

La superficie de los vidrios

Cuando se estudia la estructura de los materiales vítreos, por general se hace abstracción de la superficie. Cualquier teoría estructural de que se trate ignora, habitualmente, la superficie del material que, como es evidente, debe tener propiedades diferentes a las de la masa interna, ya que se haya en contacto con la atmósfera y sustancias químicas diversas, y, en consecuencia, debe poseer una estructura particular. Además, en tanto que la estructura de la masa del material, una vez consolidada, permanece estable indefinidamente a temperatura ambiente, la de su superficie puede cambiar y alterarse de muchas maneras, según las distintas interacciones que sufra con el medio ambiente, y los tratamientos de distintos tipos a que pueda ser sometida.

La formación de la superficie puede generarse por dos procesos diferentes: a partir de la masa fundida o por fractura, teniendo algunas diferencias, una de la otra, sobretodo, con lo que respecta a la cinética y forma de contaminarse una y otra, pero después de un tiempo considerable ambas pasan a formar un mismo tipo de superficie, denominada superficie normal. Cuando la superficie se origina a partir de la masa fundida, sin estar en contacto con la atmósfera (es decir en el vacío) ni con otro material, se denomina superficie prístina o virgen. Se ha demostrado que esta superficie tiene una vida muy corta, ya que es altamente reactiva y muy susceptible al roce o contacto con otras superficies, transformándose poco a poco en la superficie normal. Cuando la superficie se origina en la fractura del material, se denomina superficie fresca de fractura, y posee propiedades sumamente particulares, entre ellas su elevada reactividad química, ya que con la rotura han quedado enlaces sin satisfacer. Esta superficie reacciona con gran rapidez con la atmósfera, en particular con el vapor de agua que esta contiene, y se va transformando, con el tiempo, en una superficie normal, indistinguible químicamente de la que proviene de una superficie prístina.

La superficie normal de un vidrio puede a su vez sufrir alteraciones o modificaciones, ya sea por ataque químico, por intercambio iónico con sales fundidas, por tratamientos térmicos, o por deposición de capas de óxidos, metales o materiales plásticos de diversos tipos.

Adsorción. La adsorción es un proceso en el cual las moléculas de un gas o un vapor se concentran preferentemente sobre la superficie de un sólido con el cual están en contacto.

El fenómeno de la adsorción tiene gran importancia práctica: en las técnicas de vacío, y en la fabricación de tubos electrónicos (válvulas de radio, tubos de TV, lámparas incandescentes, sustratos para microcircuitos, etc.), los gases adsorbidos por la superficie de los vidrios deben eliminarse mediante técnicas de alto vacío y calentamiento simultáneo u otras técnicas (uso de getters), ya que de otra manera interferirán con los fenómenos eléctricos o electrónicos.

Las superficies de los vidrios adsorben normalmente cantidades variables de gases como N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 , SO_2 , NH_3 y vapor de H_2O , ya sea durante su fabricación o a lo largo de su vida útil. La curva que relaciona la cantidad de gas adsorbidos por unidad de superficie con la presión del gas, a temperatura constante, se denomina isoterma de adsorción. La isoterma de adsorción depende de la composición química, de su historia térmica, y del estado de la superficie. El proceso de eliminación de la sustancia adsorbida se denomina desorción.

La adsorción puede tener lugar por dos mecanismos. Puede tratarse de adsorción física, en la cual las moléculas están unidas a la superficie por enlaces débiles (fuerzas de Van Der Waals), y, por lo tanto, no se requiere mucha energía para eliminarlas; ejemplos: N_2 , CO , gases inertes; o bien puede tratarse de adsorción química, en la cual se forman verdaderos enlaces químicos entre las moléculas adsorbidas y la superficie. Ejemplos típicos de este último caso son el del H_2O y de los iones OH^- , que se unen a los óxidos de la estructura del vidrio (puenteado o no) por enlaces de hidrógeno. En estos casos se requieren condiciones más energéticas (temperaturas relativamente altas, pero siempre mayores a los $450\text{ }^\circ\text{C}$, y vacío), para eliminarlas totalmente.

Adhesión. Se entiende por adhesión, la unión estable de muchas sustancias sólidas al vidrio, y, en líneas generales, el fenómeno es básicamente similar al de adsorción. Cuando la unión tiene lugar a altas temperaturas, por encima del punto de ablandamiento del vidrio, se denomina soldadura, y puede tener lugar entre vidrio/vidrio, vidrio/cerámico o vidrio/metal.

A temperatura ambiente o relativamente baja, una gran cantidad de sustancias se adhieren o pegan al vidrio, las cuales podemos agrupar en tres categorías:

- 1) metales. Ejemplo: fabricación de espejos por deposición de plata o aluminio sobre la superficie del vidrio; vidrios reflejantes obtenidos por deposición de vapores metálicos en alto vacío.
- 2) óxidos y fluoruros. Ejemplos: capas protectoras de SnO_2 (estatizado) y TiO_2 (titanizado) aplicadas sobre envases de vidrio para preservar su resistencia mecánica; capas antirreflejantes de CaF_2 y MgF_2 aplicadas sobre lentes y otros elementos ópticos; capas dieléctricas y semiconductoras, etc.
- 3) polímeros orgánicos. Los ejemplos son múltiples, ya que se trata de un conjunto de materiales compuestos que se desarrollan día tras día: plásticos reforzados con fibra de vidrio o microesferas de vidrio; vidrios laminados; recubrimientos plásticos para envases y otros objetos de vidrio.

Método de fabricación del vidrio plano

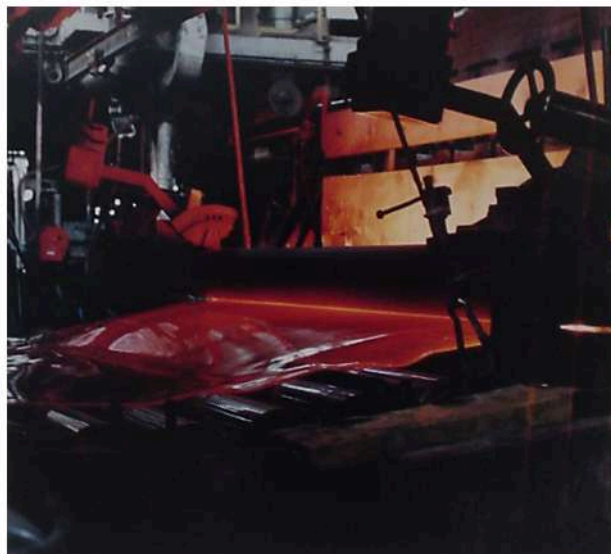
Vidrio plano. Incluye vidrio laminado (colado); transparente pulido (incorrectamente llamado cristal); estirado, flotado (vidrio para ventanas); vidrio armado (con armazón metálico interior); vidrios atérmicos; vidrios en general para la industria de la construcción.

Los métodos de fabricación del vidrio plano han sido muy diversos pasando por el soplado con caña, de los cuales se derivaron diversos submétodos, luego por el método de guisado, método de laminado, método de estirado, y el método de flotado; como principales métodos de fabricación.

Actualmente se encuentran en fabricación dos tipos de vidrios planos el vidrio plano flotado y el vidrio plano catedral, siendo el de mayor producción el primero. Estos vidrios son generalmente utilizados para el acristalamiento de aberturas donde los vidrios catedral se utilizan como traslucidos, es decir que permiten el paso de la luz pero no es posible ver a través de ellos, estos vidrios catedral son utilizados cuando se requiere privacidad en un ambiente o por motivos estéticos, en tanto que el vidrio flotado es utilizado cuando se requiere que además que pase la luz a través de ellos sea posible ver a través de ellos. Tanto el vidrio catedral como el flotado están disponibles en el mercado en una gran variedad de colores y espesores.

El vidrio catedral se fabrica por el método de laminado, mientras la masa del vidrio todavía se encuentra blanda (unos 550 a 600 °C) se hace pasar la placa de vidrio entre rodillos acero y por encima del vidrio el rodillo que tiene el negativo del dibujo que se quiere estampar posteriormente sobre el vidrio. Luego siguen una serie de rodillos por los que se va logrando que el vidrio se vuelva más plano. El vidrio que es una masa continua de un ancho y espesor determinados pasa, luego de ser laminado con los rodillos, a través de un horno de recocido en forma continua y al final de este se lo corta a las medidas estándar.

El proceso de vidrio laminado se puede apreciar en la siguiente fotografía:



Proceso de laminado de vidrio catedral

En la fotografía de arriba se puede apreciar un rodillo con contrapesos, dependiendo a la velocidad que se haga girar los rodillos y al peso que ejercen los contrapesos sobre la lámina continua de vidrio se logra regular el espesor del vidrio y la intensidad de la impresión sobre el mismo.

En la fotografía que sigue se puede apreciar el dibujo del vidrio y del rodillo laminador:

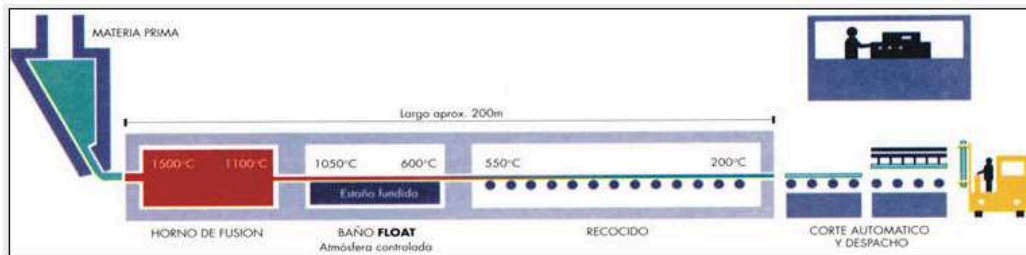


Vidrio catedral laminado con su rodillo laminador

El proceso de vidrio flotado, denominado comercialmente flota; consiste en hacer pasar una lámina de vidrio fundido, alimentada por rebalse del horno de cuba, sobre un baño de estaño metálico fundido. Esta operación debe hacerse bajo atmósfera reductora (hidrógeno y nitrógeno), para evitar la oxidación del metal, y con un gradiente de temperatura perfectamente regulado para evitar inhomogeneidades en el vidrio. La lamina sale de la cámara de flotado y prosigue, en forma horizontal, dentro del horno de recocido, a la salida del cual se corta a una medida estándar denominada jumbo de $5,5 * 3,6$ [m].

El vidrio plano flotado tiene caras planas y paralelas y “pulidas al fuego”, aunque no son idénticas: una esta en contacto con el metal fundido y la otra con la atmósfera, pero en la práctica son indistinguibles a simple vista.

En el siguiente dibujo se puede ver un esquema de una planta típica de vidrio flotado:



Esquema de la producción de vidrio flotado

Según a la velocidad que se vaya estirando el vidrio quedara determinado el espesor del mismo, la velocidad de estirado esta limitada principalmente por el proceso de recocido que necesita el vidrio, dependiendo aproximadamente de la inversa del cuadrado del espesor, por ejemplo la velocidad de estirado de vidrio de 3 [mm] de espesor esta en el orden de los 500 [m/h], mientras que para un vidrio de 10 [mm] de espesor es unas 10 veces menor.

La capacidad de una planta esta determinada en toneladas por día, una planta típica tiene una longitud total de 800 [m], con una cámara de flotación de 60 [m] de largo por 8 [m] de ancho, una producción de 500 [T/día] y una inversión inicial de 120 millones de dólares norteamericanos, una vida útil de 10[años], luego de los cuales se la somete a reconstrucción y con una inversión del 30% de la inicial se la puede dejar en condiciones de funcionar 10 años mas luego de los cuales se vuelve a hacer una reconstrucción.

En la siguiente fotografía se puede ver una maqueta de una planta de producción de vidrio flotado, es una maqueta de la planta Flachglas en Torgau Alemania:



Maqueta de planta de producción de vidrio flotado

Para que sea posible lograr una producción de vidrio flotado, económicamente viable la dimensión de la planta es muy grande, para dar una idea en Argentina hay una sola planta de producción, en tanto que en Brasil hay solo 2 plantas, en EE.UU. hay cerca de 20 plantas y en Europa también hay cerca de 20 plantas. Como aclaración la planta de la maqueta ya no se encuentra operando ya que su reducido tamaño la sacado del mercado por tener costos de producción unitarios excesivamente altos.

Solicitaciones térmicas y mecánicas del vidrio plano

Las solicitaciones a las cuales se ve sometido un vidrio plano, dependen del uso de este.

En el caso de cerramientos, que es el uso principal del vidrio plano, el stress térmico debido a la incidencia de los rayos del sol sobre la placa de vidrio y la acción del viento el cual produce una diferencia de presión en las distintas caras de un vidrio son las solicitaciones principales a las cuales se ve afectado. A estas hay que agregarles o considerar los posibles impactos a los que puede llegar a ser sometido un vidrio, los cuales dependen del emplazamiento del vidrio y están contemplados y regulados por la normas Iram 12556 (Vidrios planos de seguridad para la construcción), 12595 (Prácticas recomendadas de seguridad para áreas vidriadas susceptibles de impacto humano), 12596 (Práctica recomendada para el empleo de vidrios de seguridad en la construcción), 12559 (Ensayo de impacto), 12841 (Casos de vidrio de seguridad aptos para usar como antibandalismo y antibala). Otro factor a tener en cuenta son las posibles fuentes de calor que puedan estar cerca de un vidrio o caño (de fluido o agua caliente) o tubo de escape de algún gas que se encuentre cerca de un vidrio que pueda causar la rotura térmica del mismo, lamentablemente este tema no tiene ningún tipo de regulación. Además de estos pero en menor medida existen solicitaciones del tipo acústicas que puedan estar en las cercanías de las frecuencias de resonancia de las placas de vidrio pero estas suelen ser despreciadas, tampoco se registran antecedentes que estas solicitaciones hayan causado accidentes. Finalmente se debe considerar el propio peso de la placa el cual es crítico en el caso de acristalamientos para techos o en el lugar de sujeción del vidrio.

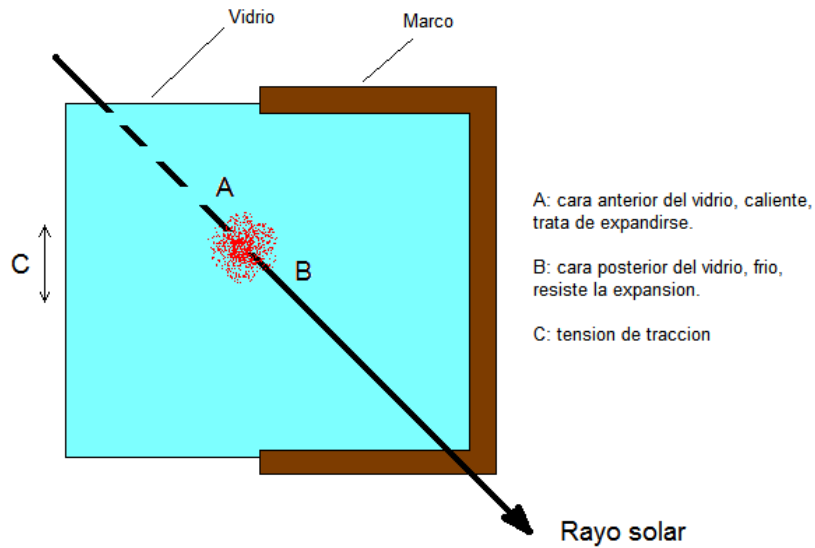
Los vidrios planos además se utilizan como tapas de mesas o directamente como mesas, en estos casos las solicitaciones se ven determinadas por el propio peso de la placa, las cosas que se le apoyan directamente encima, en este caso si se trata de una tapa de mesa la solicitación estará dada por una interacción del peso y la distribución de este y de la condición en que se encuentre la superficie donde se encuentra apoyado el vidrio, las solicitaciones que generen las cosas calientes que se le puedan apoyar y los posibles impactos que pueda recibir la placa de vidrio.

Stress térmico:

El vidrio colocado en una abertura esta sometido a la radiación solar y absorbe calor, lo cual eleva su temperatura y lo obliga a dilatar. Pero si el vidrio se encuentra dentro del marco de una ventana y protegido por contravidrios, los bordes recibirán menos calor y estarán a menor temperatura que el centro, que recibe toda la radiación. Como consecuencia el centro necesitara dilatar más que los extremos y esto generara una tensión entre ambos (stress térmico) que puede producir la rotura del vidrio.

Esto es muy probable que ocurra si la diferencia de temperatura entre la zona caliente y la fría supera los 40 °C.

En la figura 1 abajo se esquematiza esta situación.



Generacion de la tension termica

Las características de las ventanas tienen mucha importancia en el desarrollo de las tensiones que conducen a la fractura por stress térmico, por ejemplo, si el marco de la ventana es pobre conductor del calor (madera, PVC), la temperatura de los bordes será menor y, por consiguiente, el stress térmico mayor. En la figura 1 de arriba se observa la influencia del material en la reducción de la tensión térmica por borde frío/centro caliente.

Tabla de la influencia del marco para reducir la tensión térmica
Por borde frío/centro caliente

Material del marco	reducción
Hormigón y ladrillos	0 %
Madera	10 %
Metal de color claro	20 %
Metal de color claro con corte de puente térmico	25 %
Metal de color oscuro	25 %
Metal de color oscuro con corte de puente térmico	30 %
Material plástico o goma	50 %
DVH estructural	60 %
Simple vidriado estructural	70 %

Los colores oscuros absorben más calor (negro, por ejemplo) por lo que mantienen el borde más caliente y disminuyen el stress térmico.

Si el marco está térmicamente aislado del muro, los bordes del vidrio se calentarán más rápidamente y el stress térmico será menor; por el contrario si el marco presenta un buen contacto térmico con la estructura del muro, los bordes del vidrio perderán calor por conducción hacia la masa fría del muro, disminuirá la temperatura del marco y aumentará la tensión por stress térmico.

La altura del contravidrio debe ser tal que permita mantener retenido con seguridad al paño de vidrio. Normalmente se utiliza de 2 a 3 mm más que el espesor del vidrio. Se debe evitar usar contravidrios más altos porque al aumentar la altura, aumenta la diferencia de temperatura entre el centro y el borde del vidrio y por consiguiente aumenta la tensión por stress térmico.

La intensidad de la radiación solar es muy importante en relación al desarrollo del stress térmico en el vidrio y se ve influenciado por:

- La ubicación geográfica del edificio (latitud)
- Orientación e inclinación del paño respecto de la vertical
- Estación del año y hora del día
- Presencia de nubes y contaminación atmosférica
- Reflectividad del terreno y de las estructuras adyacentes al edificio.

La variación de temperatura del centro del vidrio acompaña la variación de temperatura del ambiente, pero la temperatura de los bordes varía mucho más lentamente (por el efecto de retardo que crea el marco), por lo que pueden generarse tensiones térmicas excesivas.

Cómo son las fracturas por estrés térmico

Siempre una rotura por tensión térmica se inicia a 90° de uno de los bordes del vidrio. Cuando la tensión o estrés térmico tiene poca energía, la fractura se propaga en forma de una línea curva, que casi siempre sale por un borde opuesto o contiguo. (Figura 2) Cuando la energía tiene más potencial, la velocidad de propagación es mayor y la línea curva de fractura suele multiplicarse en dos o más líneas de fractura, hasta que una o más lleguen a un borde opuesto o contiguo. (Figura 3) Si bien suele asociarse al verano como la época en que las fracturas de origen térmico se producen más frecuentemente, éstas también ocurren en otras épocas y/o en climas con una gran amplitud térmica. Casi siempre una línea de fractura se inicia en un punto débil del borde de un paño de vidrio, como pueden ser los producidos por escallas o pinzaduras.

Origen de la fractura



FIGURA 2:
fractura de baja tensión

Origen de la fractura



FIGURA 3:
fractura de alta tensión

Presión del viento:

La presión del viento es la principal sollicitación a la que está sometido un vidrio en una ventana o una fachada. La resistencia del vidrio depende de su espesor, tamaño y de su forma de sujeción en la abertura. Es responsabilidad del diseñador establecer la presión del viento y otras sollicitaciones a las que será sometido un vidrio. Conocida la presión del viento, las dimensiones y superficie del paño, y su modo de sustentación en la abertura, puede obtenerse gráficamente el espesor del vidrio, empleando los ábacos, extraídos de la Norma IRAM 12565 (Determinación del espesor adecuado del vidrio en aberturas).

Cálculo de la presión de diseño

En la Norma IRAM 12565 se detalla la velocidad instantánea máxima del viento a 10 m de altura, para distintas localidades del país, indicando la velocidad de la ráfaga máxima en m/s para cada lugar. Dicho valor debe ser corregido aplicando el factor de corrección s indicado en la tabla 1, que toma en cuenta la altura del edificio y las características topográficas y/o de edificación del entorno mediante la fórmula $V_c = V \cdot s$

Siendo

V_c la velocidad corregida del viento en m/s

V la velocidad instantánea máxima del viento, en m/s, registrada a 10 m de altura sobre el terreno.

? el coeficiente de corrección de la *tabla*.

Coeficiente de Corrección ?

ALTURA (m)	SIN OBSTRUCCIÓN Categoría A	OBSTRUCCIÓN BAJA Categoría B	ZONA EDIFICADA Categoría C
5	0,91	0,85	0,80
10	1,00	0,90	0,80
20	1,06	0,97	0,88
40	1,14	1,03	0,96
80	1,21	1,14	1,06
150	1,28	1,22	1,15

Categoría (A): Edificios frente al mar, zonas rurales o espacios abiertos sin obstáculos topográficos.

Categoría (B): Edificios en zonas suburbanas con edificación de baja altura promedio, hasta 10 m.

Categoría (C): Zonas urbanas con edificación de altura.

Cálculo de la presión del viento

Se obtiene mediante la formula

$$p = 0,9016 \cdot V_c^2$$

Siendo:

p: la presión del viento en N/m²

V_c: la velocidad corregida del viento en m/s

0.9016: un valor que tiene en cuenta los posibles efectos de la presión y succión del viento

Definición del espesor

El diseñador, siempre, deberá considerar otros aspectos que

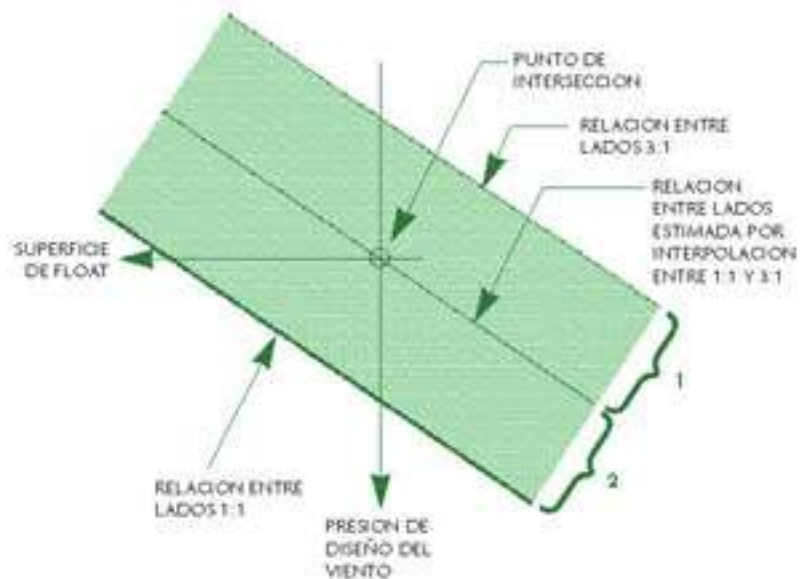
Puedan influir en la selección del espesor adecuado de un vidrio. Un aspecto que conviene tener en cuenta es el grado de aislación acústica que brinda cada espesor de vidrio, pudiendo ser necesario emplear uno mayor para satisfacer simultáneamente la resistencia a la presión del viento y el nivel de control acústico deseado.

Prevision del viento para distintas localidades de la republica Argentina

CIUDAD	RÁFAGA MÁXIMA		PRESIÓN* N/m ²
	m/s	km/h	
Buenos Aires	41	148	1515
Bahía Blanca	53	191	2535
Bariloche	42	151	1590
Catamarca	31	112	870
Cipoletti	35	126	1105
Com. Rivadavia	64	230	3690
Concordia	26	94	610

Córdoba	30	108	810
Coronel Suárez	22	80	435
Corrientes	31	112	865
Cristo Redentor	70	250	4420
Ese iza	44	158	1745
Junín	33	119	980
Laboulaye	35	126	1100
La Quiaca	29	104	760
La Rioja	35	126	1100
Mar del Plata	36	130	1170
Mendoza	33	119	990
Neuquén	28	101	710
Paraná	37	133	1235
Posadas	37	133	1235
Resistencia	37	133	1235
Río Gallegos	57	205	2930
Rosario	30	108	810
San Antonio O.	34	122	1040
Santa Rosa	43	155	1670
San Luís	34	122	1040
Trelew	36	130	1170
Tucumán	27	97	660
Ushuaia	52	187	2440

* A 10 m de altura, sin destrucción.



1. Si la relación entre lados yace en este sector, use el espesor de Float correspondiente a esta banda.
2. Si la relación entre lados yace en este sector, adopte el espesor de Float mayor siguiente.

DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ADECUADO

Mediante el ábaco, cualquiera sea el método empleado para determinar la presión del viento, puede obtenerse el espesor mínimo recomendado de un paño de Float, sujeto a ráfagas de 3 segundos de duración. El gráfico puede ser utilizado solamente para paños rectangulares, inclinados no más de 15° respecto del plano vertical. El coeficiente de forma o relación entre los lados del paño no debe ser mayor que 3 a 1. Cuando dicha relación sea mayor se deberá consultar al Servicio de Asesoramiento y/o calcular su espesor como si se tratase de un vidriado soportado, solamente, en dos lados paralelos.

UTILIZACIÓN DE GRAFICO

Cada banda diagonal brisada corresponde a un espesor de Float. Cuando el paño es cuadrado, con una relación entre la dimensión de sus lados 1:1 (límite inferior de la banda) y 3:1 (límite superior de la banda). Si el punto de intersección entre la línea horizontal correspondiente al área del paño y la vertical correspondiente a la presión del viento estuviese fuera de las bandas grisadas, debe adoptarse el espesor siguiente superior. (Ver esquema A) En caso de que la relación calculada entre lados de un paño esté cerca de la línea negra gruesa (por ejemplo para un paño cuadrado) el valor interpolado que debe aplicarse para el espesor es el de la banda siguiente. Si el valor calculado para la relación entre lados está alejado de la línea negra gruesa, entonces el espesor de vidrio correspondiente a dicha banda puede ser utilizado.

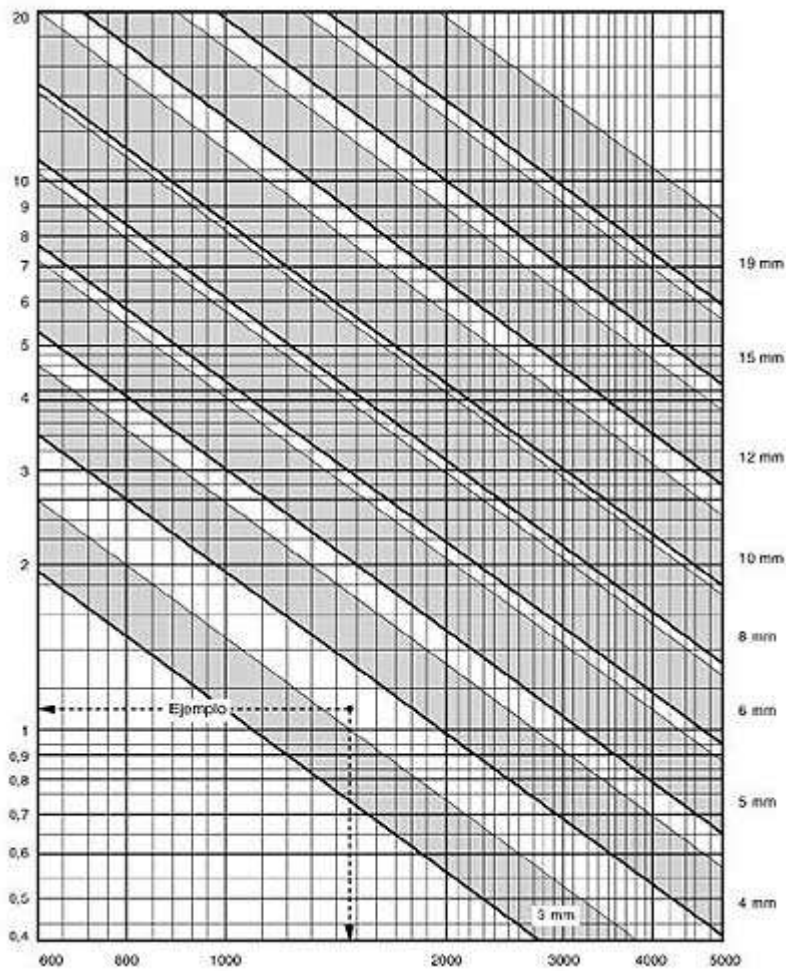
EJEMPLO DE UTILIZACIÓN DE GRAFICO

Cuál es el espesor mínimo recomendado de simple vidriado para una abertura de 1200×900 mm, para resistir una presión de viento de 1500 N/m^2 ?

- 1) Calcule el área de Float $1.2 \times 0.9 = 1.08 \text{ m}$
- 2) Busque en el ábaco el punto de intersección horizontal correspondiente a 1.08 m con la vertical correspondiente a 1500 N/m^2 .
- 3) El punto de intersección yace entre las bandas correspondientes a 3 mm y 4 mm por lo que 4 mm es el espesor mínimo aceptable de Float.

FLOAT DE COLOR

Cuando es empleado en una fachada es aconsejable unificar su espesor, pues cuando éste varía, también varían sus propiedades de transmisión de luz visible y calor solar radiante. De lo contrario se corre el riesgo de producir variaciones en el tono de la fachada, tanto vista del exterior, como a su través desde el interior.



En el grafico el eje horizontal inferior esta en N/m^2 (que es una entrada del grafico), el eje vertical izquierdo esta en m^2 correspondiente a la superficie de la abertura (este eje es otra entrada del grafico), el eje vertical derecho identifica a la banda de cada espesor de vidrio (que es la salida del grafico).

Diferentes procesos mecánicos del vidrio plano

Al vidrio plano se lo somete a diferentes procesos mecánicos, dependiendo cual va a ser la utilidad que se le desee dar. Así mismo puede que siendo que al la pieza o placa de vidrio se le de la misma utilidad el proceso mecánico que se le ejerce sea diferente, esto puede deberse a distintos factores como el costo del proceso, la disponibilidad de herramientas, la cantidad de piezas que se van a realizar, etc.

Los procesos mas comunes a los que son sometidos las placas de vidrio en los talleres ordinarios (vidrieras) son los de corte, pulido y agujereado.

El proceso de corte de vidrio es en la mayoría de los casos efectuado con los cortavidrios, con los cuales se efectúa el marcado sobre la superficie del vidrio en primer lugar y posteriormente se quiebran los vidrios; otra forma común de cortar los vidrios es mediante una sierra circular (especial para vidrios) la cual esta montada en una maquina de bajas vueltas y muy bajas vibraciones con un disco continuo (no tiene dientes) diamantado o con un hilo con pequeñas piedras de carburo de tungsteno montado sobre una arco de sierra en estos casos el corte con sierra, el corte es efectuado con abundante agua para refrigerar el corte.

El proceso de pulido de los vidrios es efectuado por diferentes métodos de los cuales algunos son refrigerados por aire y otros por agua, en los casos de pulidos muy brillantes o biselados, estos últimos son siempre refrigerados por agua ya que al ir aumentando el grano (la norma mas popular del mundo ara definir la granulometría es la norma Americana CAME) con el que se pule, este va logrando un mejor acabado pero aumenta la temperatura con lo que con un grano superior al 400 se rompería térmicamente al vidrio si no es refrigerado con agua. Las maquinas para pulir los bordes de los vidrios utilizan, discos aleteados (refrigeración por aire) en los granos 60, 80,120 y 400 normalmente donde 60 y 80 son granos utilizados para desbastar y llevar al vidrio a las dimensiones requeridas o para rectificar un borde, 120 es el grano mas utilizado en este tipo de pulidos y generalmente se lo utiliza como acabado final y 400 es un grano que se utiliza para lograr un pulido con brillo, este grano es utilizado luego del de 120 y debe utilizarse con mucha precaución ya que quema con facilidad el borde del vidrio. Otro método muy común son las pulidoras de banda continua, en la que se utiliza agua como medio refrigerante y por lo tanto no existe limite en el grano que se utilice, pero el proceso se vuelve muy lento al utilizar un grano superior al 400, tanto al utilizar maquinas de discos aleteados como pulidoras de bandas continuas los procesos son puramente manuales. Luego tenemos las maquinas que utilizan muelas diamantadas, en estas maquinas la refrigeración es llevada a cabo con agua y no existe limitación en los granos y los procesos son automáticos teniendo alta velocidad de producción en cualquier acabado y teniendo como contra que los costos de estas maquinas son muy elevados justificándose su inversión en el caso de grandes empresas.

El proceso de agujereado de los vidrios es realizado con mechas de copa diamantadas y refrigeradas con agua, hay lugares donde se utilizan mechas de punta de flecha de acero pero no es un método adecuado. El agujereado debe realizarse desde ambas comenzando por una hasta la mitad del espesor y luego de la otra cara hasta finalizar el agujero, de no realizarse así al finalizar el agujero hecho desde un solo sentido al salir la mecha va a provocar un encallado lo que por motivos estéticos o de deterioro de la resistencia mecánica o por imposibilitar algún proceso posterior (como el templado) es inaceptable.

Además de estos procesos a los vidrios se le practican otros como ser el de atacado con ácidos o el de arenado, para lograr algún dibujo sobre su superficie, en el caso de gravado con acido, se aplica una capa de cera sobre la superficie del

vidrio con el negativo del motivo y posteriormente se lo ataca con ácido fluorhídrico en determinada concentración dependiendo de la intensidad del ataque deseado, además de el ácido fluorhídrico hay otros que se utilizan pero este es el que mayormente se utiliza; el proceso de arenado se utiliza una plantilla en caso de querer lograr una alta cantidad de piezas o se le pega una lámina de plástico adhesivo en las que también se encuentra el negativo del dibujo deseado y posteriormente se lo ataca con la arenadora la cual impacta un abrasivo contra el vidrio y le va dando el dibujo al vidrio, en los vidrios no se puede utilizar arena para arenar en su lugar hay que utilizar abrasivos a base de óxidos de aluminio, tanto en Europa como en las EE.UU. esta prohibida la utilización de arena para arenar vidrios debido a que genera perturbaciones en la superficie del vidrio que lo debilitan y sobre todo porque el proceso es tóxico para el operario.

Proceso de templado y laminado

Templado térmico:

Fundamentalmente consiste en calentar la pieza de vidrio hasta una temperatura cercana al punto de ablandamiento, para inmediatamente enfriarla bruscamente (generalmente con aire a presión). La superficie del material se vuelve rígida enseguida, contrayéndose, en tanto que en el interior se mantiene fluido a altas temperaturas, dada la mala conductividad térmica del material. A medida que la temperatura se equilibra con el ambiente, se desarrollan entonces fuertes tensiones de compresión en la superficie, contrabalanceadas con las tensiones internas. Al uniformarse la temperatura queda establecido un sistema de tensiones permanentes con una distribución parabólica en el espesor. La forma de la curva y los valores máximos de tensión y compresión dependen del salto de temperatura, la velocidad de enfriamiento, las propiedades térmicas del vidrio usado, y del diseño y geometría del objeto. Este último aspecto limita la aplicación del método a aquellos objetos en los cuales se puedan enfriar ambas superficies con igual velocidad, para lograr una distribución simétrica de tensiones en el espesor. El caso ideal es el de los vidrios planos, siguiendo las formas huecas más o menos simples, en las cuales el diámetro de la boca sea mayor que el de la base. Por este motivo no pueden templarse tubos de vidrio, ni tampoco botellas, frascos u objetos similares.

La fractura del vidrio templado tiene lugar cuando la tensión aplicada (tracción) supera el valor de la compresión en la superficie; en otras palabras, la resistencia mecánica del objeto se ve aumentada en una cantidad igual a la tensión de compresión de la superficie. Para formas simples y espesores gruesos, la resistencia aumenta de 2 a 5 veces con respecto al mismo objeto sin templar, es decir recocido. Para espesores delgados, dicho aumento es menor. Se obtienen buenos resultados con vidrios de coeficiente de dilatación elevado (p. ej., vidrios comunes silicatos sodico-calcicos, mientras que para vidrios con bajo coeficiente de dilatación el efecto es pequeño o nulo. El espesor mínimo debe de ser por lo menos de 3 mm; con espesores menores el salto de temperatura debe ser menor de lo contrario se rompen.

La fractura de los vidrios templados se produce cuando la profundidad de la fisura supera el espesor de la capa superficial en compresión y llega a la zona de tracción. Dicha fractura tiene carácter explosivo, por la energía acumulada en el material, y los fragmentos resultantes son pequeños y de cantos redondeados, por lo que no resultan peligrosos, como las astillas resultantes de la rotura de un vidrio recosido. El tamaño de los trozos puede regularse convenientemente, variando el salto de temperatura y la velocidad de enfriamiento. En los vidrios planos se puede lograr un templado diferencial, enfriándolo en diferentes condiciones, en determinadas zonas del mismo. Los vidrios templados, no pueden cortarse ni conformarse, debido a que se romperían, por lo tanto deben ser trabajados previamente al proceso de templado.

Templado químico:

Los métodos de templado químico, consisten fundamentalmente en intercambiar un ion alcalino del vidrio (p. ej., Li^+ o Na^+) por otro ión alcalino de una

sal fundida en contacto con el vidrio, y cuyo radio iónico sea mayor (Na^+ o K^+), respectivamente. Al ocupar los iones más grandes los lugares que ocupaban los iones más chicos en el retículo desordenado del silicato, producen un estado de compresión en la superficie. A este tratamiento, por su similitud con el templado térmico, se lo denomina templado químico. Sin embargo hay una diferencia fundamental; en el templado químico no aparece una zona central con una gran tensión de tracción, como en el caso del templado térmico, y ello hace que cuando se rompan los objetos así tratados no lo hagan en forma explosiva.

Desde el punto de vista industrial, los tratamientos de intercambio iónico con sales fundidas se aplican a objetos relativamente pequeños y de valor elevado, dado el costo relativamente alto del proceso.

Gracias a la distribución de tensiones que tienen los vidrios templados químicamente, no se ve limitado el espesor de los objetos que se pueden templar, esta propiedad es de gran utilidad en la fabricación de lentes.

Las tensiones de compresión en la superficie del vidrio templado químicamente, pueden ser 2 o más veces superiores a las logradas con el templado térmico y además se puede regular la profundidad de la capa iónica sustituida, lo que hace que el templado químico sea mucho más resistente que el templado térmico, puede ser del orden de 4 veces.

Laminado:

El vidrio laminado es un vidrio de seguridad, el cual está compuesto de dos vidrios comunes recocidos, con una lámina de plástico de PVB adherida entre ambos vidrios, formando una especie de sandwich en su forma más común y simple. El objetivo de la lámina de PVB es mantener los pedazos de vidrio unidos cuando se produce la rotura del mismo de modo de evitar lesiones en los posibles impactos.

Existen vidrios multilaminados o laminados con vidrios templados para aplicaciones especiales, como por ejemplo antibalas.

El proceso de fabricación del vidrio laminado comienza con la limpieza, la cual es muy minuciosa, ya que cualquier mancha que quede en el lado que se une a la lámina de PVB no podrá eliminarse posteriormente. Luego en un cuarto aislado a una temperatura controlada de 20 [°C] (necesaria para que no se dañe el PVB), se coloca sobre una mesa una placa de vidrio limpia, posteriormente se coloca sobre esta placa de vidrio una lámina de PVB de 0,38 [mm] de espesor (espesor más comúnmente utilizado, para aplicaciones especiales es diferente), la lámina de PVB sobresale unos 2 [cm] de los bordes de la placa de vidrio, seguidamente se coloca una segunda placa de vidrio sobre la lámina de PVB haciendo coincidir los bordes de las placas de vidrio. El conjunto así armado sale de la sala deslizándose sobre una mesa, a la salida de la sala se encuentra con unos rodillos que le ejercen presión desde ambas caras y una resistencia que emite ondas en una longitud de onda determinada que solo calienta la lámina de PVB que se encuentra entre ambas placas llevando a esta lámina de plástico a unos 55 [°C] y al mismo tiempo los rodillos van eliminando el aire que se encuentra entre los vidrios y la lámina de PVB. Luego de ser unidos las placas de vidrio y la lámina de PVB en un solo conjunto, este conjunto es introducido en un horno autoclave. En el horno autoclave el conjunto permanece cerca de 4 [hs] a una temperatura de 200 [°C] a una presión de 40 [bar], donde posteriormente se realiza un pequeño tratamiento de recocido con lo cual el conjunto queda convertido en un vidrio laminado de seguridad.

Luego de salir los vidrios laminados del autoclave tienen una dimensión de 2500 * 3600 [mm] y pueden ser cortados, agujereados, etc. y pueden tener la combinación de espesores que se quiera.

Diferentes técnicas de corte del vidrio

Los diferentes procesos que existen de corte de vidrio plano en la industria son básicamente tres: Primero esta el corte mediante marcado con cortavidrios y posterior apertura del corte por proceso manual o automático, segundo lugar el corte mediante sierra de disco continuo diamantado refrigerado por agua y por ultimo el corte mediante water jet (chorro de agua).

El primer proceso de corte es con el que se corta el 99% del vidrio, dependiendo de la instalación del taller y la complejidad del corte se hace automático o manual. El caso de corte manual es tratado con profundo detalle durante todo el trabajo, en el caso de corte automático este se realiza mediante mesas con puentes de control numérico que llevan la rulina de marcado y tiene unas reglas debajo de las mesas mediante las cuales al levantarse se produce la apertura de los cortes. En el caso de los cortes automáticos estos se pueden realizar siempre y cuando el corte sea recto.

En el segundo caso se emplea como soporte del primero o cuando se pretenden sacar pequeñas tiras rectas de los vidrios en general de gran grosor. En el capítulo de diferentes tipos de corte, corte de círculo central se puede ver cuando se utiliza la sierra como soporte de el primer caso, también en al parte de diferentes tipos de cortes hay otros casos donde se puede apreciar cuando se utiliza la sierra como soporte.

En el tercer caso es el de menor frecuencia, este proceso de corte se utiliza en casos especiales de los cuales el 90% es para objetos decorativos, este es un corte mediante el cual un chorro de agua que porta un abrasivo a muy alta velocidad impacta contra el vidrio y lo va cortando por desgaste sucesivo, el cabezal de la maquina esta controlado numéricamente y de este modo puede lograrse mediante programación la figura deseada.

ANÁLISIS DE LA FRACTURA DEL VIDRIO

(PARTE 2)

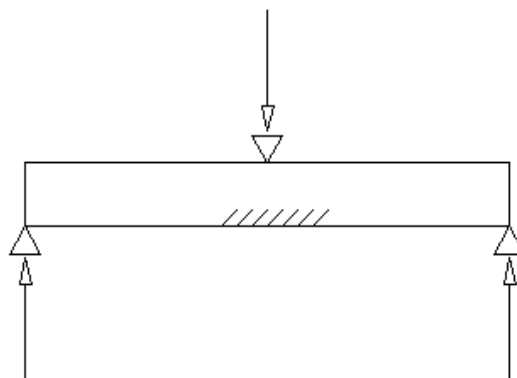
Teoría de la resistencia mecánica del vidrio plano (Ensayo de 3 y 4 puntos)

Un vidrio se rompe siempre por tracción, y, por lo tanto, un ensayo de tracción debería ser el más indicado para evaluar la resistencia mecánica del vidrio. Sin embargo, en la práctica surgen dificultades experimentales para su realización, en particular en lo que se refiere a la sujeción de la muestra. Por ejemplo, si se estiran varillas o fibras hasta que se rompan, se deberán sujetar por los extremos de manera tal que no se deslicen, pero cualquier tipo de mordaza que se utilice dañara la superficie del vidrio y aumentara la probabilidad de rotura en esa zona, no reflejando el resultado del ensayo por consiguiente, la real resistencia del objeto. Se han desarrollado muchos artificios experimentales para eludir este problema, pero como en el fondo es un obstáculo insalvable, y se opta por realizar otro ensayo.

Es de hacer notar que la preparación de probetas para ensayos de tracción con un angostamiento en la parte central, como se hace para materiales metálicos, no sirve para el caso de los vidrios, ya que lo que se mediría en tal caso sería la resistencia de la probeta y no del cuerpo a partir del cual fue preparada.

Ensayo de flexión:

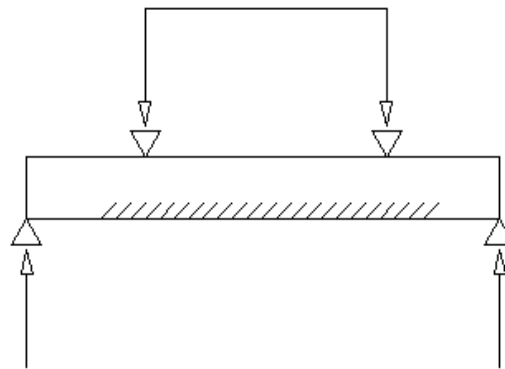
En el grafico debajo, se muestra la forma más común de llevar a cabo un ensayo de flexión: una varilla o barra o tira de vidrio apoya sobre dos soportes cercanos a sus extremos, y se ejerce presión en su parte central. Es fácil ver que en el punto donde se ejerce la presión se crea una zona en compresión, mientras que en la zona diametralmente opuesta (grisada en el grafico 1) se crea una zona en tracción. Es en esta zona donde normalmente se inicia la rotura. Es habitual denominar al esfuerzo aplicado en el momento en el que se produce la fractura MODULO DE ROTURA o MOR (del ingles modulus of rupture).



Ensayo de flexion metodo de los tres puntos
lo rayado indica la zona de traccion

Los resultados del MOR obtenidos de esta forma son pasibles, sin embargo, de una objeción importante: ellos dependerán del carácter más o menos crítico de las microfisuras presentes en la zona en tracción; en otras palabras, reflejaran la resistencia mecánica solamente en esa zona del objeto. Si hubiera una microfisura importante o crítica lejos de esa zona, que podría debilitar al objeto si los esfuerzos se aplicasen de otra manera, pasaría inadvertida, es decir, el ensayo daría un valor erróneamente elevado del MOR.

Una modificación mas racional del ensayo es la que muestra el próximo grafico abajo. En este método (denominado "método de los cuatro puntos"), la presión se aplica sobre dos puntos equidistantes del centro y, por lo tanto, la zona en tracción se amplia reflejando los datos del MOR obteniedo con mayor realismo el comportamiento mecánico de la muestra.



Ensayo de flexion metodo de los cuatro puntos
lo rayado indica la zona de traccion

Seguidamente se muestra una fotografia del ensayo de flexión de tres puntos:



Ensayo de flexion de 3 puntos

La siguiente tabla muestra los resultados de las fuerzas medidas del ensayo:

Espesor [mm]	Peso [N] (P)	Puntos
2.88	21.19	3
2.87	22.66	3
2.87	22.46	3
2.78	22.96	3
2.88	21.88	3
2.78	22.37	3
2.88	21.39	3
2.88	23.45	3
3.75	45.13	3
3.86	42.67	3
3.86	40.22	3
3.86	37.18	3
3.75	46.21	3
3.78	38.55	3
3.78	40.91	3

*Nota el espesor comercial de estos vidrios son de 3 mm y 4 mm.

Seguidamente se muestra una fotografia del ensayo de flexión de cuatro puntos:



Ensayo de flexión de 4 puntos

La siguiente tabla muestra los resultados de las fuerzas medidas del ensayo:

Espesor [mm]	Peso [N] (P)	Puntos
2.78	27.67	4
2.78	23.64	4
2.88	29.23	4
2.87	35.32	4
2.78	28.15	4
2.87	27.83	4
2.78	24.32	4
2.88	28.06	4
3.75	46.11	4
3.78	45.52	4
3.78	48.85	4
3.75	40.12	4
3.75	58.27	4
3.86	40.22	4
3.75	53.86	4
3.86	55.92	4

*Nota el espesor comercial de estos vidrios son de 3 mm y 4 mm.

La fuerza en los ensayos se determinaba con el peso del agua que se iba agregando en los bidones que se pueden observar en la fotografía del ensayo de tres puntos mas el peso de los accesorios que se distinguen en cada fotografía y despreciando el peso propio de cada pedazo de vidrio; el agua se iba agregando con un caudal determinado de modo que el efecto dinámico del agua cayendo dentro de

los bidones no influya en forma significativa sobre los resultados del ensayo, además el agregado de dicha agua no puede realizarse muy lentamente debido al fenómeno de fractura diferida, que está explicado en detalle en otro capítulo de este trabajo, por lo que hay que encontrar una relación de compromiso, en caso de que se normalizara dicho ensayo, debería estar especificado el caudal. En la siguiente fotografía se puede apreciar como se agregaba el agua en el ensayo:



Agregado de líquido en el ensayo de 4 puntos

Seguidamente se mostrara una fotografía de cómo se fracturo el pedazo de vidrio que se muestra en la fotografía anterior, es de notar el lugar donde se produjo la rotura:



Rotura del pedazo de vidrio en el ensayo de 4 puntos

Se puede apreciar en la fotografía de arriba que el pedazo de vidrio se fracturo entre los puntos de presión que tiene el mismo en la parte superior, esto es debido a que entre estos puntos se encontró la microfisura mas critica y que la sollicitación mecánica de tracción es prácticamente la misma entre estos puntos sobre el pedazo de vidrio, lo que da evidencia de que un ensayo de cuatro puntos es adecuado para analizar la resistencia mecánica del pedazo de vidrio.

En este ensayo la tira o pedazo de vidrio es sollicitada como si fuera una viga, con lo que las tensiones sobre el pedazo de vidrio pueden ser analizados como un problema plano.

En este ensayo las tiras de vidrio tenían todas 30 [mm] de ancho, 410 [mm] de largo y los espesores están especificados en las tablas. La distancia entre apoyos es de 400 [mm] con lo que los pedazos de vidrio volaban por fuera de los apoyos 5 [mm] de cada lado. En el caso del ensayo de cuatro puntos la distancia entre los puntos que sollicitaban al pedazo de vidrio desde la parte superior es de 136 [mm]. Como aclaración los 5 [mm] de vuelo pueden apreciarse en las dos primeras fotografías de este punto, en las fotografías de mas abajo se puede ver que la distancia se volado es mayor pero este pedazo de vidrio no corresponde al ensayo, esta como elemento demostrativo.

Seguidamente se mostraran los diagramas de corte y momentos flectores de los ensayos de tres y cuatro puntos. Considerando positivas las fuerzas hacia arriba y positivos los momentos flectores que generan una concavidad hacia abajo:

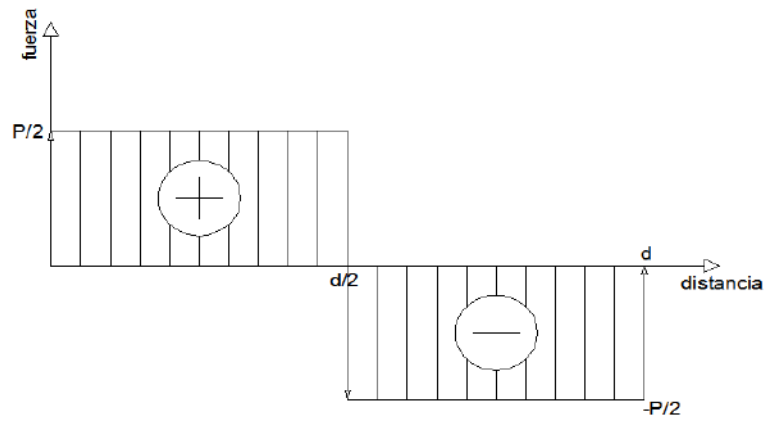


Diagrama de fuerzas de corte del ensayo de 3 puntos

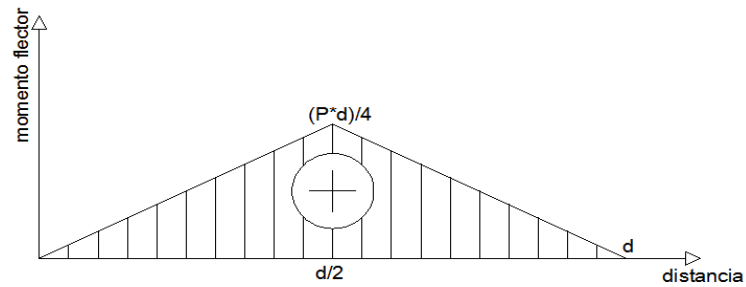


Diagrama de momento flector del ensayo de 3 puntos

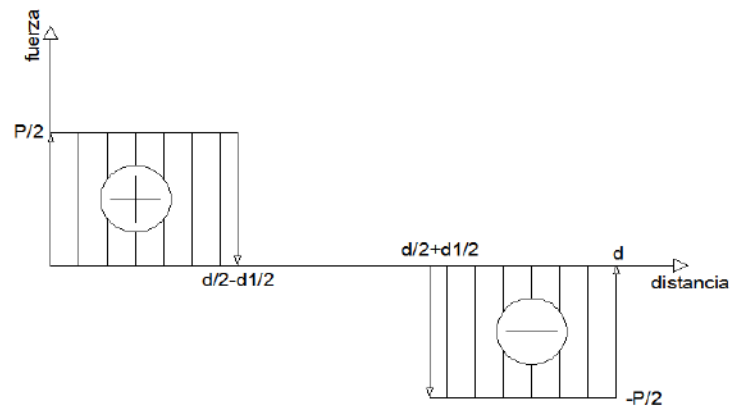


Diagrama de fuerzas de corte del ensayo de 4 puntos

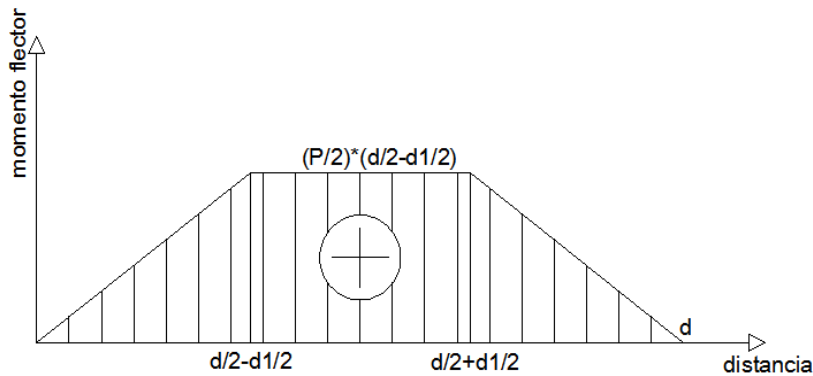


Diagrama de momentos flectores del ensayo de 4 puntos

En los diagramas se muestran la fuerza P que puede extraerse de las tablas de los ensayos, en tanto que las distancias d y d1 son las distancias entre apoyos del pedazo de vidrio y la distancia entre los puntos que solicitaban al pedazo de vidrio desde la parte superior en el caso del ensayo de cuatro puntos respectivamente.

Luego se consideran las sollicitaciones internas de la tira de vidrio durante los ensayos, donde se considera el esfuerzo máximo de tracción y la tensión máxima de corte, las cuales se localizan en la cara inferior del pedazo de vidrio y en la superficie media entre la cara superior e inferior respectivamente.

La tensión de tracción máxima va a estar dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Traccion_maxima} = \frac{6 * M_{Flector_maximo}}{b * e^2}$$

La tensión de corte máxima va a estar dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{corte_maxima} = \frac{3 * V_{corte_maximo}}{2 * b * e}$$

Donde b y e son el ancho y el espesor de la tira de vidrio respectivamente

A continuación se muestran las tablas con las tensiones de corte y tracción de los ensayos de tres y cuatro puntos.

Espesor [mm]	Peso [N] (P)	Puntos	tensión de corte	tensión de tracción
--------------	--------------	--------	------------------	---------------------

			máxima en [MPa]	máxima en [MPa]
2.88	21.19	3	0.184	51.1
2.87	22.66	3	0.197	55
2.87	22.46	3	0.195	54.5
2.78	22.96	3	0.206	59.4
2.88	21.88	3	0.190	52.8
2.78	22.37	3	0.201	57.9
2.88	21.39	3	0.186	51.6
2.88	23.45	3	0.204	54.5
3.75	45.13	3	0.301	65.6
3.86	42.67	3	0.276	57.3
3.86	40.22	3	0.273	54
3.86	37.18	3	0.241	49.9
3.75	46.21	3	0.308	65.7
3.78	38.55	3	0.255	54
3.78	40.91	3	0.271	57.3

	Espesor [mm]	Peso [N] (P)	Puntos	tensión de corte máxima en [MPa]	tensión de tracción máxima en [MPa]
los	2.78	27.67	4	0.249	47.3
	2.78	23.64	4	0.213	40.4
	2.88	29.23	4	0.254	46.5
	2.87	35.32	4	0.308	56.6
	2.78	28.15	4	0.253	48.1
	2.87	27.83	4	0.242	44.6
	2.78	24.32	4	0.219	41.5
	2.88	28.06	4	0.244	44.7
	3.75	46.11	4	0.307	43.3
	3.78	45.52	4	0.301	42.1
	3.78	48.85	4	0.323	45.1
	3.75	40.12	4	0.267	37.7
	3.75	58.27	4	0.388	54.7
	3.86	40.22	4	0.260	35.6
	3.75	53.86	4	0.359	50.6
	3.86	55.92	4	0.362	49.5

De

resultados de las tensiones obtenidas en las ultimas dos tablas se observa que las tensiones de corte carecen de importancia. Por otro lado se puede observar como un ensayo de cuatro puntos se acerca mucho mas al valor de resistencia del vidrio utilizado como norma que es de 35 [MPa], en el ensayo de cuatro puntos se pudo ver valores que se acercaron al valor tenido en cuenta como resistencia mecánica del vidrio pero nunca se obtuvo un valor inferior a este, los resultados presentan gran dispersión, esto se debe a que la resistencia del vidrio es un factor a lazar que depende de que se encuentre en la zona de mayor tracción una microfisura critica.

Teoría de Griffith y de la concentración de tensiones

La teoría moderna de la rotura de los cuerpos frágiles reales, se basa en una enorme cantidad de datos experimentales, y fundamentalmente en la teoría estadística de los defectos, y puede resumirse en tres puntos básicos:

- 1- Un cuerpo frágil real se rompe cuando el esfuerzo aplicado sobre él supera la resistencia de su parte más débil (por eso Littleton decía que cuando se mide la resistencia de un vidrio en realidad lo que se está midiendo es la debilidad de su superficie).
- 2- La existencia de un cuerpo frágil real, sometido a un esfuerzo homogéneo, no depende de ninguna constante del material, sino de su defecto más crítico.
- 3- Cuanto mayor es el volumen (la superficie) de un cuerpo frágil real, mayor es la posibilidad de la presencia de un defecto crítico, y por lo tanto mayor es la probabilidad de que su resistencia mecánica se baja.

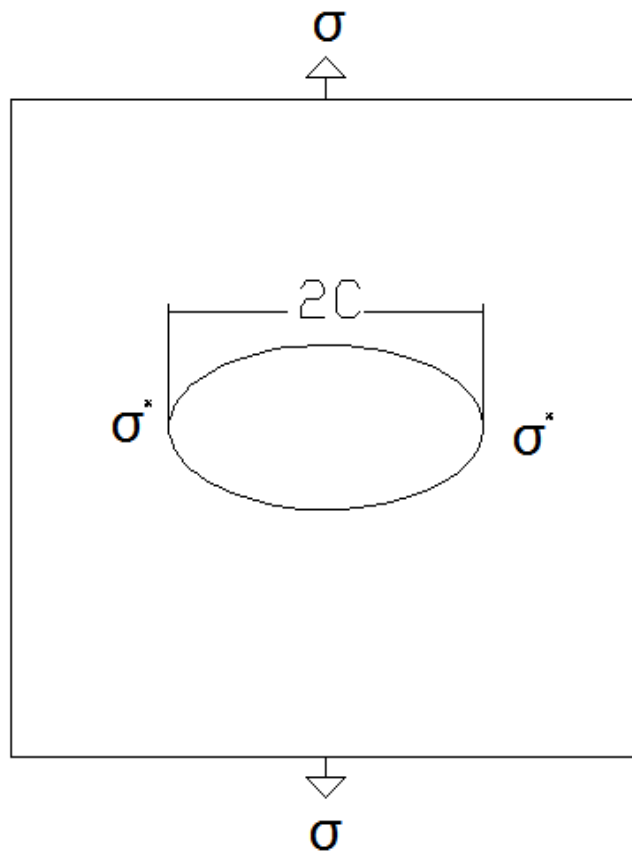
La base de la teoría para explicar la rotura frágil de los vidrios es la teoría de Griffith. La teoría parte de presuntivo de que, para que se produzca la rotura frágil de un material, para valores de tensión aplicada inferiores a la resistencia teórica mecánica, debe existir previamente en el material una fisura o una entalla capaz de propagarse.

Cuando la dirección del esfuerzo aplicado es perpendicular a la fisura, puede aplicarse según Griffith, un criterio para calcular el esfuerzo mínimo necesario para que la fractura se propague debido a la multiplicación de dicho esfuerzo en los extremos de la misma. La deducción de dicho criterio se basa en la distribución de la energía total asociada con la longitud de dicha fisura. Las energías en equilibrio son: la energía potencial de la tensión aplicada, la energía elástica de la deformación del material, y la energía superficial de la fisura, ya que en la fractura del vidrio no se produce deformación plástica (pero igualmente el proceso no es regenerativo ya que el vidrio queda fragmentado). Griffith propuso que la fisura se vuelva inestable y comience a propagarse (es decir, aumentando su energía superficial), la disminución de la energía elástica por disminución de las tensiones durante el avance de la fisura debería ser mayor o por lo menos igual al aumento de energía superficial representado por la creación de nuevas superficies de fractura. Ya que un sistema tiende a su condición de mínima energía, y al ver que no existen barreras potenciales que frenen el avance de la fractura, esta se propaga naturalmente. Para una fisura de longitud $2c$ (ver la siguiente figura), la tensión máxima σ_{\max} que puede soportar un material sin romperse es, según Griffith:

$$\sigma_{\max} = \frac{2E\gamma}{\pi c}$$

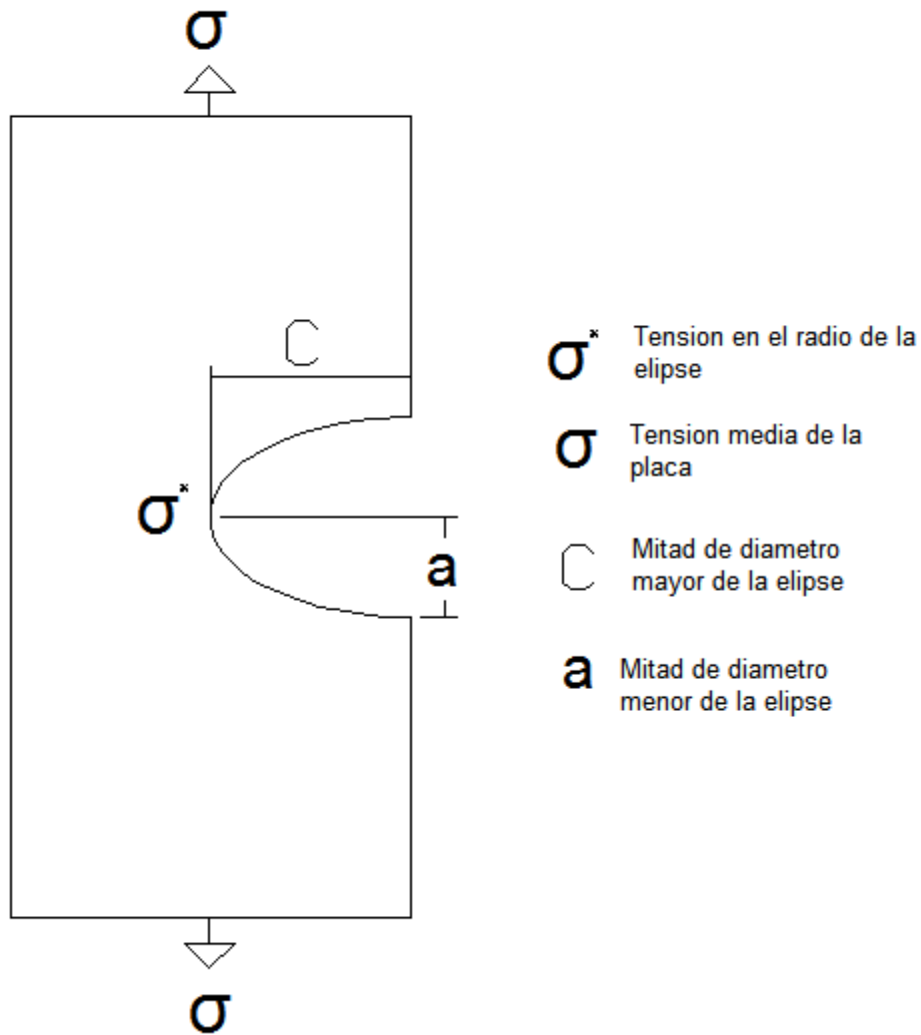
siendo E el módulo de Young y γ la tensión superficial del sólido. Este valor es de difícil determinación; puede extrapolarse a partir de los valores de la tensión superficial del vidrio fundido. Para los vidrios silicatos sodico-cálcicos comunes, el valor de γ es del orden de 5 o $6 \cdot 10^4$ $\text{kgf} \cdot \text{m}^{-1}$. Cuando la tensión aplicada supera el valor de σ_{\max} , la fisura se propaga.

Microfsura idealizada de cento de la placa



- σ^* Tension en el radio de la elipse
- σ Tension media de la placa
- c Mitad de diametro mayor de la elipse

Microfisura idealizada de borde



Si la tensión aplicada es σ , la tensión en el extremo de la fisura es mayor, y puede calcularse por la formula de Inglis:

$$\sigma^* = \sigma \left(1 + \frac{2c}{a} \right) = 2\sigma \frac{c}{\rho}$$

siendo a la mitad del ancho de la fisura, y ρ su radio de curvatura ($\rho = a^2/c$). puede verse que cuanto mas larga y mas angosta sea la fisura, mayor será σ^* ; de este modo el valor de σ^*_{max} podrá alcanzarse mucho antes que σ llegue al mismo, y el vidrio se romper para valores de σ relativamente pequeños. Llevando el razonamiento al nivel estructural, se puede suponer que el valor de σ^*_{max} corresponde a la energía necesaria para romper un enlace Si-O. Si se toma el valor

de a del orden de la longitud del enlace Si-O, resulta que el valor de σ^* puede superar por varios ordenes de magnitud el valor de la tensión aplicada σ . Como la estructura del vidrio es rígida y no admite dislocaciones, la fractura solo puede propagarse en esta forma.

La teoría de la fractura frágil permite explicar la aparente discrepancia entre la resistencia mecánica real de un vidrio y su valor teórico. En efecto, cuando mayor sea la longitud de una fisura, menor será el esfuerzo aplicado necesario para fracturar el material. En consecuencia, cuanto mayor sea el tamaño y la cantidad de las fisuras de un objeto de vidrio, menor será su resistencia mecánica. Se deduce así que la última no dependerá de alguna propiedad del material en si (como la composición química, la viscosidad u otra), sino de la cantidad y tamaño de las fisuras presentes. Se deduce también que no tiene sentido hacer el cálculo de la resistencia mecánica de un objeto de vidrio en forma similar a la que se hacen con otros materiales sobre la base de la forma y dimensiones y modulo de elasticidad.

En un objeto de vidrio, las fisuras que influyen sobre su resistencia mecánica se encuentran fundamentalmente en la superficie, dado que su formación se ve favorecida por el rápido aumento de la viscosidad de la capas superficiales al enfriarse el material luego del conformado, por el contacto con otros objetos, y por la presencia de defectos o núcleos de cristalización existentes en la superficie del vidrio, así como por las impurezas que se adhieren a la superficie aun caliente; de aquí que el estado de la superficie juega un papel tan importante en la resistencia mecánica del vidrio. Todo factor que tienda a evitar la formación de fisuras o su propagación aumentara la resistencia mecánica del vidrio. Por lo que se puede ver que un vidrio fabricado por el proceso float es mas resistente que uno realizado por el antiguo método Foucault, ya que las superficies en el método Foucault están en contacto intimo con los rodillos al momento de fabricar lo vidrios, mientras que en el proceso Float una cara del vidrio esta en contacto con el aire y la otra con una pileta de estaño que tiene una mínima interacción con el vidrio.

La teoría de la fractura frágil permite predecir el comportamiento mecánico de un objeto de vidrio; en la práctica, sin embargo, tales cálculos son difíciles, sino imposibles, debido al desconocimiento de la longitud de la fisura mas critica. según los cálculos de Griffith, en vidrios de resistencia mecánica normal la longitud de las microfisuras seria de 5 μm .

Ernsberger determine que un vidrio plano común, recién fabricado, tiene al rededor de 50000 microfisuras por cm^2 , en un vidrio pulido óptimamente es del orden de las 700, y en una fibra de vidrio prístina casi ninguna.

Si se supone que el radio de curvatura en el extreme de la fisura es del orden de las distancias intraatómicas a_0 ($5 \cdot 10^{-8} \text{cm}$), se deduce que la resistencia mecánica teórica es del orden de $1000 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$. Las investigaciones mas recientes han confirmado la validez de esta teoría, si bien quedan algunos puntos importantes por dilucidar, como por ejemplo el origen de las microfisuras mismas: si son imperfecciones intrínsecas del material o bien si se originan en el contacto de la superficie recién formada con otro objeto y con las impurezas de la atmósfera.

Fatiga del vidrio (Fractura diferida)

Los fenómenos denominados “fractura diferida”, “fatiga estática”, “corrosión bajo esfuerzo”, etc.; que presentan los vidrios, son conocidos desde hace mucho tiempo, pero solo en fecha relativamente reciente se logró darles una explicación. Es frecuente observar que cuando se somete un objeto de vidrio a un esfuerzo continuo, y no se produce la rotura inmediata, esta se produce al cabo de un cierto tiempo, que puede ser del orden de segundos, minutos, y aun de varias horas, y hasta días en casos extremos, dependiendo de las condiciones. Entre estas últimas cabe destacar, además de la composición química del vidrio y el estado de su superficie, la magnitud de la carga y la velocidad con la cual se aplica, la forma y dimensiones del objeto, y el grado de la humedad del ambiente, así como la temperatura.

Se ha comprobado que el fenómeno de la fractura diferida no se presenta en el vacío elevado o a muy bajas temperaturas, bajo nitrógeno líquido (menos de -196°C).

Gran número de experimentos han demostrado en forma concluyente que la causa del fenómeno es la presencia de agua (líquida o vapor de agua) en contacto con la superficie del vidrio. El agua reacciona con dicha superficie solubilizando los iones alcalinos (por un proceso de intercambio iónico) y, en una segunda etapa, destruyendo el retículo de silicato como consecuencia de la solución alcalina formada. Si el extremo de una fisura sometida a una tracción constante sufre esta acción química del agua, la fisura se ensancha, por rotura sucesiva de enlaces de Si-O en sus extremos, y puede alcanzar la longitud crítica, a partir de la cual se propagará en forma catastrófica. Se puede decir entonces que la “fatiga en el vidrio” es el resultado de la alteración de la forma y dimensiones de las microfisuras debida a reacciones químicas de la superficie del vidrio con el medio con el cual está en contacto. Dado que este mecanismo no es el mismo que explica la fatiga de los metales, se cree más prudente utilizar el término FRACTURA DIFERIDA para el caso de los vidrios, y NO el de “FATIGA”.

La influencia de la presencia de agua no se limita al crecimiento de la fisura hasta llegar a una longitud crítica para una condición determinada, sino que se manifiesta también en la velocidad de propagación de la fisura.

La relación entre la tensión de rotura σ y el tiempo t de aplicación de la carga, para el caso de la fractura diferida, es de tipo logarítmico, y está dada por la ecuación de Charles y Hillig:

$$\sigma^2 = A + B * \log t$$

siendo A y B constantes que dependen del medio, del de vidrio, y de las condiciones de la experiencia. Se aprecia que al aumentar el tiempo t disminuye σ ; por ejemplo, si las condiciones son tales que σ , disminuye aproximadamente un 20% al cabo del primer minuto de aplicación de la fuerza, disminuirá en un 30%, aproximadamente, al cabo de una hora, y serán necesarios unos diez días de aplicación continua de la carga para que se reduzca a la mitad del valor inicial. En otras palabras el mayor riesgo de rotura se tiene en los primeros minutos u horas.

Otros agentes químicos que actúan sobre el vidrio (ácidos, álcalis, etc.), influirán también de alguna manera sobre su resistencia mecánica, influencia que a su vez dependerá del estado de la superficie: a mayor abrasión y a mayor cantidad

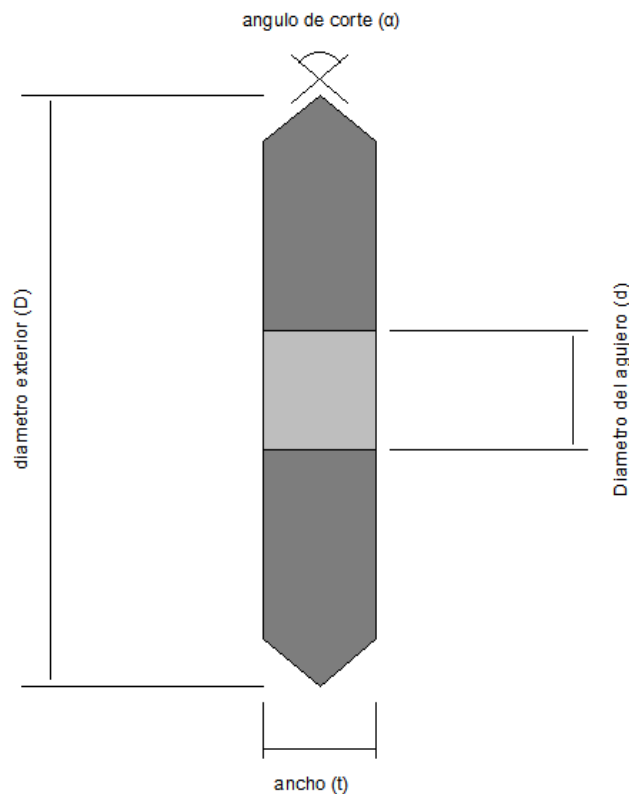
de fisuras corresponderá una mayor influencia de los factores químico y ambientales con los cuales el vidrio pueda interaccionar. El ejemplo mas común es la técnica usada para cortar un vidrio con un diamante; luego de hecha la marca se facilita el corte si se lo humedece.

Cuando se trata de predecir la vida útil de una pieza de vidrio que debe trabajar bajo esfuerzo constante, ya se externo (debido al montaje, o por formar parte algún mecanismo, o por presión interna en el caso de envases y recipientes), o interno (vidrio templado). Piezas críticas se diseñan habitualmente para soportar esfuerzos constantes que no superen el 20% del valor promedio de la resistencia mecánica del lote al cual pertenecen. En otras palabras, en estos casos se toma un coeficiente de seguridad igual a cinco.

Surcos de las diferentes rulinas.

La rulina es una ruedita de acero o metal muy duro a veces recubierta con alguna material especial como por ejemplo polvo de diamante que se utiliza para generar una fisura controlada en las placas de vidrio para posteriormente con su propagación generar el corte de dichas placas.

La principal característica de una rulina es su ángulo de corte, el cual se puede ver en el siguiente grafico junto con sus otras características dimensionales:

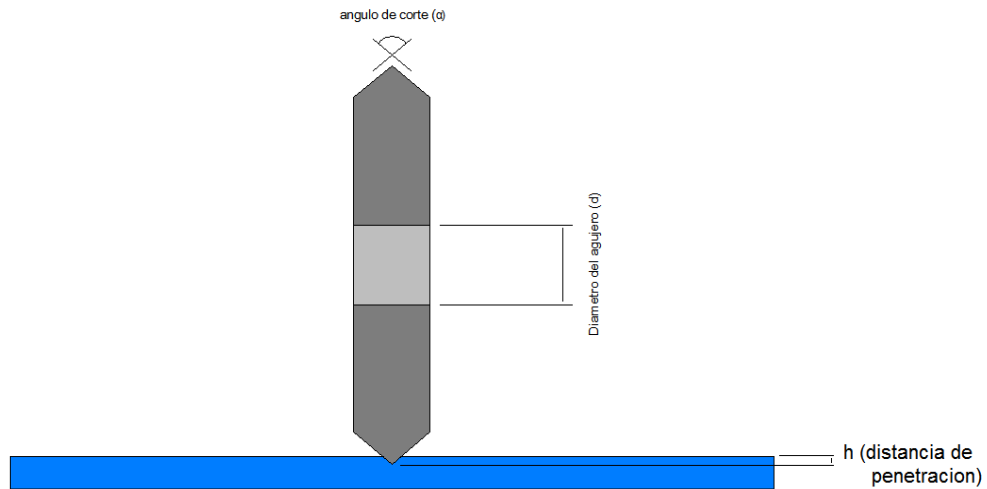


Corte longitudinal de la rulina con sus dimensiones características

La rulina al ir rodando sobre la placa de vidrio genera la fisura al penetrar dentro de la placa una distancia determinada, esta distancia de penetración tiene como máximo una penetración "h" de 0.02 [mm], y es la misma para todos los ángulos de corte y diámetros exteriores de las rulinas. Al superar la distancia máxima de penetración se produce la rotura no controlada de la placa.

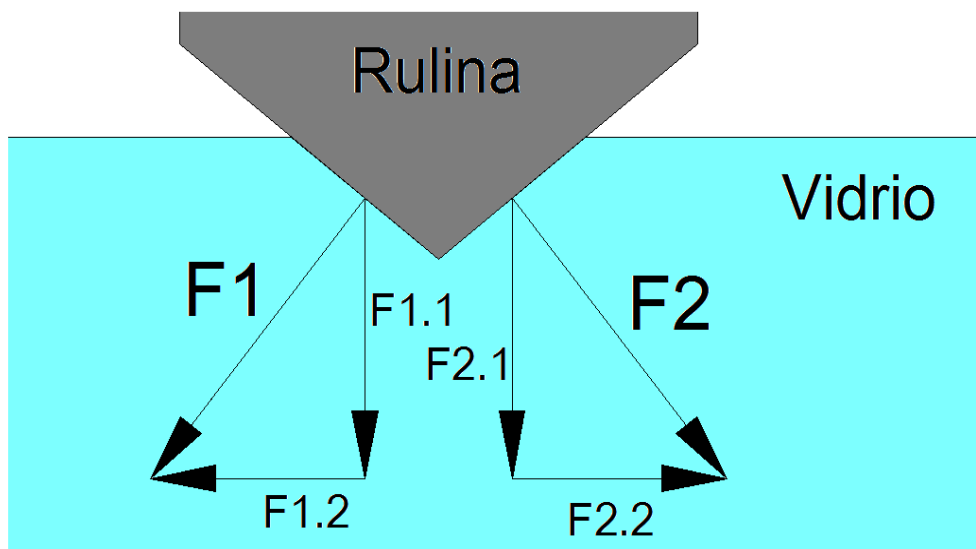
Los mejores resultados al cortar vidrio plano se consiguen cuanto mas cerca se esta de la distancia máxima de penetración pero nunca debe ser superada. El ángulo de corte depende principalmente del espesor de la placa de vidrio que se quiere cortar, siendo mayor el ángulo al aumentar el espesor del vidrio.

Seguidamente se muestra una grafica donde se esquematiza la penetración de la rulina en la placa de vidrio y los esfuerzos que dicha penetración genera:



Esquema de la penetración de la rulina en la placa de vidrio

En la siguiente figura se esquematiza un detalle de la figura anterior en la zona donde la rulina penetra a la placa de vidrio:



Detalle de la penetración de la rulina

La fuerza aplicada sobre el cortavidrios, es la suma de las fuerzas $F1.1$ y $F2.1$, las cuales regulan la profundidad de la fisura dentro de la placa de vidrio que es generada por las fuerzas $F1.2$ y $F2.2$, ya que las fuerzas $F1.1$ y $F2.1$ generan tensiones principales de compresión y las fuerzas $F1.2$ y $F2.2$ tensiones principales de tracción en el punto donde comienza a producirse la fisura.

Las fuerzas $F1.2$ y $F2.2$ tiene el mismo modulo al comenzar a generar la fisura para cualquier ángulo α de corte de las rueda, con lo que a mayor ángulo de corte mayor tendrán que ser las fuerzas $F1.1$ y $F2.1$ para que se mantenga el modulo de las fuerzas $F1.2$ y $F2.2$.

Al incrementar el espesor de las placas de vidrio es necesario que la fisura se produzca a mayor profundidad, por lo tanto al querer cortar vidrios de gran espesor se requerirán grandes ángulos de corte de las rulinas y ejercer una mayor fuerza en el cortavidrios, mientras que para vidrios delgados los ángulos de corte serán mas agudos y la fuerza ejercida sobre el cortavidrios será menor.

Los anglos α de corte mas comunes son los de 120°, 135°, 145°, 155° y 158° y recientemente se esta haciendo muy popular el de 138°, pero existen en el mercado en forma estándar de los 120° a los 165°. La norma que regula las fuerzas de marcado y los ángulos de corte es la DIN 4777. La siguiente tabla indica los ángulos de corte y los espesores de las placas de vidrio para los cuales son utilizados:

Angulo de corte α	Espesor del vidrio
120°	2 – 3 [mm]
127°	2 – 4 [mm]
135°	2 – 6 [mm]
140°	4 – 8 [mm]
145°	6 – 10 [mm]
150°	6 – 12 [mm]
155°	6 – 15 [mm]
158°	10 – 19 [mm]
160°	19 – 25 [mm]
165°	19 – 25 [mm]

Los diámetros exteriores D de las rulinas van de los 3 a los 12.5 [mm], los mas utilizados para el corte manual so los de 3.5, 4.2 y 4.6 [mm], el diámetro exterior de la rulina es indiferente con el espesor de la placa de vidrio que se pretenda cortar, pero al incrementar el diámetro para un mismo ángulo de corte y un mismo espesor de vidrio la fuerza empleada en el marcado tendrá que ser mas elevada.

La elección del diámetro exterior de la rulina se determina generalmente en el corte automatizado, siendo que en el caso del corte manual el mecánico (vidriero) la elije según su gusto. En el caso del corte automatizado la elección del diámetro exterior de la rulina se determina a partir de la forma del corte, ya que a menor diámetro se pueden lograr menores radios de curvatura; la velocidad con la que se quiere cortar, ya que es preferible en u corte recto la mayor velocidad y la fuerza que es capaz de realizar el cabezal de la maquina de marcado de corte, teniendo en cuenta estos parámetros, se elije el diámetro exterior de la rulina.

Luego de explicar las dimensiones de las rulinas se procede a mostrar los efectos de las mismas al hacerlas rodar sobre placas de vidrio, seguidamente se mostrara una fotografía en la cual se estaban preparando muestras para ser analizadas en el microscopio electrónico:



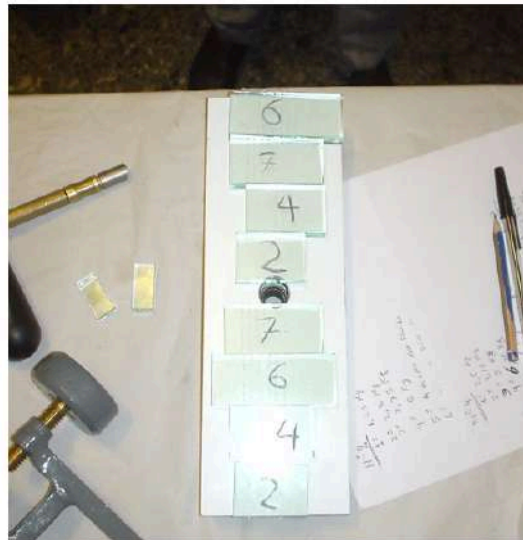
Preparación de las muestras para el microscopio electrónico

En la fotografía de arriba se puede observar al cortavidrios dentro del carrito de transporte, con las pesas para determinar la fuerza de marcado, el cortavidrios es un cortavidrios lubricado al cual se le pueden cambiar las ruinas, de esta manera es posible lograr una gran configuración de combinaciones de diferentes rulinas y pesos de marcado. En la siguiente fotografía se puede observar al cortavidrios con las diferentes rulinas:



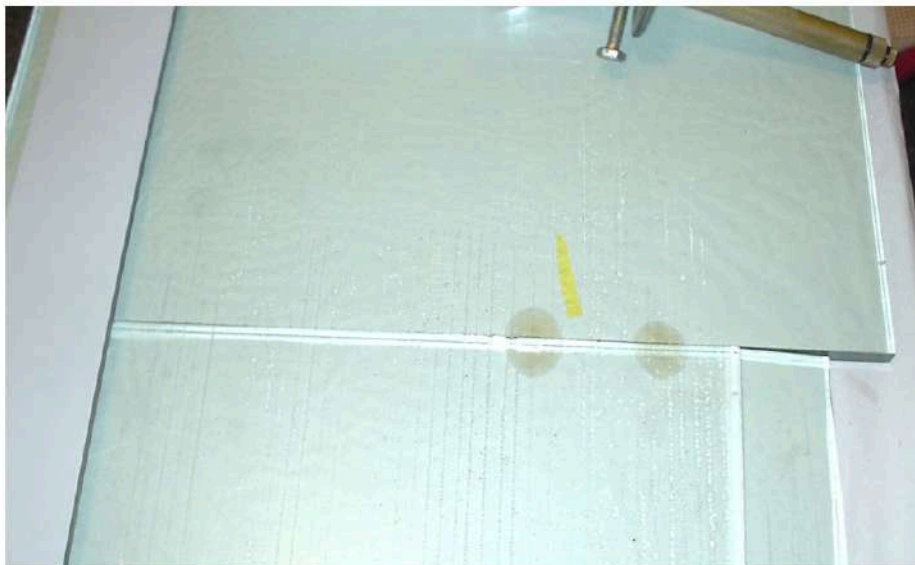
Cortavidrios y sus diferentes rulinas con sus soportes

De esta forma intercambiando las rulinas y los pesos en el marcado de lo vidrios se fueron realizando las muestras, en la siguiente fotografía se muestran las muestras terminadas para el microscopio electrónico:



Muestras para analizar en el microscopio electronico

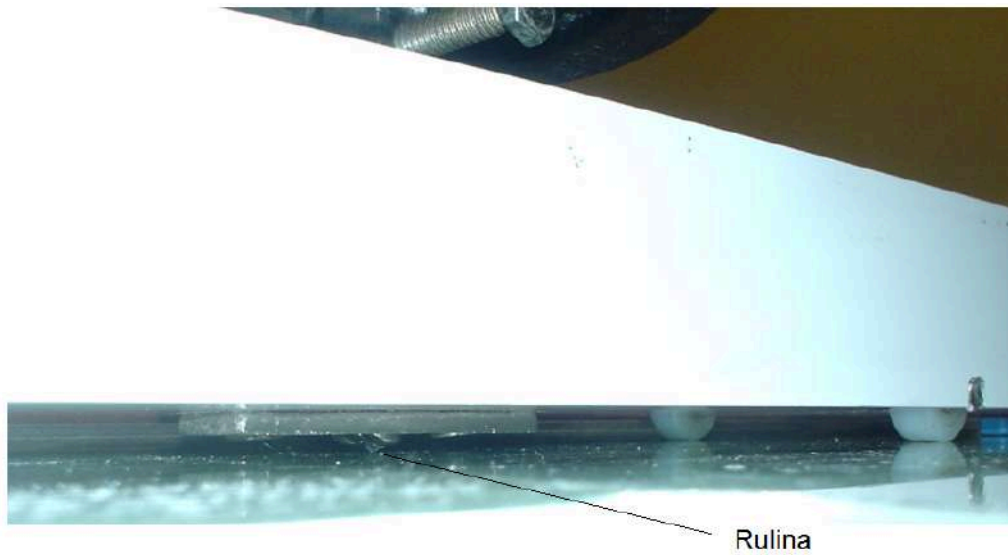
En la siguiente fotografía se muestran los surcos que dejaron las rulinas en la placa de vidrio antes de cortarla para obtener las muestras de la fotografía anterior:



Surcos de las rulinas en la placa de vidrio

En la fotografía de arriba se puede observar dos placas de vidrio, ya que una placa se la utilizo como auxiliar para soportar al carrito y comenzar a trazar el surco.

En la fotografía que sigue se puede apreciar a la rulina contra la placa de vidrio:

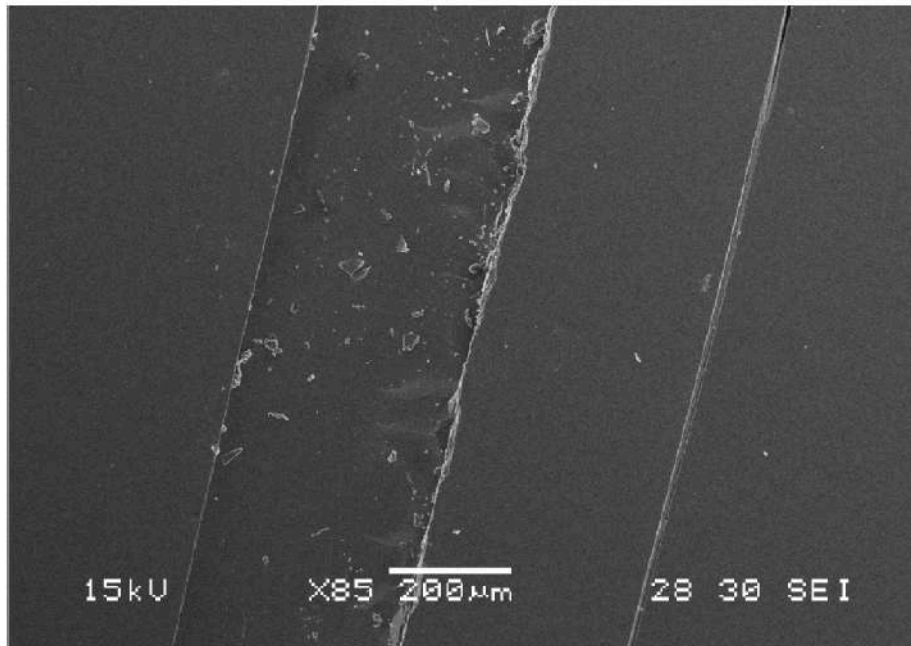


Rulina contra la placa de vidrio

De este modo se fueron preparando las distintas muestras, las cuales fueron numeradas con los diferentes números de las rulinas, y se anotaron las posiciones del marcado con cada peso diferente.

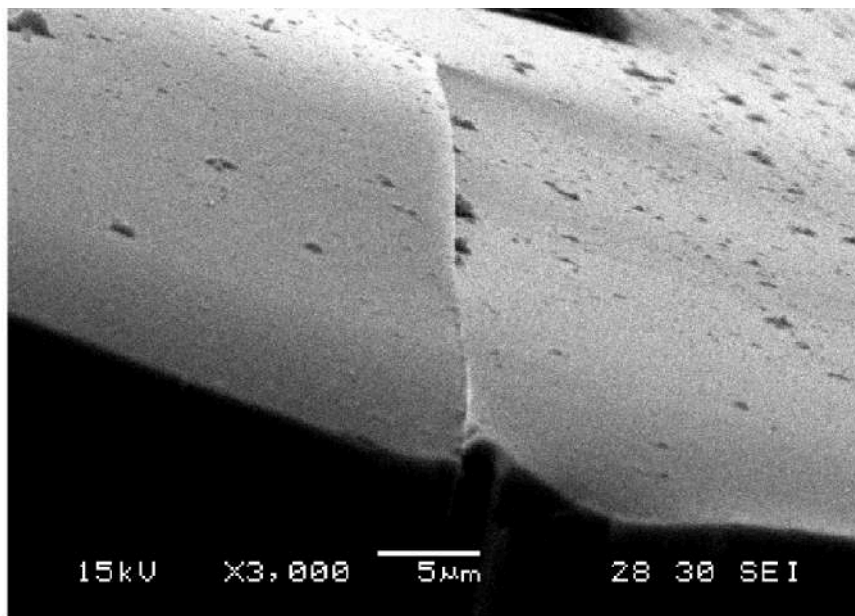
Luego las muestras fueron llevadas hasta el microscopio electrónico de la U.N.M.D.P. que se encuentra en el complejo universitario, allí se le realizó un recubrimiento con una micropelícula de oro para poder utilizar el microscopio, por cuestiones de costo solo se analizó una de las muestras, para ello se escogió la realizada con la rulina número 6 de 155° de ángulo de corte, ya que es la más interesante desde el punto de vista de este trabajo final.

La siguiente fotografía muestra el prolijo surco de marcado que dejó la rulina número 6 con 100 [N] de fuerza de marcado:



Microscopia del trazado con rulina 6 y 100[N] de fuerza

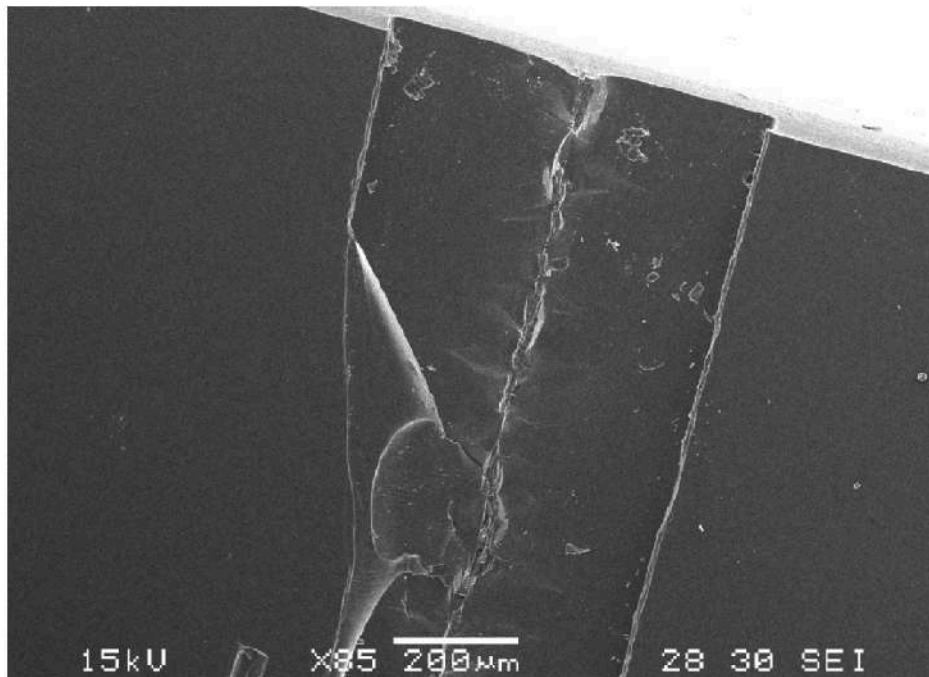
Se puede apreciar en el centro del callejón del surco la fisura y un callejón muy prolijo salvo alguna suciedad ajena al corte en la parte izquierda del callejón. En la próxima fotografía se observa el borde de la placa de vidrio del mismo surco de la fotografía anterior:



Borde del vidrio marcado con rulina 6 y 100 [N] de fuerza

En la fotografía de arriba se puede apreciar como se introduce prolijamente la fisura dentro de la placa, debido a que la fuerza de marcado es la adecuada para la rulina.

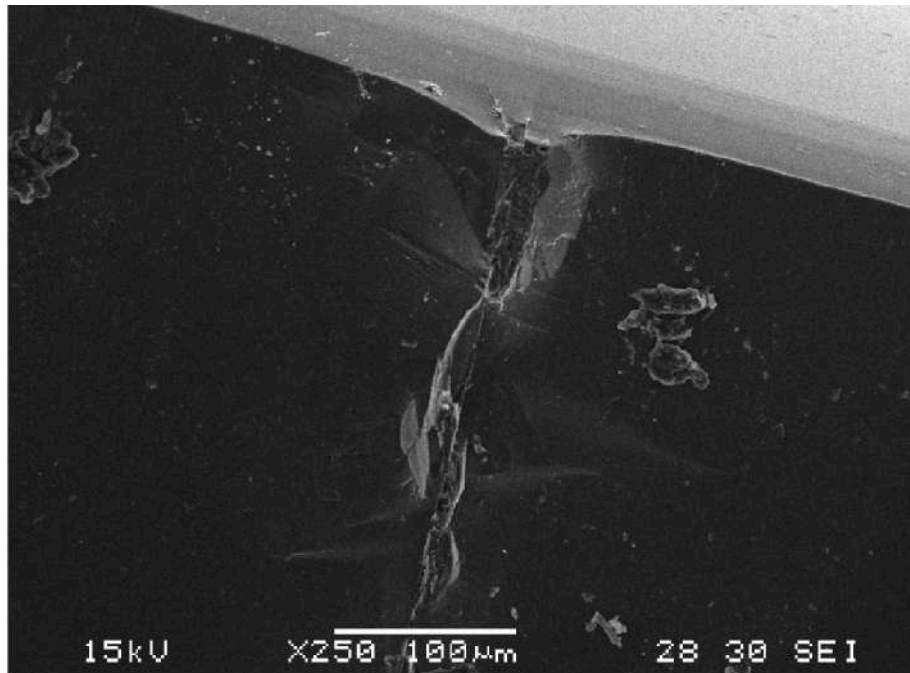
Seguidamente se muestra una fotografía de una fuerza excesiva de marcado con rulina número 6 de 155° de ángulo de corte:



Microscopía del trazado con rulina 6 y 150 [N] de fuerza

En la fotografía anterior se puede apreciar diferencia que se produce al marcar al vidrio con una fuerza excesiva, donde no es posible lograr ni siquiera un marcado homogéneo. También se puede observar el efecto de callejón, que en este caso está muy claro, era de esperarse una entalla continua triangular pero en su lugar se produce este fenómeno, no solo en el caso de realizar el marcado de la polaca de vidrio con un peso excesivo se refleja este comportamiento sino que se ha apreciado en el caso del marcado con el peso óptimo de 100 [N] pero en ese caso no fue tan pronunciado.

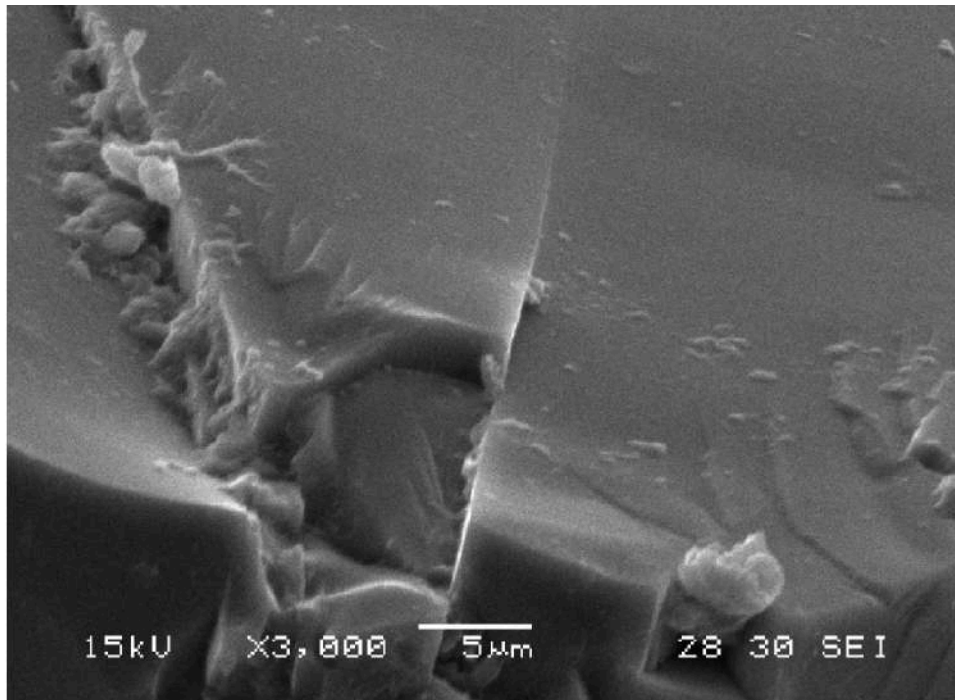
Seguidamente se muestra una fotografía del borde del vidrio en el mismo marcado de la fotografía anterior:



Borde del vidrio marcado con rulina 6 y 150 [N] de fuerza

En la parte superior de la anterior fotografía se pueden apreciar tres fisuras, una central y una lateral izquierda (desde la óptica del lector) muy claras y una lateral derecha (desde la óptica del lector) no tan clara debido a que hay carencia de masa de vidrio justo de ese lado, pero observando con cuidado es posible distinguirla.

Seguidamente se muestra una fotografía que esta sacada en el mismo lugar que la anterior con un aumento mayor en la zona de las fisuras:



Borde rulina 6 con 150 [N] de fuerza con mayor aumento

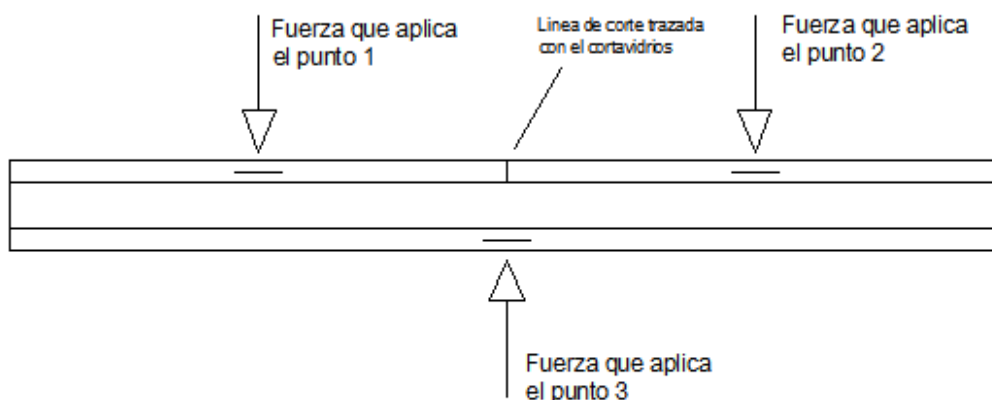
En la fotografía de arriba se puede ver que la fisura central tiene una longitud similar a la del caso de 100 [N], y además la fisura de costado izquierdo (desde el punto de vista del lector) tiene una longitud superior a la central, lo que en parte podría explicar el hecho de porque las placas de vidrio necesitan una fuerza de apertura similar en ambos casos y porque el corte puede desviarse en caso de exceso de fuerza de marcado del lugar deseado. Así mismo el acabado del borde al terminar de realizar la apertura del corte es mucho más defectuoso en el caso de marcar con exceso de peso.

Teoría de los tres puntos, determinación de su ubicación

De las diferentes formas de realizar el corte de vidrio, la que permite la mayor creatividad y practicidad para el vidriero es la del marcado con corta vidrios y posterior apertura del corte con un método denominado “de los tres puntos”, este método de los tres puntos es un método mediante el cual se producen tensiones controladas en la placa del vidrio.

La forma de producir las tensiones es sencilla, al realizar presión en tres puntos específicos en la placa de vidrio, previamente marcada con el corta vidrios, estas tensiones se magnifican en los lugares de concentración de tensiones que genero el corta vidrios al marcar la placa de vidrio y hacen que las fisuras se propaguen hasta producir el corte del vidrio. Este corte se puede ir realizando por tramos con el método de los tres puntos y de esta forma se pueden realizar cortes con diversas formas, permitiendo una gran creatividad en este proceso.

Seguidamente se muestra un esquema de la disposición de los tres puntos en la placa de vidrio con respecto al marcado que se le realiza con el corta vidrios:

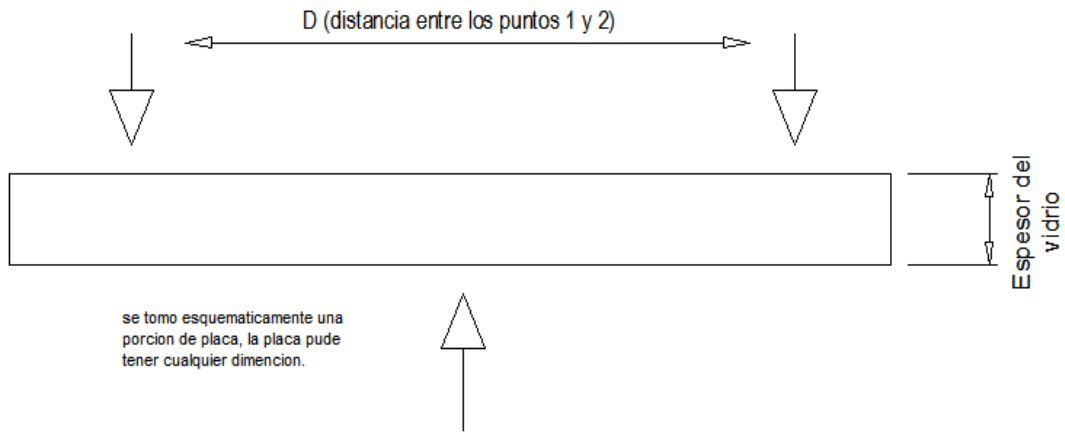


Esquema de los tres puntos en la placa de vidrio.

Los tres puntos de presión se encuentran ubicados en un plano que es atravesado en forma normal por la línea de corte trazada por el corta vidrios, así mismo dos puntos de presión (punto 1 y punto 2), están en la cara de la placa de vidrio donde se efectuó el marcado con el corta vidrios separados en forma equidistante de la línea de corte y el punto tres se encuentra en la cara posterior a la marcada en la placa, justo debajo de la línea de corte.

Mediante algún dispositivo se generan las fuerzas en los puntos de presión (mas adelante se muestran varios de estos dispositivos), haciendo un simple balance de momentos y fuerzas, es posible determinar que las fuerzas en los puntos 1 y 2 tienen igual modulo, mientras que el modulo de la fuerza aplicada en el punto 3 es el doble que el modulo de la fuerza aplicada en el punto 1 o el punto 2.

Seguidamente se esquematiza la separación de los puntos de presión 1 y 2:

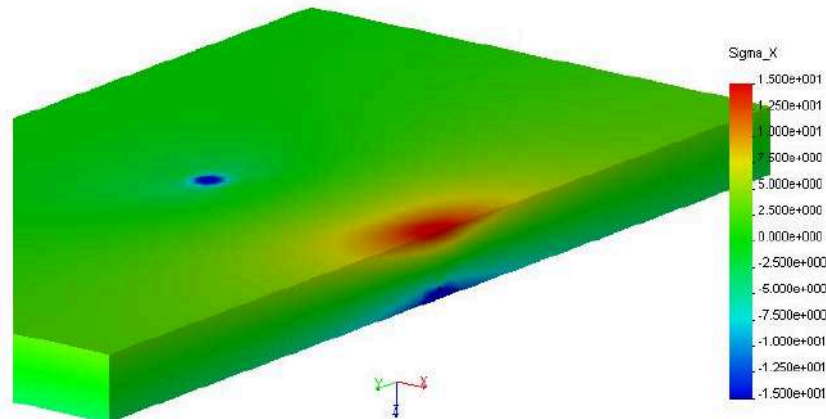


Esquema de la distancia de separacion de los puntos de presion.

La distancia D , que es la separación entre los puntos 1 y 2, tiene una relación de compromiso, ya que a mayor distancia, los momentos aplicados a la placa serán mayores, pero esto también ocasiona que se genere una distribución de tensiones mas periférica, las cuales se iran distribuyendo por toda la placa de vidrio y no solo se lograra aplicar un estado de tensiones altas en la línea entre el punto 1 y 2, si no que en mayor extensión superficial. Además al estar muy alejados los puntos no permitiría que se puedan lograr cortes con pequeñas curvatura, lo que limitaría las formas de los cortes.

Seguidamente se muestra un dibujo realizado con el programa COSMO de simulación de mecánica del solidó para examinar como se distribuyen las tensiones en la placa de vidrio al ejercer fuerza en los tres puntos de presión:

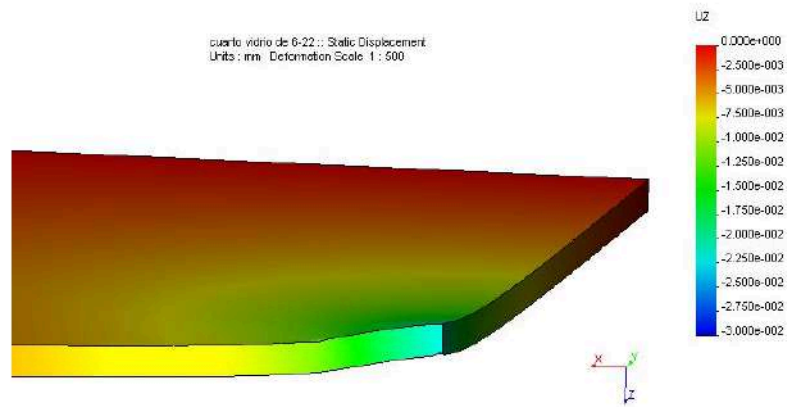
vidrio de 6-22:: Static Modal Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1 : 0



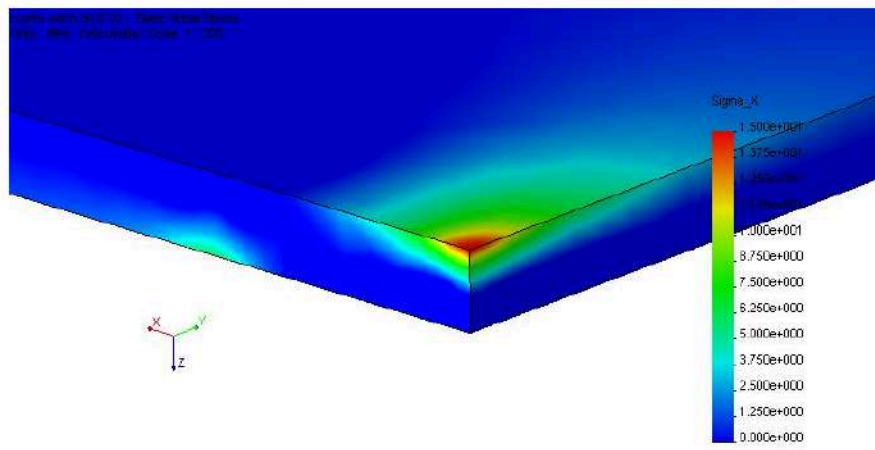
Esquema de distribución de tensiones en vidrio de 6 [mm] 1/2 placa de vidrio

En la figura de arriba se muestra media placa de vidrio, en la parte de arriba de la placa se observa un punto azul que son tensiones de compresión generadas por la fuerza que aporta el punto de presión 1, en la parte inferior de la placa se puede observar una zona azul que son tensiones de compresión generadas por el punto de presión 3, la zona roja indica tensiones de tracción. La figura esta conformada por media placa ya que el resto de la placa es simétrica y de esta manera se puede observar el estado tensional dentro del espesor de la placa de vidrio y además el trabajo de simulación se minimiza de esta manera. Las dimensiones de la placa simulada eran de 100 [mm] por 100 [mm], la separación D de 50 [mm] y la carga total en el punto de presión 3 de 300 [N] (que es la carga normalmente se utiliza para hacer propagar la fisura generada con el cortavidrios).

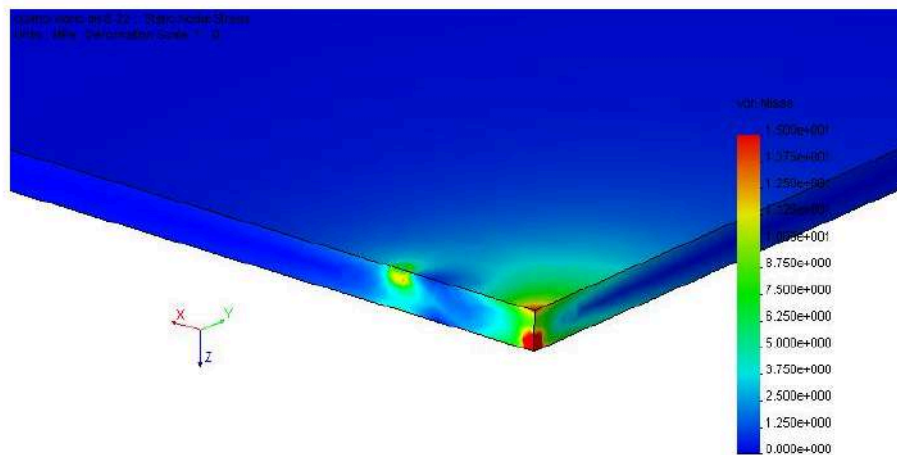
Seguidamente se muestra una secuencia de figuras de la simulación de una placa de vidrio de 6 [mm] de espesor de 600 [mm] por 600 [mm], con una separación D de 50 [mm] y una carga total de 300 [N] en el punto de presión 3. En la primera figura se muestra el campo de deformaciones, seguidamente se muestra una figura con el campo de tensiones sigma X y luego el campo de tensiones de Von Mises:



Deformaciones de la placa de vidrio de 6 [mm] de espesor
1/4 de placa



Tensiones en el eje X en la placa de vidrio de 6 [mm]
1/4 de placa



Tensiones de Von Misses en la placa de vidrio de 6 [mm] 1/4 de placa

De la secuencia de figuras de arriba se puede denotar que la distribución de tensiones es semejante a la del caso de la placa de 100 [mm] por 100 [mm], con lo cual se puede deducir que el tamaño de la placa no tiene interferencia al superar un tamaño determinado (cercano al de 100 [mm] por 100 [mm]). También es posible observar de las distintas figuras como se van comportando las tensiones y en se ratifica el hecho de que la distancia de separación D entre las puntos de presión 1 y 2 es una relación de compromiso. Por otra parte se puede observar que tanto la tensión máxima en el grafico de σ_x como en el caso de la tensión de Von Misses dieron en ambos casos 15 [MPa]. Como observación del grafico de Von Misses se destaca que en la parte inferior de la placa se indica que se llega a la tensión máxima pero esta es de compresión mientras que en la parte superior de la placa las tensiones son de tracción, ya que Von Misses no distingue entre compresión y tracción, con lo que se debe tener cuidado ya que en general las tensiones de tracción son las que causan la rotura de los objetos.

Existen en el mercado varias herramientas diferentes que utilizan esta disposición de los tres puntos para realizar la apertura de los cortes en las placas de vidrio, seguidamente se muestran algunas de las herramientas que son suministradas por la empresa Alemana Bohle.AG, que es líder mundial en la creación y producción de herramientas para cortar vidrio:



**Tenaza abrecortes
SILBERSCHNITT**

Totalmente metálica · para espesores de 6 a 15 mm · con tornillo ajustable al espesor del vidrio · transmisión óptima de la fuerza · ideal para abrir cortes rectos o esquinas

No.Art.
BO 704.0



Abrecortes SILBERSCHNITT

Para cortes complicados · ideal para la realización de cortes de esquinas y cajas, así como otras muchas formas · adecuado para espesores de 6 a 10 mm · anillo de presión giratorio para ajustarse óptimamente a cualquier corte · alcance máx. 100 mm

No.Art.
BO 706.0

Estas herramientas permiten la aplicación de la fuerzas en los tres puntos en forma muy precisa, con lo que es posible realizar una innumerable cantidad de cortes con la practica suficiente, gracias a la precisión que poseen, el acabado de los cortes es muy prolijo lo que repercute en un ahorro de maquinado en procesos posteriores, como el pulido. La separación D entre los puntos 1 y 2 de estas herramientas es de 49 mm, lo que da una muy buena base para comenzar a analizar y ensayar la distancia optima a la que deben ser colocados estos puntos de presión.

En el caso de la tenaza abrecortes SILBERSCHNITT (bo.704.0), se puede observar en la parte inferior del cabezal un tornillo con su parte superior de plástico

duro redondeada, el tornillo es utilizado para ajustar a la herramienta para cada tipo de espesor de vidrio de 6 a 15 mm de espesor, en la parte superior del cabezal de la herramienta se pueden observar cuatro puntos de presión, dos externos y dos interiores, los puntos externos tienen una separación de 49 mm entre centros de los puntos de presión, y son los que normalmente se utilizan para trabajar, mientras que los interiores tienen una separación de 27 mm y se los utiliza para cortar tiras angostas de vidrio de cantidades semejantes de vidrio a ambos lados del corte (condición de masas que será tratadas mas adelante en otra sección del trabajo), estos puntos interiores están 1,5 mm mas elevados que los exteriores, de modo tal que no tengan interferencia en el trabajo cuando se están utilizando los exteriores.

En el caso del abrecortes SILBERSCHNITT (bo.706.0), este esta invertido en la fotografía, la parte inferior de su cabezal esta conformada por un tornillo de bronce con la punta torneada en forma piramidal para poder aplicar presión en un punto determinado al girar dicho tornillo. La parte superior del cabezal esta formada por un anillo de aluminio que tiene acoplados los dos puntos de presión 1 y 2, este anillo a su vez esta empotrado en un eje de bronce que le permite girar libremente para poder ajustar a los puntos 1 y 2 de la herramienta a la posición deseada para realizar la apertura del corte. Además esta herramienta puede penetrar unos 10 cm dentro de la placa de vidrio.

Para la determinación de la ubicación mas adecuada de los puntos de presión se tomar como partida la distancia dada por las herramientas de Bohle de 49 mm, variando la distancia en principio alrededor de esta, para ello se han construido herramientas que permiten la variación de los puntos 1 y 2, tales herramientas se muestran en las siguientes imágenes:



ABRESCHNITT 1

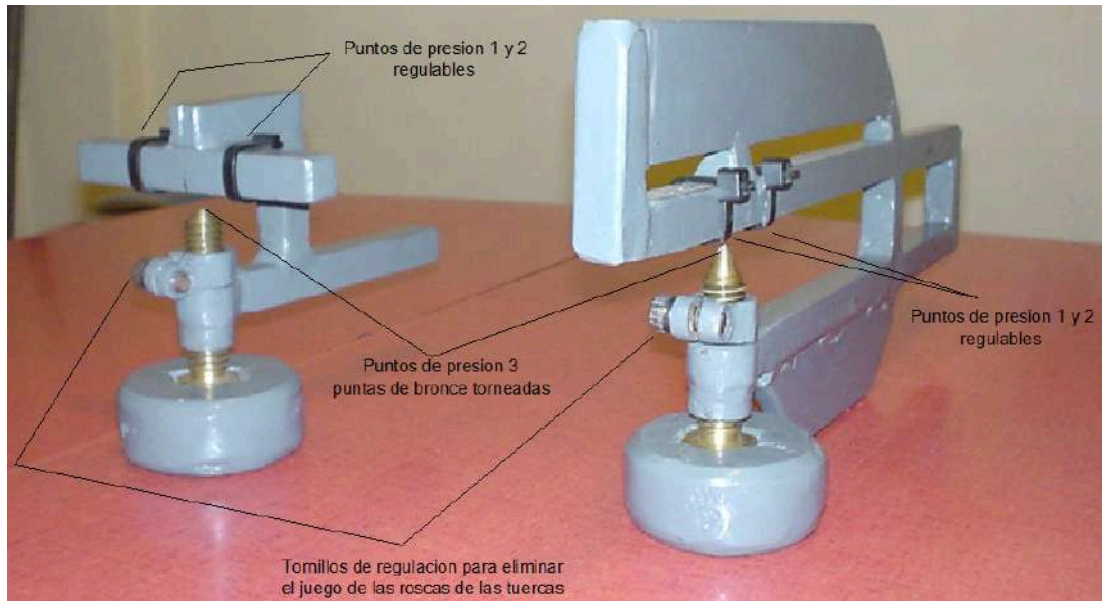


ABRESCHNITT 2

En la herramienta Abreschnitt 1 y la herramienta Abreschnitt 2 sus respectivos puntos de presión 1 y 2 son móviles de plástico, y sus respectivos puntos 3 de presión son las puntas torneadas en forma piramidal en tornillos de bronce, estos tornillos fueron escogidos de bronce debido a que el bronce tiene un efecto menos dañino en sobre el vidrio al presionarlo y debido a que el bronce con el hierro tiene un coeficiente de roce bajo (al final de este capítulo se analiza el rendimiento de los tornillos del Abreschnitt 1 y del Abreschnitt 2), se logra tener un mejor control de la apertura del corte.

Luego variando la distancia D de los puntos de presión 1 y 2 en las herramientas Abreschnitt 1 y Abreschnitt 2, se realizaron distintas aperturas de cortes hechos con diferentes rulinas, diferentes fuerzas en el marcado, diferentes formas geométricas de los cortes, diferentes espesores de vidrio (6 mm y 10 mm) y diferentes mecánicos (vidrieros); con todas estas variantes se pudo determinar que para una separación D de 40 mm, se comenzó a tener un control satisfactorio de la apertura, a 50 mm de separación D se consiguió un control excelente tanto para aperturas rectas como curvas con radios reducidos (inferiores a los 6 cm), para una distancia de separación D de 60 mm se consiguió un control de apertura del corte muy parecido al de 50 mm para la apertura del corte recto pero el control de los cortes curvos fue peor y no tenía un buen acabado cosa que en el caso de la apertura con 50 mm de separación D se lograba un acabado óptimo en cortes curvos. Finalmente se siguió ensayando cerca de los 50 mm de separación D concluyendo que esta es la más adecuada para trabajar en los vidrios de 6 mm a 10 mm de espesor, no pudiendo realizar ensayos más allá de los 10 mm de espesor por imposibilidad económica, pero sin embargo es posible decir que este resultado puede ser considerado para vidrios de hasta 15 mm de espesor, ya que en el pasado se ha trabajado con vidrios de este grosor y aun superiores.

En esta determinación no se han utilizado espesores inferiores a los 6 mm, ya que estos no arrojan conclusiones interesantes y dan resultados muy parecidos para una amplia variada y cantidad de valores de separación D .



Rendimiento de los tornillos del Abreschnitt 1 y del Abreschnitt 2:

Los tornillos es de una sola entrada y en una pulgada entran 12 filetes por lo tanto su paso será:

$$h = 25.4/12 = 2.12 \text{ [mm]}$$

Los tornillos son de ½ pulgada paso Whitworth, con lo que su diámetro medio será:

$$D_m = D_e - 0.6403 \cdot h = 12.5 - 0.6403 \cdot 2.12 = 11.14 \text{ [mm]}$$

De: diámetro exterior medido sobre el filete.

El diámetro en la punta de la pirámide de los tornillos es de 1,5 [mm] y están además redondeados, con lo cual se despreja el rendimiento de lo que vendría a ser el collar, ya que con un radio tan reducido el momento que puede introducir la fuerza de roce entre el vidrio y la punta del tornillo no es significativo.

Luego el ángulo de inclinación de la hélice α será:

$$\alpha = \arctg(h/\pi D_m) = \arctg(2.12/12.5\pi) = 3.47^\circ$$

Por otro lado el ángulo de inclinación β para paso Whitworth será:

$$\beta = 55^\circ/2 = 27.5^\circ$$

Entonces el ángulo de contacto entre la normal a la cara del filete y la vertical paralela al eje del tornillo θ será:

$$\theta = \arctg \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta = \arctg \operatorname{tg}^2 (27.5^\circ) + \operatorname{tg}^2 (3.47^\circ) = 27.66^\circ$$

Con lo cual mediante la siguiente fórmula se puede expresar el rendimiento del tornillo:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\operatorname{sen} \alpha (\cos \theta - \mu \operatorname{sen} \alpha)}}$$

Donde η es el rendimiento del tornillo y μ es el coeficiente de roce entre el tornillo y la tuerca

El coeficiente de roce entre bronce y acero es de 0.2 sin lubricación, la combinación de roscas y tuercas lubricados con aceites es alrededor de 0.15 ± 0.05 , con lo cual se considera un coeficiente de fricción para el tornillo de bronce con rosca de acero el grasa de 0.15:

Posteriormente el rendimiento del tornillo será igual a:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{0.15}{0.060526(0.885718 - 0.15 * 0.060526)}} = 0.2613$$

Con este valor del rendimiento del tornillo se puede estimar la relación entre el momento entregado a la herramienta con la mano y la fuerza que se aplican al punto de presión 3 mediante la siguiente ecuación:

$$F = Mm * \left(\frac{2\pi\eta}{h} \right) = Mm * \left(\frac{1.6418}{h} \right)$$

Donde hay que recordar que h esta en [mm]

Determinación de la fuerza necesaria para producir el comienzo y propagación de la fisura en la placa de vidrio.

Para la determinación de la fuerza necesaria para la apertura del corte de la placa de vidrio, con el método de los tres puntos, se construyó un sistema de ensayo denominado Abreschnittmesser. El cual es mostrado en la siguiente fotografía:

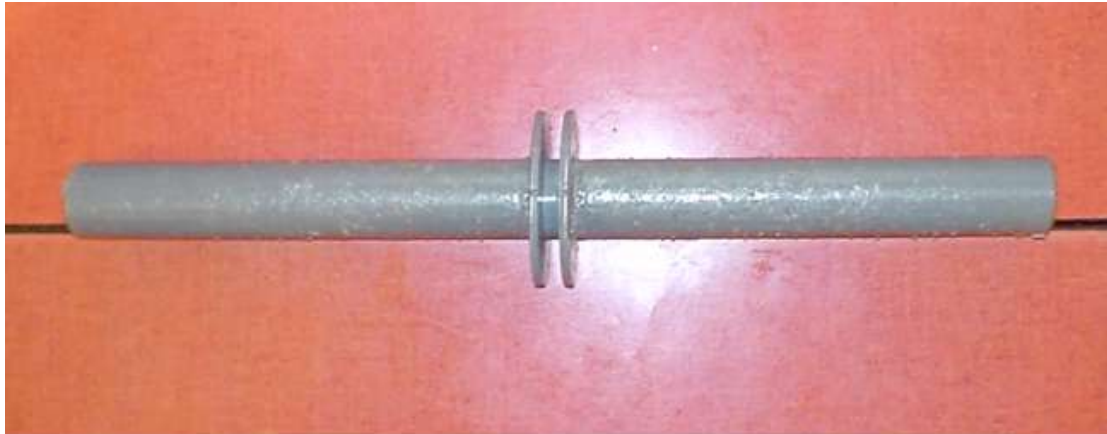


Abreschnittmesser

Este dispositivo tiene los puntos de presión 1 y 2 fijos en el momento de realizar el trabajo, pero los mismos se pueden regular en altura y separación "D", antes de comenzar a realizar el ensayo. El punto de presión 3 está constituido por un perno que puede deslizarse libremente dentro de un buje, dicho perno en la parte superior está roscado y es donde se coloca una impronta de distintos materiales, la cual es el verdadero punto de presión 3, la fuerza para realizar la apertura del corte

se obtiene de la palanca que se puede observar en la anterior fotografía la cual empuja al perno que ejerce la fuerza del punto de presión 3.

Colgados en la palanca del Abreschnittmesser se encuentran dos elementos de soportes de pesas, el soporte de pesas 1 y el soporte de pesas dos, que se muestran en la siguientes fotografías:



Soporte de pesas 1



Soporte de pesas 2

En estos dos elementos de soporte se cuelgan distintos pesos, además el soporte de pesas 1 puede deslizarse libremente sobre la palanca, mientras que el soporte de pesas 2 tiene una posición fija sobre un extremo de la palanca, de este modo es posible lograr una variación continua de fuerzas en el punto de presión 3 del Abreschnittmesser, en la siguiente fotografía se muestra el conjunto de pesas utilizadas en estos dos soportes con su carrito de transporte:



Conjunto de pesas y carro de transporte

Este conjunto de pesas consta de 4 pesas de 5 [kg] y de 8 pesas de 1.25 [kg], que en total suman 30 [kg]; en los casos del soporte de pesas 1 y del soporte de pesas 2 es posible colocar todo el conjunto de pesas en cualquiera de los dos, con lo que la versatilidad de disposiciones es muy amplia.

Seguidamente se muestra como actúa la palanca del Abreschnittmesser sobre el perno del punto de presión 3:



Esquema de actuación de la palanca del Abreschnittmesser

Más adelante en esta parte del trabajo se calculará la fuerza que hay en el punto de presión 3 mediante un balance de momentos considerando una variación muy pequeña del ángulo que realiza la palanca al girar y que la palanca se encuentra prácticamente perpendicular al eje del perno del punto de presión 3, con lo que el punto de contacto entre la palanca y el perno puede considerarse el mismo en todo momento.

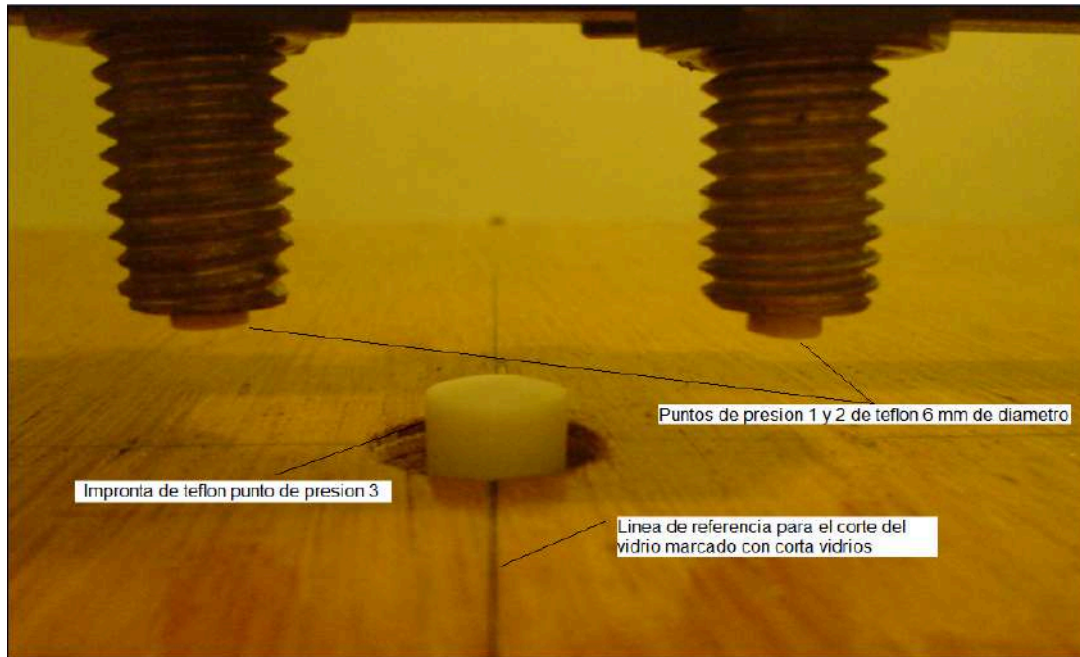
A continuación se muestra una fotografía de dos pernos con dos improntas distintas, los cuales son intercambiables, pudiendo introducir uno o el otro dentro del buje del punto de presión 3. En la fotografía se puede observar que una de las improntas es de bronce, mientras que la otra es de teflón y además que la parte inferior de los pernos están prolijamente abombadas para que halla un solo punto de contacto entre la palanca y el perno que se encuentre sobre el eje del perno:



Pernos con improntas de bronce y teflón respectivamente la tuerca sirve para regular la altura y de base para soportar los esfuerzos.

Luego se muestra una fotografía donde se pueden observar los puntos de presión 1, 2 y 3 del Abreschnittmesser, donde se ve una impronta de teflón en el punto de presión 3, la cual puede ser intercambiada por una de bronce como la que

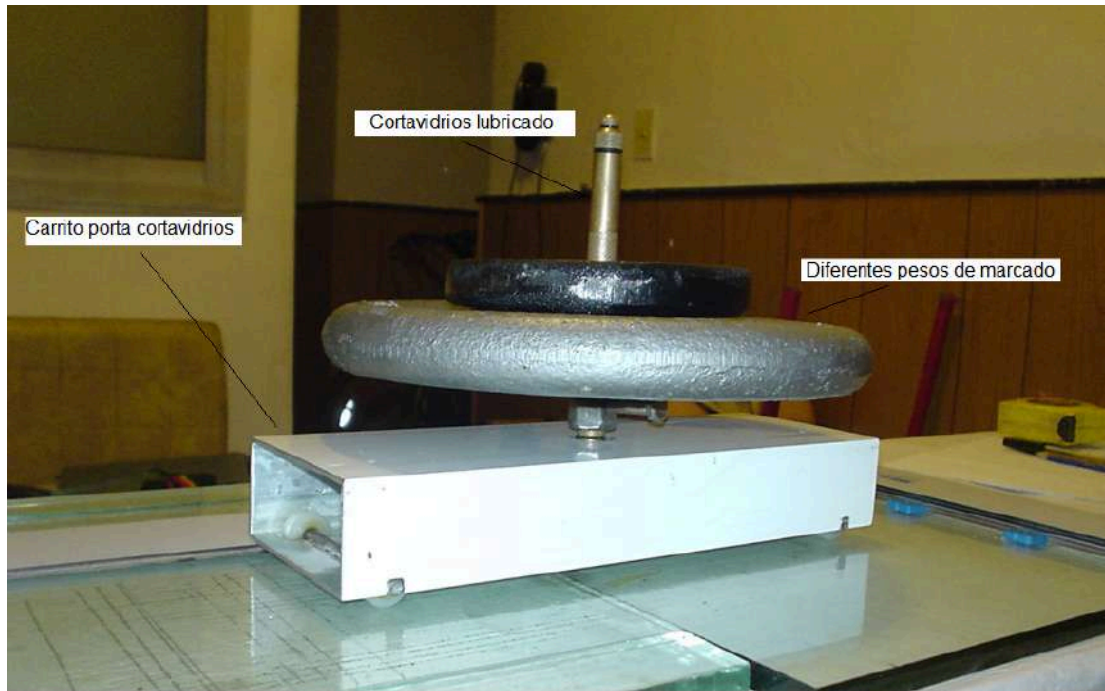
se encuentra en la fotografía anterior. Los puntos de presión 1 y 2 están constituidos por cilindros de teflón de 6 mm de diámetro, los cuales están empotrados en bulones de 5/8" de diámetro en los cuales se realizaron cavidades con un torno en su frente para alojar a los cilindros de teflón, estos bulones están sujetos a unas tuercas que están soldadas a unos soportes para poder fijarlas al puente del Abreschnittmesser a estas tuercas se les soldó unos cilindros torneados, para poder llevar al juego de las roscas a niveles aceptables para realizar los ensayos, estos detalles se puede observar en la primer fotografía donde se muestra al Abreschnittmesser :



Puntos de presión del Abreschnittmesser

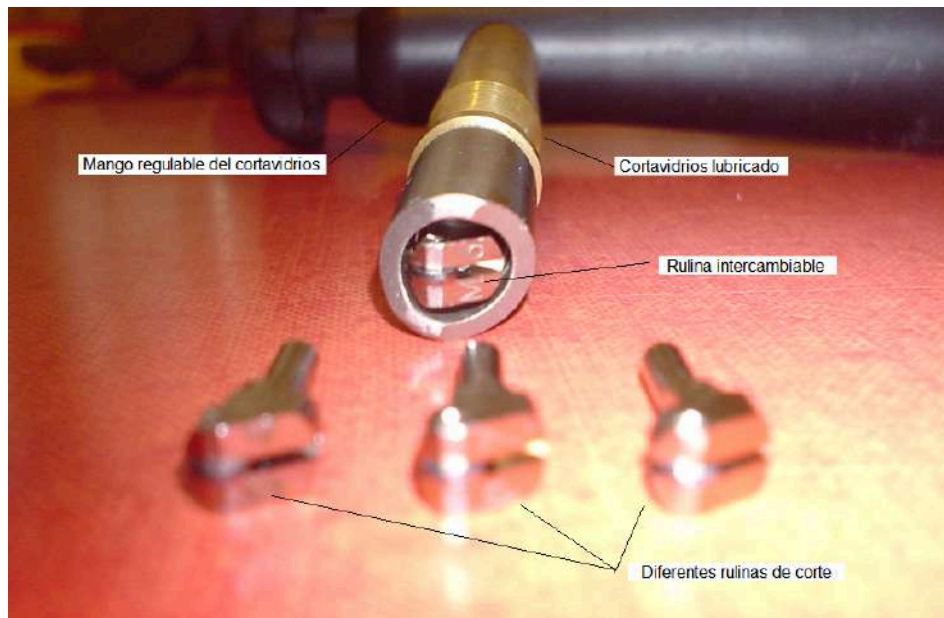
Para la determinación de la fuerza necesaria se realizaron diferentes ensayos, en los cuales se resumió la mayor cantidad de variables que se encuentran en juego, ya que los valores obtenidos en estos ensayos serán el punto de partida para el diseño de la herramienta final de este trabajo. Las diferentes variables analizadas fueron, diferentes pesos de marcado con el cortavidrios, diferentes rulinas de cortavidrios (con diferentes ángulos) y diferentes espesores de vidrios (para este ensayo se usaron 6 mm y 10 mm de espesor ya que son los mas importantes y con los que mas se utilizara la herramienta final).

A continuación se muestra una fotografía donde puede observarse el proceso de marcado con diferentes pesos:



Proceso de marcado con diferentes pesos y diferentes rulinas

En la siguiente fotografía se muestra el cabezal del cortavidrios lubricado con diferentes rutinas intercambiables:



Cabezal del cortavidrios y distintas rulinas intercambiables

Para el proceso de marcado se utilizó el carrito porta cortavidrios el cual en su parte inferior central tiene adosado un buje torneado con un ajuste deslizante para el cabezal del cortavidrios lubricado con lo cual se logra que la fuerza producida

por las pesas hagan penetrar a la rutina en el vidrio y que esta fuerza solo se gaste ahí. Seguidamente se muestra una fotografía del carrito porta cortavidrios:



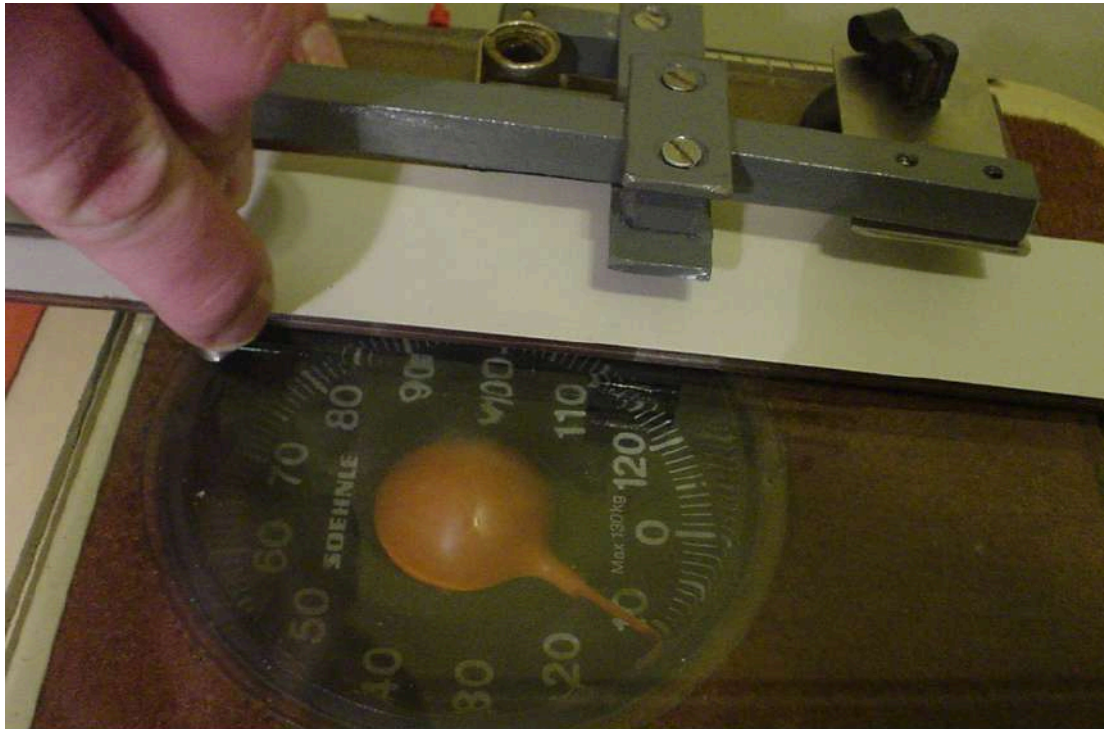
Carrito porta cortavidrios

De esta manera se fueron realizando los marcados con diferentes pesos, luego estos vidrios marcados se llevaron al Abreschnittmesser y cargando con diferentes pesos en el soporte de pesas 2 y diferentes pesos y posiciones para el soporte de pesas 1, se trabajo hasta que se produjeron las fisuras en los vidrios, en la siguiente tabla se resumen los valores obtenidos en los ensayos:

Nº de ensayo	Espesor [mm]	Nº de rulina	Peso de marcado [kg]	Peso en "1" [kg]	Distancia "1" al final [mm]	Distancia "1" al comienzo [mm]	Peso en "2" [kg]	Separación "D" [mm]	Tipo de impronta
1	6	6	7.5	5	----	180	----	50	Teflón
2	6	6	10	5	98	----	----	"	"
3	6	6	12.5	5	----	160	----	"	"
4	6	6	10	5	106	----	----	"	Bronce
5	6	6	7.5	5	----	184	----	"	"
6	6	6	12.5	5	67	----	----	"	"
7	6	4	5	7.5	44	----	----	"	"
8	6	4	6.25	7.5	87	----	----	"	"
9	6	4	7.5	7.5	101	----	----	"	"
10	6	4	5	7.5	54	----	----	"	Teflón
11	6	4	6.25	7.5	98	----	----	"	"
12	6	4	7.5	7.5	64	----	----	"	"
13	6	7	12.5	2.5	113	----	----	"	"

14	6	7	15	2.5	120	----	----	“	“
15	6	7	12.5	2.5	79	----	----	“	Bronce
16	6	7	15	2.5	170	----	----	“	“
17	6	2	3.75	10	115	----	----	“	“
18	6	2	5	7.5	72	----	----	“	“
19	6	2	3.75	10	39	----	----	“	Teflón
20	6	2	5	10	43	----	----	“	“
21	10	4	5	7.5	160	----	20	“	Bronce
22	10	4	6.25	10	94	----	10	“	“
23	10	4	7.5	10	34	----	10	“	“
24	10	6	7.5	10	----	184	10	“	“
25	10	6	10	5	----	164	10	“	“
26	10	6	12.5	5	----	175	10	“	“
27	10	6	10	5	----	186	10	“	Teflón
28	10	6	12.5	7.5	----	161	10	“	“
29	10	7	10	5	----	152	10	“	“
30	10	7	12.5	5	145	----	10	“	“
31	10	7	15	5	----	172	10	“	“
32	10	7	15	5	----	151	10	“	Bronce
33	10	7	12.5	5	102	----	10	“	“
34	10	7	10	7.5	----	143	10	“	“
35	10	6	(*)	10	82	----	10	“	Bronce
36	6	2	(*)	10	----	156	----	“	“

Los valores de los ensayos 35 y 36 que están con la marca (*) corresponden a ensayos marcados a mano de los cuales se han tomado estos valores como representativos de una serie de ensayos realizados. Estos valores se efectuaron sobre una balanza, mientras que un mecánico (vidriero) realizaba el corte con el cortavidrios una persona tomaba lectura de la balanza, esto se realizó con la balanza que se puede observar en la siguiente fotografía:

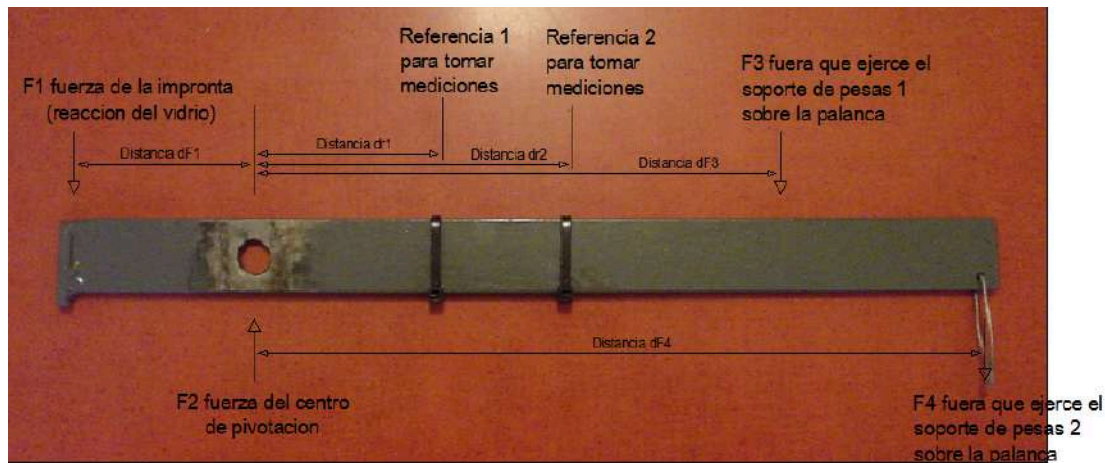


Corte sobre balanza para comparar con los del carrito porta cortavidrios

De este tipo de corte no se tienen muchos valores ya que la dificultad y ensayos descartados es grande y esto implica grandes costos, a medida de ejemplo el ensayo de la fotografía costo unos 5 pesos. En este ensayo se calibro la balanza a cero una vez que tenia todo el peso encima, se puede observar la sopapa que sostiene la escuadra desde la parte superior, mientras que el mecánico con la mano derecha efectúa el corte y con la izquierda sostiene la escuadra haciendo presión en forma paralela a la cara del vidrio de manera que esto no tenga efecto sobre la medición de la presión que se esta ejerciendo en el corte.

Finalmente los valores de marcado obtenidos en las ensayos 35 y 36 fueron de 9 a 10 [kg] y de 4 a 5 [kg] respectivamente, hay que destacar que estos no son los de la fotografía, ya que este fue un ensayo que debió ser descartado pero es el mas ilustrativo.

A continuación se hará el análisis de las fuerzas y momentos que actúan en el Abreschnittmesser, seguidamente se muestra una fotografía donde se esquematizaran las fuerzas:



Palanca del Abreschnittmesser y sus referencias dimensionales

De la fotografía se puede observar que la fuerza F1 es la que ejerce el perno del punto de presión 3, la fuerza F3 es la que ejercen las pesas colocadas en el soporte de pesas 1 mas el propio peso del soporte de pesas 1, al igual que la fuerza F4 esta dada por las pesas colocadas en el soporte de pesas 2 mas el peso del soporte dos y finalmente esta el peso de la barra; estas son las fuerzas que utilizaremos para calcular el balance de momentos en el centro de pivotacion, ya que la recta de acción de la fuerza F2 pasa por el centro de pivotacion esta fuerza no interviene en el balance de momentos.

Las distancias dF1, dF4, dr1 y dr2 son fijas, mientras que la distancia dF3 es variable, esta ultima distancia se determina tomando mediciones de distancia con respecto al extremo derecho (en la fotografía de arriba) de la barra o con respecto a la referencia 2 (ver referencia 2 en la fotografía de arriba). Como aclaración hay que decir que las referencias 1 y 2 se toman a la parte derecha de los sunchos de plástico.

Los valores de las distancias y los pesos son:

$$dF1 = 100 \text{ [mm]}$$

$$dr1 = 100 \text{ [mm]}$$

$$dr2 = 170 \text{ [mm]}$$

$$dF4 = 392 \text{ [mm]}$$

$$dexde = 402 \text{ [mm]} \text{ (distancia desde el centro de pivotacion hasta el extremo derecho de la barra)}$$

$$dexizq = 108 \text{ [mm]} \text{ (distancia desde el centro de pivotacion hasta el extremo izquierdo de la barra)}$$

$$dFbarr = 255 \text{ [mm]} \text{ (distancia desde el centro de pivotacion hasta la línea de acción de la resultante del peso la barra)}$$

$$Pbarr = 0.9 \text{ [kg]} = 8.83 \text{ [N]}$$

$$Fbarr = 0.519 \text{ [kg]} = 5.09 \text{ [N]} \text{ (fuerza resultante de la barra que aplica momento a la distancia dFbarr con respecto al centro de pivotacion en sentido horario, según la fotografía de arriba)}$$

$$Psop1 = 0.765 \text{ [kg]} = 7.5 \text{ [N]} \text{ (peso del soporte de pesas 1)}$$

$$Psop2 = 0.61 \text{ [kg]} = 5.98 \text{ [N]} \text{ (peso del soporte de pesas 2)}$$

dF3 : esta distancia es determinada mas abajo.

La distancia dF3, es determinada a partir de las distancias dadas en la tabla anterior en los cuadros: Distancia "1" al final y Distancia "1" al comienzo, estas son distancias que se tomaron desde la arandela del soporte de pesas 1 hasta extremo derecho de la barra y desde la arandela del soporte de pesas 1 hasta la referencia 2 para tomar medidas respectivamente. Las arandelas del soporte de pesas 1, que se encuentran al medio del soporte de pesas 1, tiene un diámetro de 60 [mm]; por lo que a los valores de Distancia "1" al final y Distancia "1" al comienzo hay que sumarles 30 [mm] para obtener las verdaderas distancias a las que se encuentra el soporte de pesas 1 desde el final de la barra y desde la referencia 2 para tomar medidas en el ensayo.

Por lo tanto la distancia dF3 será:

$$dF3 = d_{\text{extremo}} - (\text{Distancia "1" al final} + 30 \text{ mm})$$

o

$$dF3 = d_{\text{ref2}} + \text{Distancia "1" al comienzo} + 30 \text{ mm}$$

Con estos valores se puede comenzar a plantear el balance de momentos en el centro de pivotación de la barra, considerando positivos los momentos horarios y positivas las fuerzas que apuntan hacia abajo:

$$\sum M_{\text{centro piv}} = 0 \rightarrow F4 \cdot dF4 + F3 \cdot dF3 + F_{\text{barr}} \cdot dF_{\text{barr}} - F1 \cdot dF1 = 0$$

De donde es posible despejar F1, que es el valor que se busca determinar para los posteriores diseños del trabajo:

$$F1 = \frac{F4 \cdot dF4 + F3 \cdot dF3 + F_{\text{barr}} \cdot dF_{\text{barr}}}{dF1}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de F1 calculados para los diferentes ensayos:

Nº de ensayo	Espesor [mm]	Nº de rulina	Peso de marcado [kg]	F3 [N]	F4 [N]	Distancia dF3 [mm]	Fuerza F1 [N]
1	6	6	7.5	56.55	0	380	227.87
2	6	6	10	56.55	0	274	167.93
3	6	6	12.5	56.55	0	360	216.56
4	6	6	10	56.55	0	266	163.4
5	6	6	7.5	56.55	0	384	230.13
6	6	6	12.5	56.55	0	305	185.46
7	6	4	5	81.1	0	328	278.99
8	6	4	6.25	81.1	0	285	244.11
9	6	4	7.5	81.1	0	271	232.76

10	6	4	5	81.1	0	318	270.88
11	6	4	6.25	81.1	0	274	235.19
12	6	4	7.5	81.1	0	308	262.77
13	6	7	12.5	32	0	259	95.86
14	6	7	15	32	0	252	93.62
15	6	7	12.5	32	0	293	106.74
16	6	7	15	32	0	202	77.62
17	6	2	3.75	105.6	0	257	284.37
18	6	2	5	81.1	0	300	256.28
19	6	2	3.75	105.6	0	333	364.63
20	6	2	5	105.6	0	329	360.4
21	10	4	5	81.1	202.2	212	977.54
22	10	4	6.25	105.6	104.1	278	714.62
23	10	4	7.5	105.6	104.1	338	777.98
24	10	6	7.5	105.6	104.1	384	826.56
25	10	6	10	56.55	104.1	364	626.89
26	10	6	12.5	56.55	104.1	375	633.11
27	10	6	10	56.55	104.1	386	639.36
28	10	6	12.5	81.1	104.1	361	713.82
29	10	7	10	56.55	104.1	352	620.11
30	10	7	12.5	56.55	104.1	227	549.42
31	10	7	15	56.55	104.1	372	631.42
32	10	7	15	56.55	104.1	351	619.54
33	10	7	12.5	56.55	104.1	270	573.74
34	10	7	10	81.1	104.1	343	699.22
35	10	6	(*)	105.6	104.1	290	727.29
36	6	2	(*)	105.6	0	356	388.92

Los valores mas destacados de los ensayos y que sirven como parámetro de diseño son los de los ensayos: 2, 4, 8, 11, 13, 15, 18, 20, 22, 25, 27, 30, 33, 35 y 36. De estos ensayos se obtiene como conclusión que las fuerzas F1 para empezar a realizar el diseño se encuentran en el rango de los 96 a 390 [N] para el vidrio de 6[mm] de espesor, mientras que para el vidrio de 10 [mm] de espesor la fuerza F1 se encuentra en el rango de los 540 a 730 [N].

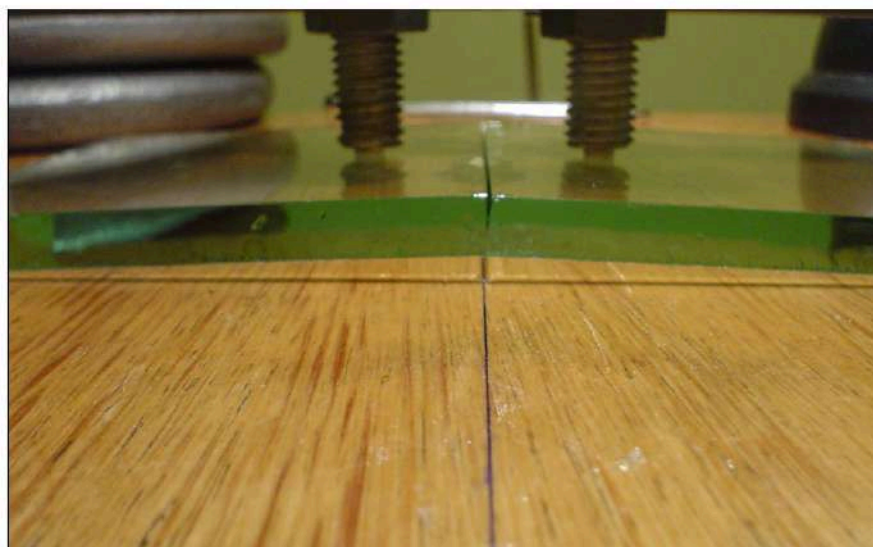
A continuación se muestra una fotografía donde se puede observar al Abreschnittmesser cuando se realizaron los ensayos:



Abreschnittmesser durante el ensayo

Se puede observar que la placa de vidrio no está apoyada sobre la mesa del Abreschnittmesser, es decir la placa de vidrio se encuentra flotando en el momento del ensayo entre 1 y 2 [mm], esto es para que sobre la placa de vidrio, estén únicamente ejerciendo fuerza los puntos de presión, en el ensayo no se tuvo en cuenta el peso del vidrio, ya que este no tenía incidencia notable en el resultado y de alguna forma la fuerza que se ejerce en el punto de presión 3 (que es la que se mide) lo está teniendo en cuenta.

La placa de vidrio debe estar nivelada entre el punto de presión 1 y el punto de presión 2 lo mejor posible para lograr una distribución de los esfuerzos simétrica y no introducir resultados erróneos en los ensayos, en la fotografía que sigue, se puede observar el resultado luego de realizado el ensayo:



Apertura simétrica del corte en el ensayo de determinación de fuerzas

En la fotografía anterior se puede observar la simetría lograda luego de quebrar una placa de vidrio la cual fue marcada justo a la mitad con el cortavidrios, perfectamente ubicada la marca sobre la línea de referencia del Abreschnittmesser y perfectamente balanceada con los puntos de presión 1 y 2.

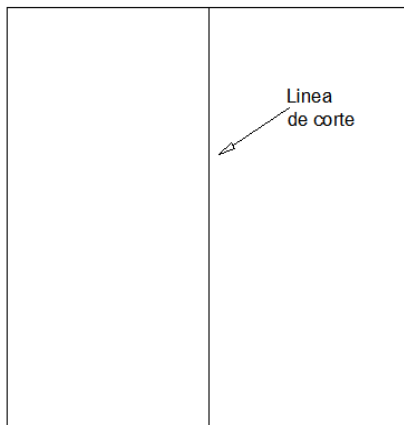
DIFERENTES TIPOS DE CORTE

(Parte 3)

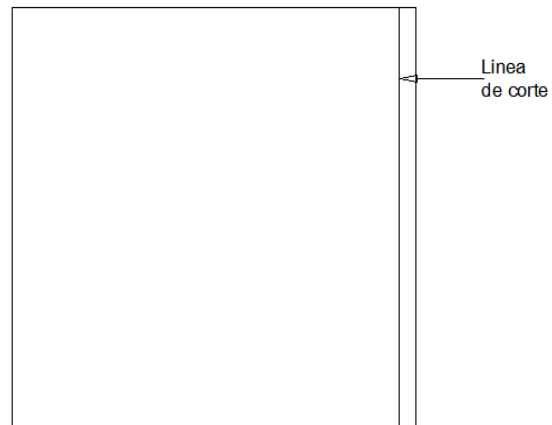
7 tipos básicos de cortes

La cantidad y tipo de cortes que se le pueden realizar a una placa de vidrio son infinitas, ya que para cualquier forma que se le desee dar a la placa se estaría realizando un nuevo tipo de corte, sin embargo cualquiera que sea el corte se va a realizar al vidrio se puede encuadrar en una combinación de 7 tipos básicos de corte, estos son: Corte longitudinal rectangular (cantidades proporcionales de masa a ambos lados del corte, este concepto será analizado en detalle mas adelante), corte longitudinal de borde, corte recto en triangulo, corte entrante de semicírculo, corte de circular central, corte entrante de esquina rectangular y corte entrante de lado (conocido como caja). Si bien pueden verse que falta algunos tipos de cortes, estos no son considerados ya que pueden ser hechos con combinaciones de técnicas que serán detalladas al explicar las diferentes técnicas en cada corte.

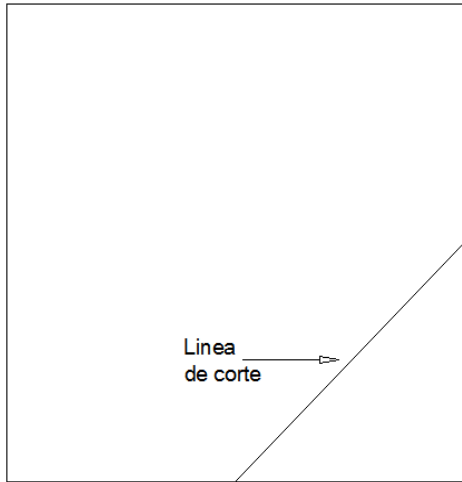
Seguidamente se muestran las graficas de los cortes básicos:



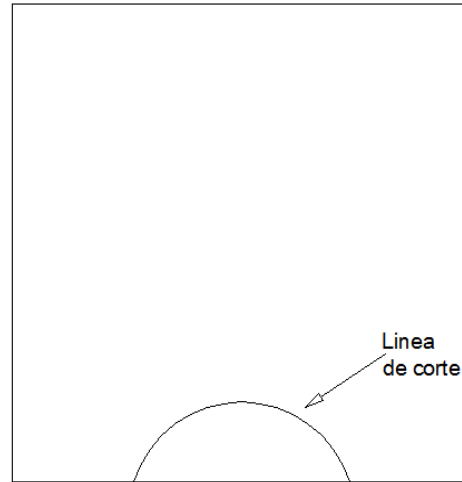
Corte longitudinal rectangular
Figura a



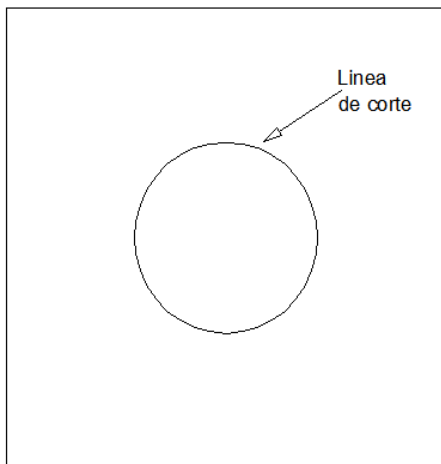
Corte longitudinal de borde
Figura b



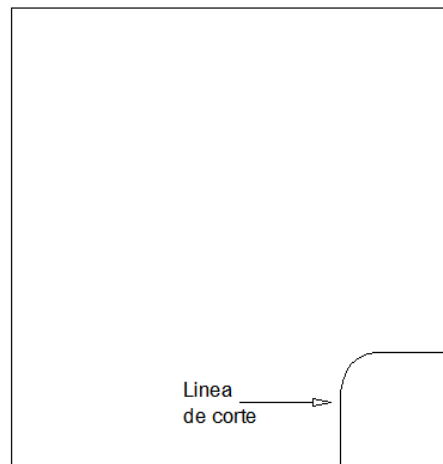
Corte longitudinal recto en triángulo
Figura c



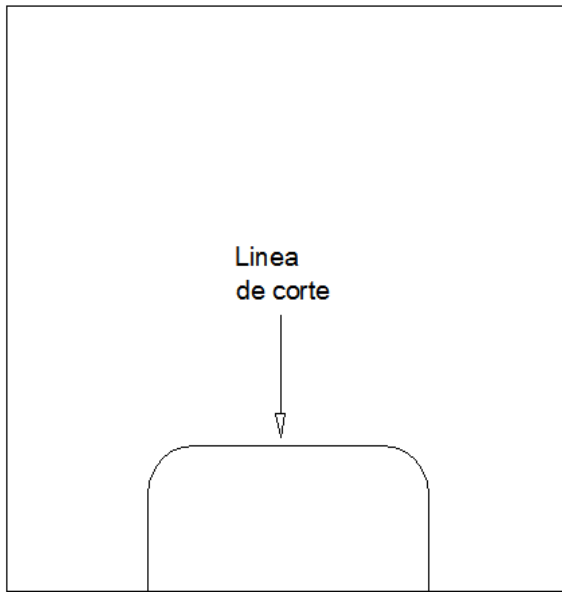
Corte de semicírculo
Figura d



Corte de círculo central
Figura e



Corte entrante de esquina rectangular
Figura f



Corte entrante de lado
Figura g

Corte longitudinal regular con cortavidrios (Condición de masa)

Es el corte mas simple de todos, donde se corta a un vidrio en forma recta marcándolo con el cortavidrios posteriormente se lo quiebra, el quiebre se puede realizar de diferentes manera, siendo la mas popular la de llevar fisura hecha con el cortavidrios hasta el borde de la mesa de trabajo y dejarlo caer levemente hasta que el vidrio se quiebra por completo, otra forma es teniendo una regla, la cual se introduce debajo del vidrio en el lugar marcado y se la levanta para provocar el quebrado de la placa de vidrio o se hace presión en forma equidistante de la regla sobre la placa de vidrio de bodoque la fisura se propague y quiebre al vidrio. Estos procedimientos no presentan dificultad en tanto la masa a ambos lados del corte sean de dimensiones parecidas y los cortes salgan de la placa de vidrio formando un Angulo de 90° con el borde del vidrio y pasen a trabes de toda la placa de vidrio, esto es lo que se denomina condición de masa en el rubro.

La condición de masa estipula que para poder cortar un vidrio por el procedimiento de marcado con cortavidrios y presión en tres puntos (ver teoría de los tres puntos) la masa a ambos lados del corte debe ser la misma, o por lo menos el lado de menor masa debe tener un ancho de tres a cuatro veces su espesor, ya que si no se tiene este ancho mínimo al intentar cortar a la placa de vidrio, el corte saldrá hacia un lado (el de menor masa) y posteriormente será muy dificultoso poder tener un acabado prolijo del corte.

Seguidamente se muestra una fotografía donde se puede observar la disposición para efectuar el marcado del corte:

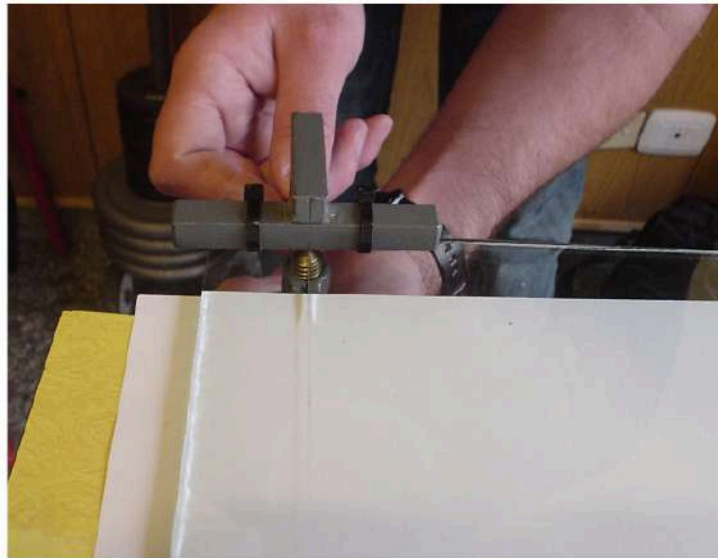


Disposicion del marcado del corte

En la anterior fotografía se puede observar la condición de masa, donde el ancho del corte supera varias veces al espesor de la placa de vidrio, en dicha fotografía se puede apreciar la posición de los dedos que sostienen a la escuadra, la

misma debe estar sostenida siempre a los dos tercios de su la altura del vidrio con el dedo mayor apoyado entre el vidrio y la escuadra y el dedo índice sobre la escuadra haciendo fuerza hacia arriba, de este modo la escuadra no se moverá al efectuar el marcado con el cortavidrios.

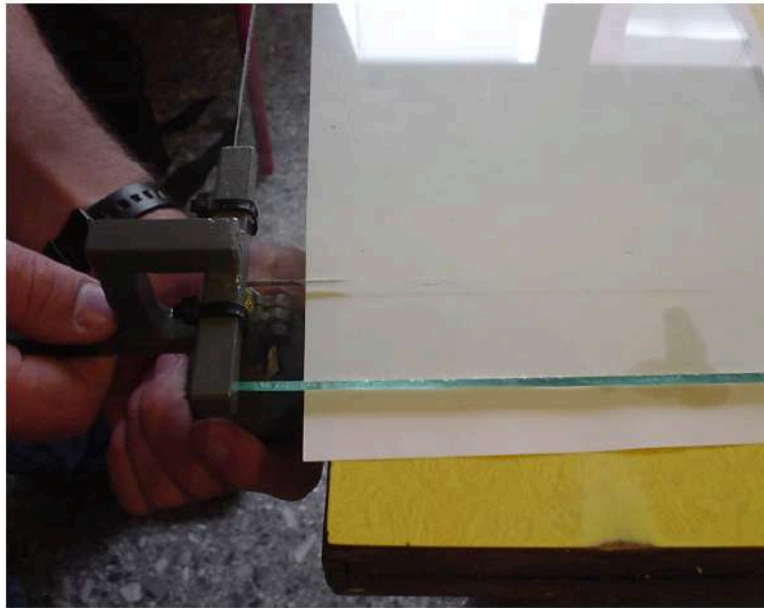
Ahora se mostrara una fotografía donde se puede apreciar la disposición para efectuar el corte en el vidrio con la herramienta Abreschnitt 1, la cual es detallada en otro capítulo del trabajo:



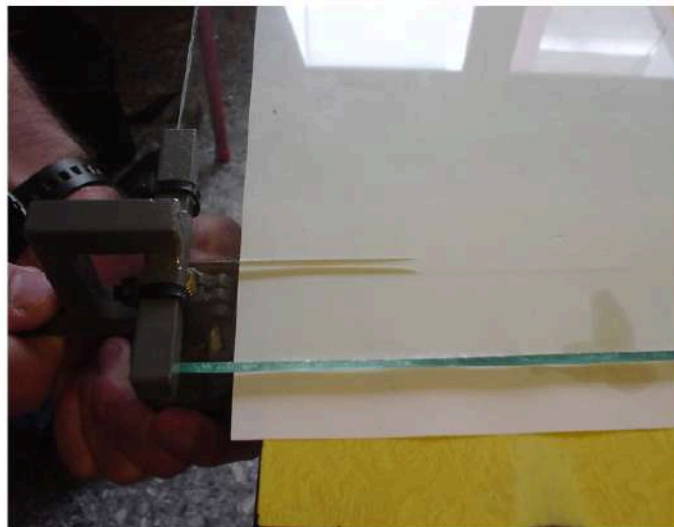
Disposicion para efectuar el corte

En la fotografía se puede apreciar el comienzo de la apertura del corte, este se puede ver por como va cambiando ligeramente el brillo en la línea de corte.

En las próximas fotografías se puede observar como va progresando la apertura del corte a medida que se va incrementando el avance del tornillo del punto de presión 3 del Abreschnitt 1, esto se puede observar debido a la variación de brillo que se va produciendo en el corte de la placa de vidrio:



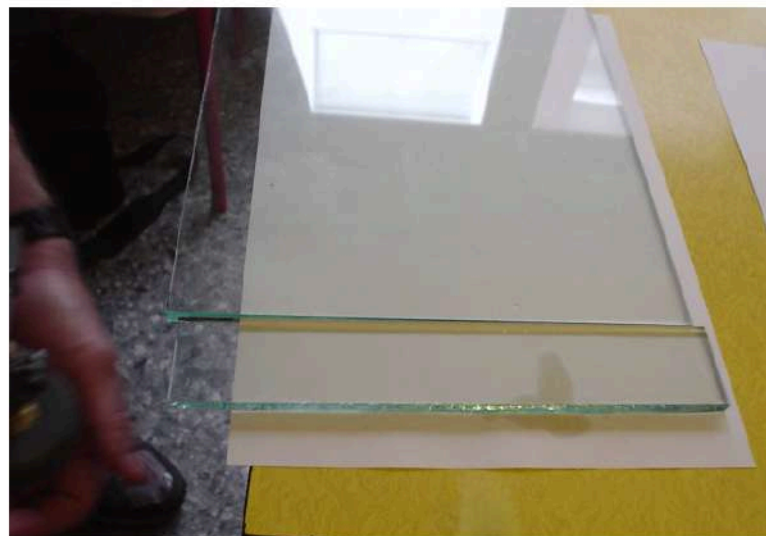
Propagacion de la fisura 1



Propagacion de la fisura 2



Propagacion de la fisura 3



Finalizacion del corte

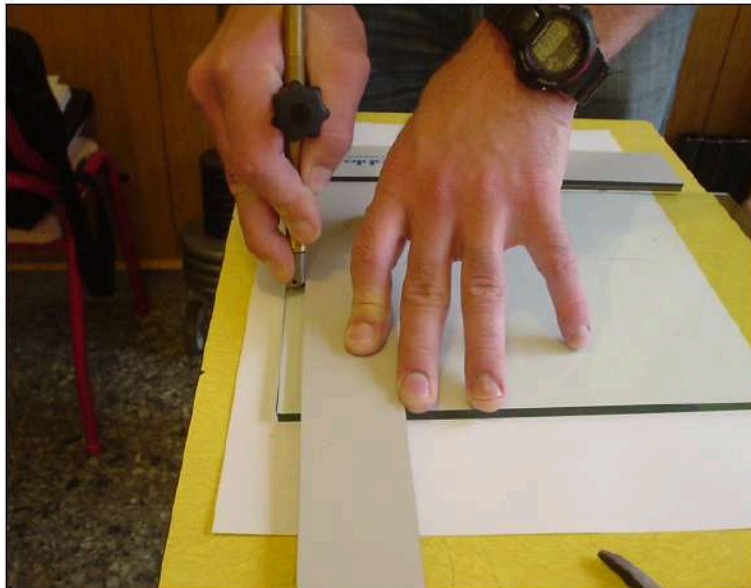
En la secuencia de fotografías se puede ver como propaga la fisura en forma controlada al ir girando gradualmente el tornillo de la herramienta de apertura de cortes Abreschnitt 1, en la ultima fotografía se puede apreciar que el borde del corte tiene un Angulo de 90° , esto se debe a que la operación fue realizada con precisión y una herramienta adecuada, esta es una condición muy importante ya que disminuye tiempo en el proceso de pulido y además hay procedimientos que no pueden realizarse a los vidrios a menos que posean un Angulo recto en el borde.

Corte longitudinal de borde (énfasis en vidrio de 6 [mm])

La condición de masa explicada en el apartado anterior de este trabajo, es un concepto antiguo que los vidrieros consideraron y una gran mayoría sigue considerando con absoluto, este concepto sigue siendo muy importante y es utilizado para realizar un motón de trabajos, pero sin embargo existen técnicas nuevas que para en muchos casos mostrarían como obsoleto al principio de masas.

Seguidamente se mostrara la técnica de corte longitudinal de borde, en este caso trabajaremos con vidrio de 6 [mm] de espesor que es en el caso que mas notable se hace en esta técnica. En la técnica que se desarrolla a continuación se puede ver como con el conocimiento de pasos sencillos puede cortarse de un vidrio un borde que puede ser inclusive mas angosto que el espesor de la placa de vidrio en forma continua, esto es alo que la mayoría de los vidrieros afirmarían que es imposible, pero a continuación se muestra como se hace.

Seguidamente se muestra una fotografía en el momento del macado de la placa de vidrio:



Marcado en el corte longitudinal de borde

La placa de vidrio de la fotografía tiene 6 [mm] de espesor y la escuadra esta a 12 [mm] del borde del vidrio y debido a que el cortavidrios que se esta utilizando en la fotografía roba 6 [mm] en el corte, se esta sacando una franja de 6 [mm] del vidrio, es decir igual a su espesor.

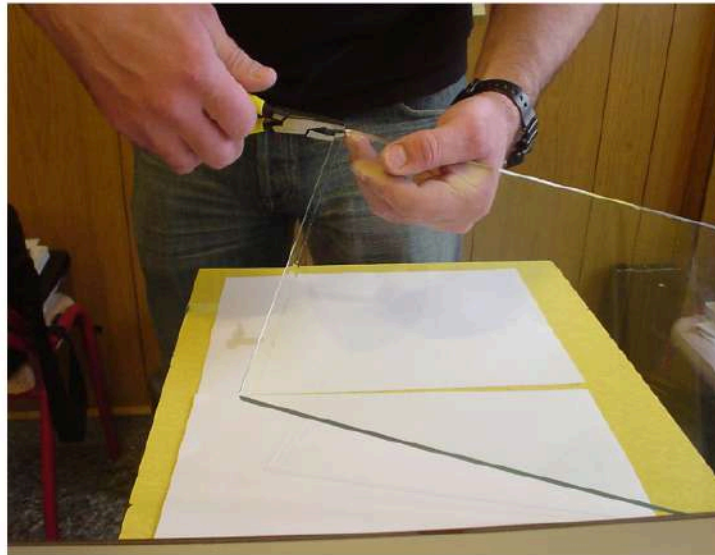
Todo lo explicado en el capitulo anterior sobre la sujeción de la escuadra es valido aquí también.

En primer lugar es imprescindible realizar una buena limpieza del vidrio, esto puede realizarse con alcohol isopropilico o isopropanol. Seguidamente debe posicionarse correctamente la escuadra y las manos.

Posteriormente debe simularse el corte para que deje una estela de lubricante sobre el vidrio, ya que este cortavidrios es auto lubricado (Silverschnitt 2000 con rutina M6 de 155°), la simulación del corte se efectúa marcando sobre el vidrio con el cortavidrios pero ejerciendo una presión ligera, además de dejar una

estela de lubricante la simulación sirve como elemento de control para ver que el procedimiento de marcado sea llevado a cabo sin errores.

Luego se procede al marcado ejerciendo una fuerza de 10 [kgf] contra el vidrio. Es importante que el vidrio quede bien marcado hasta el final. Una vez terminado el marcado se toma al vidrio como se muestra en la siguiente fotografía:



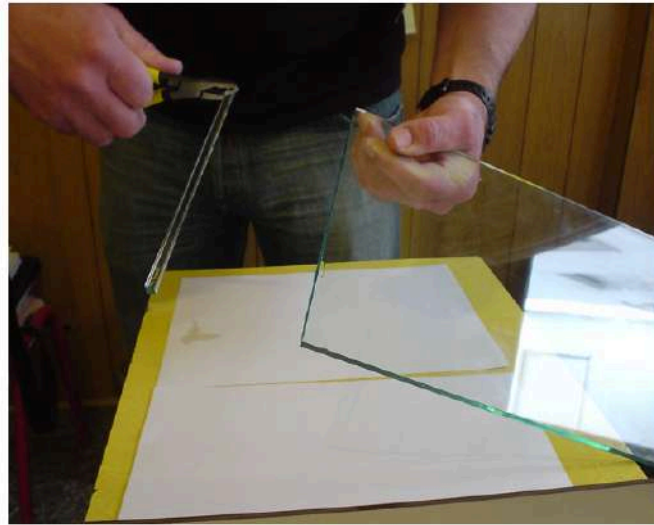
Posicionamiento de la pinza para abrir el corte

En la fotografía se puede ver como se posiciona la pinza Silverschnitt 091, esta se posiciona en donde se termino de realizar el marcado con el cortavidrios, esta pinza tiene unas picas de metal muy duro en la punta y la punta tiene una forma especial, con lo que se enclava en el vidrio produciendo una pequeña propagación de la fisura de corte, o donde se empieza a quebrar el vidrio.

Luego de posicionar correctamente la pinza hay que realizar un movimiento combinado para lograr el éxito del corte, en el cual hay que producir un movimiento de tracción y quebrar haciendo un movimiento de giro en sentido antihorario visto desde el lector al mismo tiempo, este movimiento es bastante complejo y requiere de mucha practica por parte del mecánico (vidriero) para obtener buenos resultados.

La gran importancia de este corte es que permite utilizar vidrios que antes no se podían utilizar al estar muy cerca de la medida a la que había que ajustar los vidrios a la hora de comerciarlos.

En la próxima fotografía se muestra el final del proceso de corte longitudinal de borde:



Finalización del proceso de corte longitudinal de borde

En esta última fotografía se puede apreciar la posición de la mano derecha del mecánico, la cual justo después de abrir el corte queda desplazada a la izquierda debido al esfuerzo de tracción y levemente girada en sentido antihorario según la posición del lector.

Por otra parte en la fotografía puede apreciarse la limpieza del corte, donde se logro un ángulo de 90° en los bordes de la tira y la placa de vidrio.

Corte recto en triángulo

Este es un corte que no presenta mayor dificultad, en este caso hay que prestar mucha atención en las puntas que se obtienen de la placa de vidrio una vez realizado el corte. Es un corte que se puede realizar con o sin lubricación, el hecho que se decida por lubricar o no el corte depende principalmente del espesor del vidrio, del cortavidrios que se utilice o del tiempo que se puede llegar a tardar desde que se marco a la placa de vidrio con el cortavidrios hasta que se quiebra o abre dicho corte.

Seguidamente se muestra una fotografía en donde se esta efectuando el marcado de la placa de vidrio sin lubricación:



Marcado del corte de la placa de vidrio en triángulo

En la fotografía de arriba se puede ver que se esta utilizando un cortavidrios Silverschnitt 2004.0 que tiene un apartamiento de regla de 2.5 [mm] y un ángulo de corte de 138° , la fuerza de marcado es aproximadamente de 35 [N]. Además se puede apreciar la posición de la mano izquierda del mecánico, donde los dedos índice y pulgar son utilizados para sostener la escuadra apoyándolos contra la placa de vidrio y un poco sobre la escuadra, mientras que el dedo índice esta totalmente apoyado sobre la escuadra y esta haciendo fuerza hacia los dedos mayor y pulgar y evitando el desplazamiento de la escuadra a lo largo.

Es importante evitar que se mueva la escuadra en este corte como se explico recién, además es muy importante que el marcado con el cortavidrios llegue bien hasta las puntas o bordes de la placa de vidrio.

Luego de efectuar correctamente el proceso de marcado, se debe quebrar o abrir el corte. En el proceso de apertura del corte se debe prestar atención a las puntas que resulten del corte, ya que estas naturalmente tienden a formar un ángulo de 90° , para evitar esto tenemos que distinguir el tamaño del pedazo triangular resultante del corte y en función de este, el proceso de apertura será ligeramente diferente.

A continuación se muestra una fotografía de la disposición para el quebrado del vidrio mostrado en el marca de la fotografía anterior:



Disposicion para la apertura del corte en triangulo

En la fotografía de arriba se puede ver que ara este corte es necesario utilizar protección, en este caso se utiliza un par de guates de goma y tela para vidriero, estos guantes son resistentes a los cortes de los filon de los vidrios y además tienen un tramado antideslizante en la palma.

Como puede apreciarse en la fotografía, la línea de corte esta ligeramente fuera del bode de la mesa, para el tamaño del triangulo de vidrio resultante del corte es necesario efectuarlo de esta manera; luego de situar al paño de vidrio en el lugar que se observa en la fotografía se procede a la apertura del corte, para realizar dicha apertura del corte primero se realiza una fuerza de tracción e inmediatamente después una rotación en sentido antihorario visto desde el lector simultáneamente con el movimiento de tracción, algo similar a lo que se explico en el caso del corte longitudinal de borde.

En la próxima fotografía se muestra el resultado del corte:

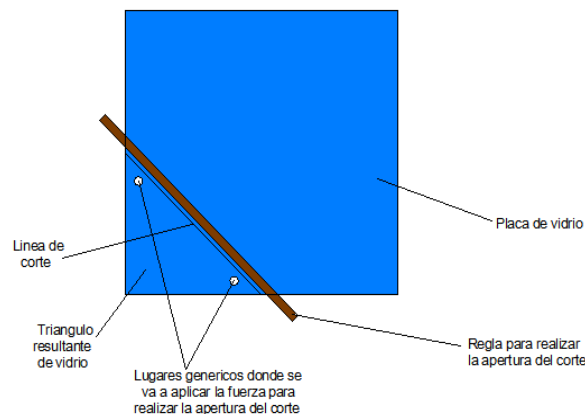


Finalizacion del proceso de corte en triangulo

En la fotografía de arriba puede apreciarse que las puntas del vidrio han salido en forma prolija.

Para dimensiones de hasta 200 [mm] de longitud de los lados del triangulo el corte debe realizarse de la forma que se indico anteriormente y puede realizarse hasta triángulos que tengan 250 [mm] de longitud en sus lados (este limite esta en realidad dado por la capacidad o tamaño de vidrio que pueda manejar el mecánico), al ser superiores la dimensiones del triangulo de vidrio que resulta del corte el proceso de apertura del corte debe ser distinto.

Para dimensiones mayores de los lados del triangulo el procedimiento de apertura del corte puede basarse en realizar en primer lugar la apertura de la puntas hasta unos 60 [mm] de longitud aproximadamente y posteriormente terminar de realizar la apertura total del corte (proceso que también se realiza cuando los lados del triangulo son muy distintos en sus longitudes) o cortando a la placa de vidrio en una medida aproximada y posteriormente cortándole una tira de unas tres a cinco veces su espesor o introduciendo una regla debajo de la placa de vidrio como se esquematiza en el siguiente dibujo:



Esquema para la apertura de corte de triángulos grandes

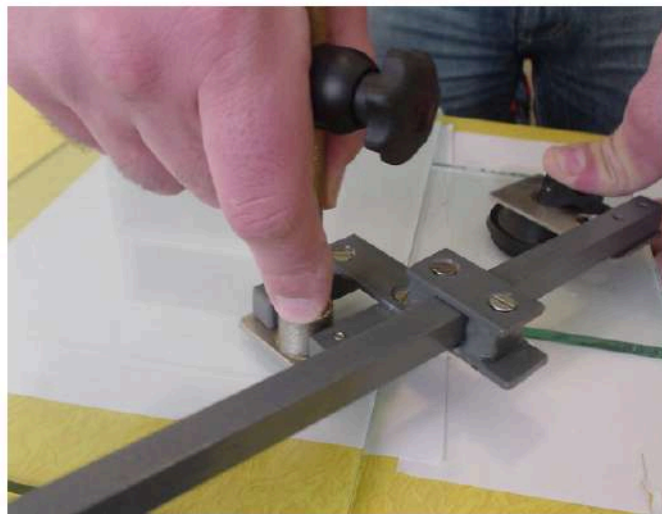
En la figura de arriba puede apreciarse como se realiza la ubicación de los elementos para realizar la apertura del corte cuando los lados del triangulo resultante superan los 250 [mm] de longitud, la regla debe ubicarse debajo del vidrio apartada cerca de 10 [mm] de la línea de corte como se muestra en la figura de arriba y la atura de a regla debe se de aproximadamente de 5 [mm]; en la figura se puede apreciar también la ubicación de los puntos donde se aplica la fuerza para realizar la apertura del corte, estas fuerzas deben aplicarse simultáneamente y deben ser de la misma intensidad, además estas fuerzas deben tener un lugar que se encuentren a distancias simétricas de los bordes del triangulo de vidrio resultante y deben estar separadas una distancia determinada de la línea de corte, la intención de la ubicación de dicha fuerza es que el corte comience a abrirse desde los bordes o muy cercanamente a los bordes del vidrio y posteriormente la apertura del corte finalice simultáneamente a todo el largo.

Si las fuerzas se encuentran aplicadas muy cerca de los bordes, se empezara a abrir el corte por las puntas y posteriormente doblara el corte hacia el lado donde están siendo aplicadas las fuerzas del triangulo, si las fuerzas están muy alejadas de los lados del triangulo, las puntas de mismo saldrán defectuosas ya que el corte tendera a salir a 90° . La ubicación y forma de aplicar las fuerzas es responsabilidad del mecánico y debe determinar el mismo como aplicarlas. A modo de guía se puede decir que la ubicación debe estar a unos 130 [mm] de la línea de corte y a una distancia similar de los bordes del triangulo, pero estas distancia van variando según el tamaño del triangulo; y una forma de lograr una fuerza pareja en los dos lugares de aplicación es situarse frente al triangulo sobre la línea diagonal de paño de vidrio, arrimar las manos hasta los puntos donde se va a efectuar el esfuerzo, poner los brazos bien rectos y firmes y finalmente aplicando el esfuerzo manteniendo los brazos firmes balanceando todo el cuerpo.

Corte de semicírculo

Este es un corte en el cual la dificultad se produce al finalizar la apertura del mismo, ya que contrariamente a como se explicó en el punto anterior que el corte al terminar de salir tiende a tener un ángulo de 90° con respecto al borde por el que sale, en este caso tiende a salir tangencialmente al arco de circunferencia.

En la próxima fotografía se muestra la disposición de los elementos para realizar el corte:



Disposición de los elementos para realizar el corte en semicírculo

En la fotografía de arriba se puede ver como están dispuestos los distintos elementos: en primer lugar se determina el radio del círculo y el grado de penetración del círculo en la placa de vidrio, posteriormente se calibra el compás a la medida del radio del círculo, seguidamente se toma un pedazo de vidrio auxiliar para colocar al compás y se le marca una cruz con una microfibrá para identificar el centro donde se va a ubicar al compás.

Una las líneas de la cruz debe llegar hasta el borde del pedazo auxiliar de vidrio que va estar en contacto con el vidrio que se va a cortar siendo perpendicular esta línea al borde del pedazo de vidrio auxiliar.

El centro de la cruz debe estar a la distancia del borde que hace contacto con el vidrio que se va a cortar a la distancia que se desea de excentricidad.

Sobre el vidrio que se va a cortar hay que trazar una línea con la microfibrá que sea perpendicular al borde del vidrio que va a hacer contacto con el vidrio auxiliar y debe ser simétrica al semicírculo, esta línea se va a alinear posteriormente con la del vidrio auxiliar.

Utilizando las marcas del compás (en el siguiente apartado del trabajo se explican detalladamente), se posiciona al compás sobre el vidrio auxiliar; luego se utilizan las líneas trazadas para alineación y se alinean los vidrios como se puede ver en la fotografía de arriba.

Una ves puesto todo en su lugar se procede a realizar la simulación del corte, como se explicó en apartados anteriores; luego se procede al marcado, donde para ello se utilizó un cortavidrios lubricado Silveschnitt 2000 con rulina M6 de 155° y una fuerza de marcado de 100 [N] aproximadamente.

Luego de realizar el marcado con el cortavidrios, se realizó la apertura del corte con la herramienta Abreschnitt 2 comenzando por un de los extremos del corte como se puede ver en la siguiente fotografía:



Comienzo de la apertura del corte en semicirculo

La apertura del corte se va realizando por tramos, comenzando por donde se puede ver en la fotografía, haciendo progresar a la fisura unos 50 [mm], posteriormente se mueve la herramienta hasta unos 5 [mm] por delante de donde a llegado el extremo de la fisura, prosiguiendo de esta manera hasta superar la mitad del corte. Una vez que se llegó a pasar la mitad de la apertura del corte se comienza a fisurar a la placa de vidrio desde el otro extremo del corte como se ve en la siguiente fotografía:



Comienzo de apertura del corte desde el otro extremo

Este proceso de apertura se realiza comenzando por un extremo y luego por el otro como se puede ver en la fotografía de arriba para que la propagación de la fisura salga justo por la línea de corte, ya que si se trata de cortar de continuo llega hasta un punto y luego se escapa el corte tangencialmente debido a la disposición de los tres puntos de presión (los puntos de presión son explicados en otro capítulo del trajo), una vez que se comenzó la fisuración desde los dos extremos puede seguirse por cualquiera de los dos hasta que se unan los extremos de fisuras, luego traccionando sobre el trozo de circunferencia se logra terminar el corte como se muestra en la siguiente fotografía:



Traccionado para finalizar el corte de smicirculo

En la fotografía anterior se puede ver como se realiza el traccionado, cave aclarar que es conveniente realizar el traccionado desde la mitad del semicírculo.

Seguidamente se muestra una fotografía donde se puede apreciar a la placa de vidrio cortada definitivamente:



Finalizacion del corte en semicirculo

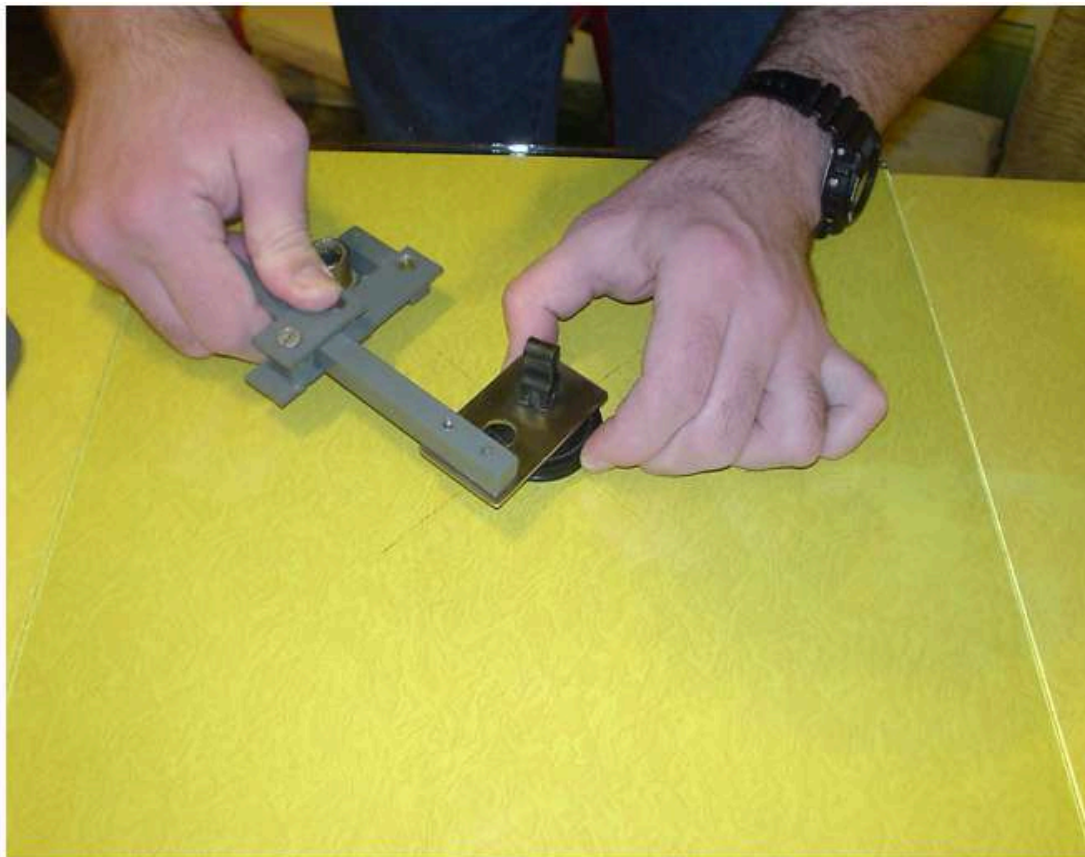
En la fotografía se puede apreciar como han quedado la punta del pedazo de semicírculo extraído y más importante aun que en la placa de vidrio el corte ha quedado perfecto en tanto que el corte tiene un ángulos de 90° , lo que en el proceso de pulido representa una reducción de costo y tiempo.

Corte círculo central

Cundo se desea cortar un círculo en el centro de una placa de vidrio, dependiendo del diámetro de este conviene realizarlo con una mecha de copa diamantada o marcando con un cortavidrios y posteriormente realizando la apertura del corte como se mostrara. En el caso de que el círculo tenga un diámetro inferior a los 15 [cm] es preferible realizar el agujero con la mecha al encontrar diámetros superiores es preferible otra técnica.

En el caso de tener un agujero de 25 [cm] de diámetro como será mostrado en el ejemplo ya no es posible realizar el agujero con una mecha y se recurre al marcado con el cortavidrios, no solo esto sino que la técnica que se expondrá es extensiva a otras formas geométricas dentro del vidrio.

El primer paso es una buena limpieza de ambas caras de la placa de vidrio, posteriormente hay que marcar dos líneas perpendiculares con una micro fibra que indiquen el centro del agujero en su intersección, luego debe calibrarse el compás para cortar y poner al compás como se muestra en la siguiente fotografía:

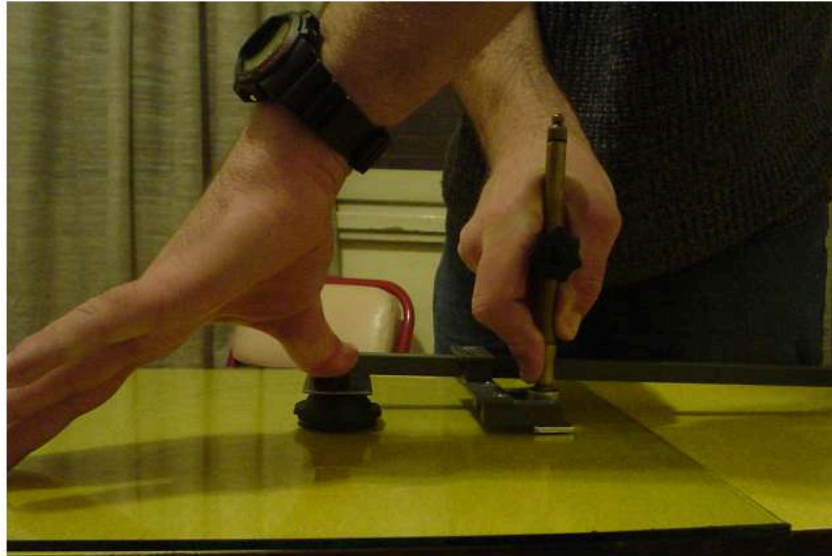


Posicionado del compas en la placa de vidrio

En la figura se pueden apreciar las líneas perpendiculares de posicionamiento, en la base de la ventosa del compás hay unas líneas de

posicionamiento las cuales se hacen coincidir con las del vidrio, se puede apreciar el agujerito que hay en la chapita sobre la ventosa, ese agujerito sirve para poder ver la alineación de las líneas del compás y las del vidrio.

Una vez que se a colocado al compás en su posición se procede a simular el corte con el cortavidrios, en este caso se utiliza el Silverschnitt 2000 con una rutina M6, este cortavidrios es auto lubricado y posee una rulina excéntrica que gira loca con lo cual la rutina se alinea automáticamente en el corte, seguidamente se muestra una fotografía que muestra el momento de cortado del vidrio:



Momento de cortado con el cortavidrios

Es importante simular previamente el corte, esto se hace como si se estuviera cortando la placa de vidrio sin ejercer la fuerza necesaria para hacerlo, esto permite ver si en el trayecto del corte se encuentra alguna suciedad que pueda perjudicar al corte, también permite ver si se va a cometer algún error de aplicación en el corte y además permite dejar una estela de fluido de corte.

En la fotografía se ve el momento en que se finaliza el corte, puede apreciarse la posición de las manos, en la cual mano izquierda ayuda a sostener al compás y la mano derecha esta operando con el cortavidrios, las manos no deben cruzarse en la operación por lo que es muy importante el lugar donde se comienza el corte.

En la fotografía también puede apreciarse la posición del cuerpo, es muy importante que el codo del brazo que opera al cortavidrios pueda desplazarse sin chocar contra el cuerpo, para que en el corte pueda ejercerse una fuerza homogénea y esto es valido para cualquier corte. (Este error del codo contra el cuerpo es uno de los más habituales).

Luego del marcado con el cortavidrios se procede a la apertura del corte, para ello primero se quita el compás de la placa de vidrio y se limpia suavemente el fluido de corte sobrante, el fluido de corte debe ser ligeramente removido para que permita una buena visión en la apertura del corte pero es necesario que quede dentro de la fisura generada por el cortavidrios fluido para que evite la regeneración, luego se utiliza le Abreschnitt 2 (herramienta que es mostrada con mayor detalle en

otra capítulo del trabajo) para generar la apertura del corte, en la próxima fotografía se puede apreciar al Abreschnitt 2 propagando la apertura del corte:



Apertura del corte con el Abreschnitt 2

La apertura del corte se realiza por todo el perímetro de la circunferencia hasta abrir totalmente al círculo, en este momento la apertura del corte se realizó hasta el 90 % del espesor del vidrio, para terminar de realizar la apertura del corte se da vuelta la herramienta Abreschnitt 2 y se le da presión con los puntos de presión 1 y 2 desde la cara inferior de la placa de vidrio y con el punto de presión 3 desde la cara superior como se muestra en la siguiente fotografía:



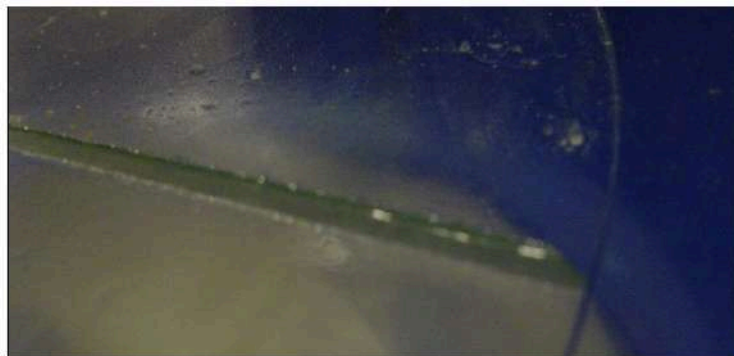
Apertura 100% del corte

En la fotografía se puede apreciar como comienza a realizarse la apertura de la cara inferior del vidrio, esto se realiza hasta completar la circunferencia. Al terminar el corte esta abierto al 100%, pero debido a que las distancias son de muy pequeño orden no es posible separar a los dos pedazos de vidrio que están totalmente cortados. Para poder separar estos pedazos de vidrio se practican dos cortes perpendiculares con la sierra circular para vidrios que pasan por el centro del agujero como se muestra en la siguiente fotografía:



Cortes perpendiculares con la sierra

En los cortes con la sierra es importante llegar bien al borde del corte sin tocar al otro pedazo de vidrio, una vez que se han hecho ambos cortes hay que dar vuelta al vidrio y terminar de cortar los pequeños pedacitos de vidrio que no son posibles de cortar debido a la curvatura de la sierra, en la próxima fotografía se puede apreciar un detalle de los pedacitos sin cortar:



Detalle del pedacito de vidrio sin cortar

Una vez terminados de cortar completamente los pedacitos de vidrio se puede terminar el corte dando un pequeño golpe con el dedo sobre el vidrio, en la fotografía que sigue se muestra esto:



Izq justo antes de dar el golpecito, der justo despues

Luego se muestra una fotografía del corte terminado, en la misma se puede apreciar la alta prolijidad que tiene el borde cortado del vidrio:



Corte del circulo central terminado

Esta calidad de corte es posible de lograr con las herramientas utilizadas, en el caso de la Abreschnitt 2, tiene una distancia de penetración dentro de la placa de vidrio de 14 [cm], con lo cual si se requiere hacer un corte dentro de una placa de vidrio a una mayor distancia, no será posible utilizarla, con lo que es necesario


recurrir a otras herramientas, en la practica se recurre a golpear al vidrio con un martillo lo que genera un borde desprolijo y al cual hay que realizarle un arduo trabajo de pulido, seguidamente se muestra una fotografía de un corte de un circulo efectuado con martillo en una puerta de vidrio templada:



Corte de un circulo con martillo

En la fotografía se puede apreciar que el circulo a quedado irregular e incluso que tiene un escallado, esto es debido a que el trabajo de pulido que debió realizarse posterior al de corte a sido arduo e incluso no han podido eliminar el defecto del escallado.

Una herramienta que se encuentra disponible en el mercado para mejorar este tipo de trabajo es:



Pistola abrecortes SILBERSCHNITT

Para vidrio grueso · robusta · totalmente metálica - fuerza de impacto ajustable

BO 710.0	10-20 mm
BO 710.1	15 - 25 mm

Es una pistola que se posiciona del extremo justo debajo del vidrio y jalando la manija para abajo produce un golpe en el vidrio el cual abre el corte, en la parte posterior tiene una perilla con la cual se puede regular la intensidad del golpe, esta herramienta produce una calidad muy superior de corte que en el caso de hacerlo con un martillo pero el proceso posterior de pulido sigue siendo considerable ya que el corte sale con bastantes irregularidades.

Corte entrante de esquina

Este es un corte en el cual tradicionalmente se han empleado muchos procedimientos para realizarlo, pero para el cual como se vera existen técnicas especialmente atractivas para realizarlo únicamente mediante el proceso de marcado con cortavidrios y posterior apertura del corte. Sin embargo las antiguas técnicas son mantenidas para algunos tipos particulares de cortes.

El primer procedimiento consiste en una combinación de agujereado, aserrado y marcado con cortavidrios y posterior quebrado. El primer paso es el agujereado que se realiza con mecha tipo copa diamantada en la punta con un abundante flujo de agua, seguidamente se muestra una fotografía de este proceso:



Agujereado del vidrio

En la fotografía de arriba se ve el momento en que la mecha termina de agujerear al vidrio donde se puede ver el cono de agua justo debajo del vidrio, en este caso se utilizó una mecha de 10 [mm] de diámetro.

Una vez que se termina de agujerear al vidrio se debe aserrar con una sierra circular de disco diamantado, seguidamente se muestra una fotografía en el momento de realizarle el aserrado a la plaquita de vidrio:



Proceso de aserrado de la plaquita de vidrio

En la fotografía de arriba se puede ver como se esta cortando al vidrio con la sierra, este proceso debe realizarse bajo abundante agua para refrigerar al corte tiene que llegar hasta el agujero como puede verse en la fotografía de arriba.

Una vez que se han terminado los procesos de agujereado y aserrado, se procede a limpiar a la plaquita de vidrio y luego a marcarle con el cortavidrios el otro borde del entrante como se muestra en la siguiente fotografía:



Marcado con el cortavidrios en el corte entrante de esquina tradicional

En la fotografía se puede apreciar el momento en el que se marca la plaquita de vidrio con el cortavidrios, el agua que se puede ver en la fotografía se encuentra en la cara de debajo de la plaquita.

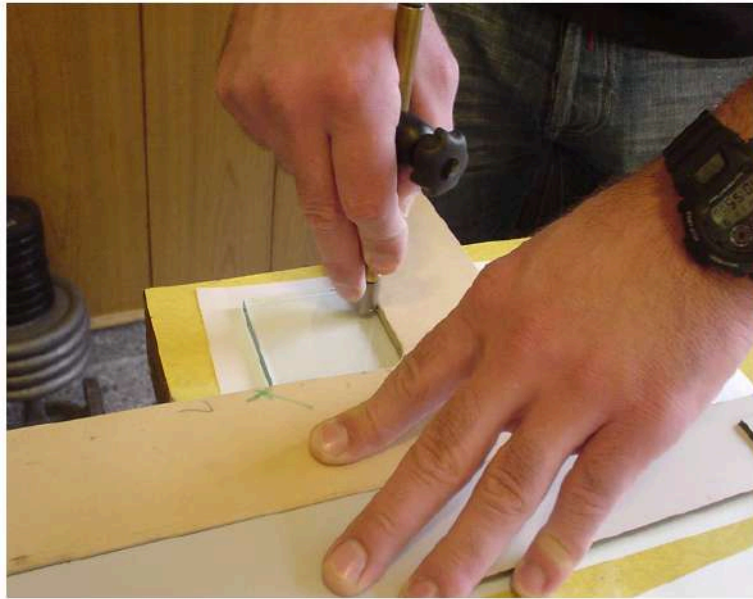
Luego de realizar el marcado se procede a quebrar a la plaquita como se muestra en la siguiente fotografía:



Quebrado para terminar el entrante de esquina mediante el proceso tradicional

En la fotografía se puede apreciar el proceso final de quebrado y también como queda la plaquita de vidrio una vez finalizado el proceso. Es fácil ver que posteriormente será necesario un arduo trabajo de pulido para dejar a la pieza en condiciones si esta va a estar a la vista. Este corte también es posible realizarlo si se hace el corte con la sierra desde ambos lados del entrante pero es más laborioso aún.

Seguidamente se mostrará otra técnica para realizar los entrantes de esquina con la que puede obtenerse un corte muy similar al anterior, seguidamente se muestra la disposición de las piezas para realizar el corte con plantilla y cortavidrios:



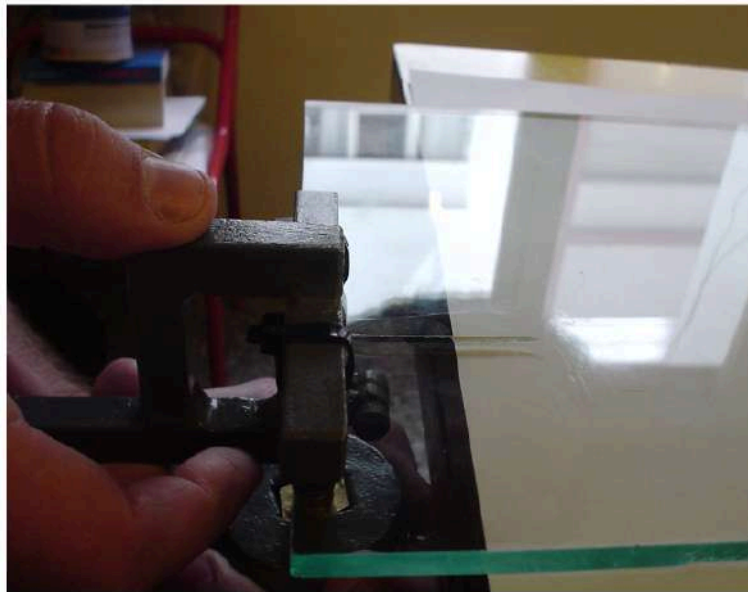
Disposicion de los elementos para realizar el corte entrante de esquina

En la fotografía se puede apreciar la escuadra que sostiene a la plantilla por la cual se desliza el cortavidrios. Para este corte se utilizo el cortavidrios lubricado Silverschnitt 2000 con rulina de corte M6 de 155° y una fuerza de marcado cercana a los 100 [N].

Para realizar este corte en primer lugar se debe limpiar al vidrio con alcohol isopropilico o isopropanol, luego posicionar correctamente los elementos, después de posicionar los elementos se debe simular el corte como se ha explicado en cortes anteriores y finalmente realizar el marcado.

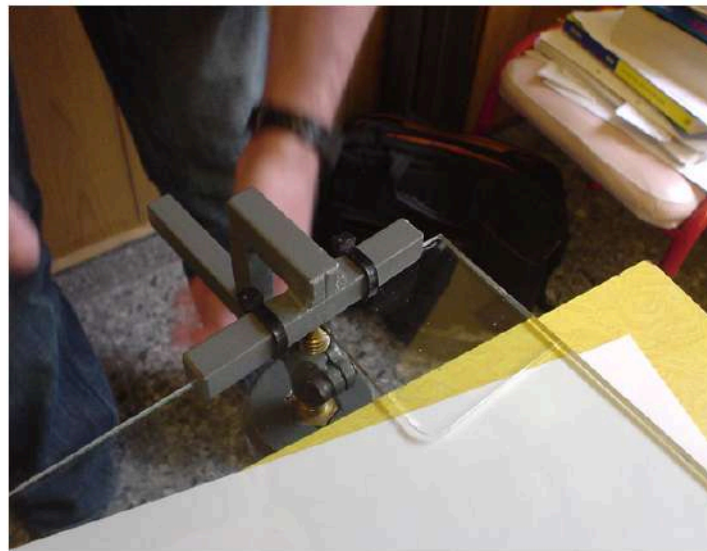
Una ves finalizado el proceso de marcado se procede a realizar la apertura del corte, para esto se utiliza la herramienta Abreschnitt 1. Para realizar la apertura del corte en primer lugar se debe limpiar ligeramente la estela de lubricante que ha quedado sobre la plaquita de vidrio, la limpieza del fluido de corte debe ser lo mas pobre posible como para que permita una buena visión en el momento de la apertura del corte pero debe quedar lo mas que se pueda de fluido de corte sobre la línea de corte par que cuando se realice la apertura del corte permita que este fluido capile dentro del corte y evite la regeneración del vidrio.

Luego de efectuar la limpieza del corte se posiciona a la herramienta Abreschnitt 1 como se muestra en la siguiente fotografía:



Primera apertura del corte entrante de esquina

En la fotografía se puede apreciar como va avanzando la fisura en la apertura del corte, esta se hace avanzar hasta que llega a la mitad de la curva, posteriormente se saca la herramienta de apertura de corte y se la sitúa en el otro borde de la plaquita de vidrio como se muestra en la siguiente fotografía:

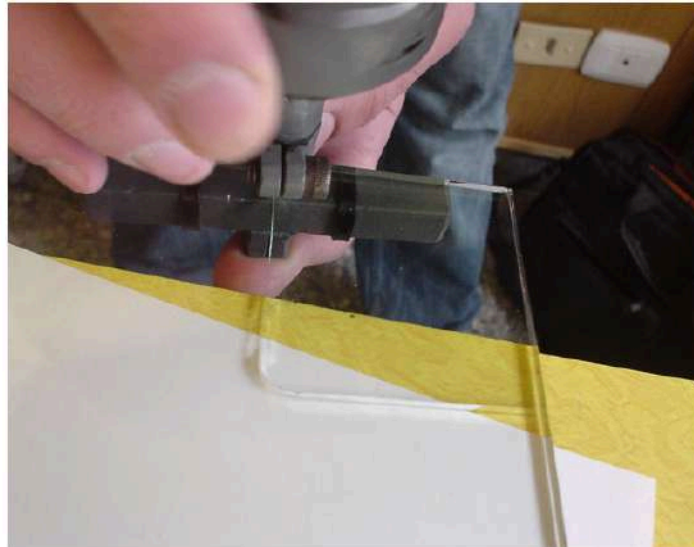


Segunda apertura del corte entrante de esquina

En la fotografía se puede ver la ubicación de la herramienta, en la fotografía se ve ya terminada la apertura del corte, en esta parte de la apertura del corte se comienza la apertura del corte en un tramo muy pequeño y se hace caminar la fisura a traves de la línea de marcado hasta que los extremos de las fisuras se unen en una sola.

En la fotografía de arriba se puede ver a la plaquita de vidrio cortada desde un solo lado, debido a que la fisura no ha traspasado totalmente a la plaquita de

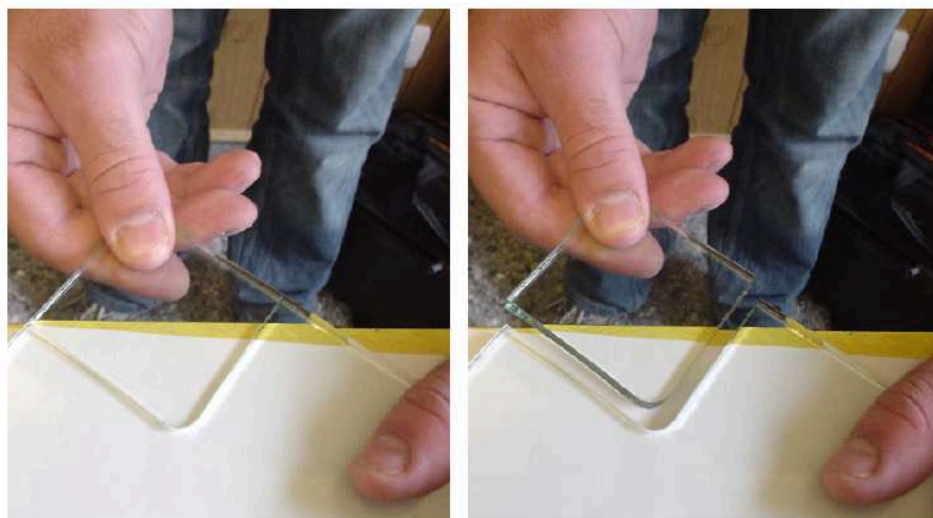
vidrio, la profundidad que se ha logrado es de aproximadamente del 90%, para terminar de realizar la fisura se utiliza la herramienta Abreschnitt 1 invertida, es decir que los puntos de presión 1 y 2 se encuentran en la cara de debajo de la plaquita de vidrio y el punto de presión 3 en la cara de arriba, esta disposición se muestra en la siguiente fotografía:



Apertura total del corte

El procedimiento de la apertura total invertida nuevamente se hace desde los dos bordes de la plaquita de vidrio, en la primera nuevamente hasta la mitad del radio de curvatura de la línea de corte y posteriormente desde el otro borde hasta terminar de abrir el corte.

Cuando se ha abierto el corte de ambos lados y de ambos bordes la plaquita de vidrio esta totalmente cortada y los pedazos de vidrio se separan con la mano simplemente tirando uno del otro como se muestra en la siguiente secuencia de fotografías:



Secuencia de la extraxion final en el corte entrante de esquina

En la fotografía de arriba se puede apreciar como quedan los pedazos de vidrio una vez finalizado el proceso de corte, los bordes de los pedazos de vidrio tienen un ángulo de 90° y son sumamente prolijos lo que da una idea clara de que en el proceso de pulido los costos de operación serán mucho menores que en el caso del procedimiento anterior. Otro factor para mencionar es el tiempo de ejecución, con este último procedimiento un mecánico con algo de práctica puede realizar este corte en un tiempo total de ejecución de 30 [seg].

Corte entrante de lado

Al igual que en el caso del corte entrante de esquina para este tipo de corte existen varios modos, de los cuales expondremos dos y además se expondrá una forma de realizar este corte en el caso de vidrio laminado (vidrio sándwich).

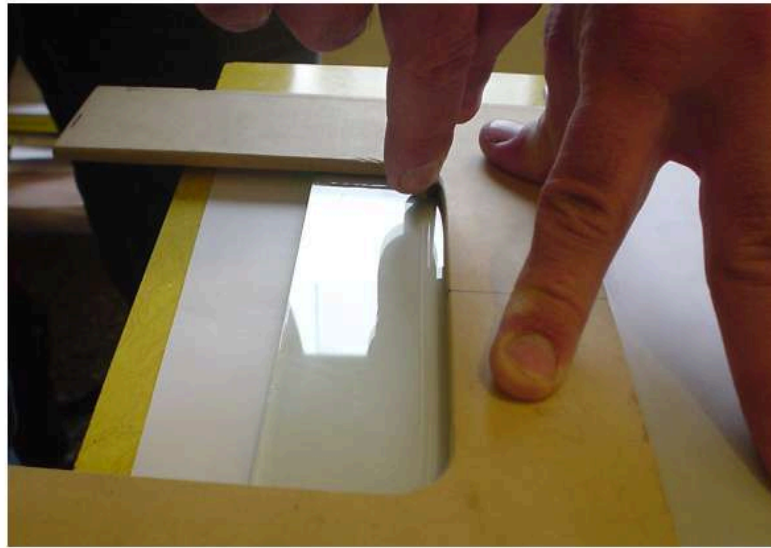
El primer modo que se mostrara es el denominado clásico, en el cual se realizan diversos procesos de agujereado, aserrado y posteriormente marcado y quebrado con el cortavidrios. Seguidamente se muestra una fotografía en donde se puede observar la disposición de los agujeros los cortes hechos con sierra y la ubicación de la escuadra para realizar el marcado con el cortavidrios:



Corte tradicional entrante de lado

En la fotografía de arriba se puede ver la ubicación de los agujeros y cortes con sierra, el marcado se efectúa con el cortavidrios a lo largo de donde esta ubicada la escuadra y posteriormente el vidrio se quiebra con una pinza en forma similar a la que se mostró en el caso del corte entrante de esquina, los resultados del corte son similares a los obtenidos en el caso del corte entrante de esquina teniendo que realizar un arduo trabajo de pulido en caso de que el pedazo de vidrio quede expuesto a la vista.

Otra forma de realizar un corte similar es con el marcado sobre plantilla, seguidamente se muestra una disposición de los elementos para realizar el marcado con el cortavidrios sobre la plantilla:

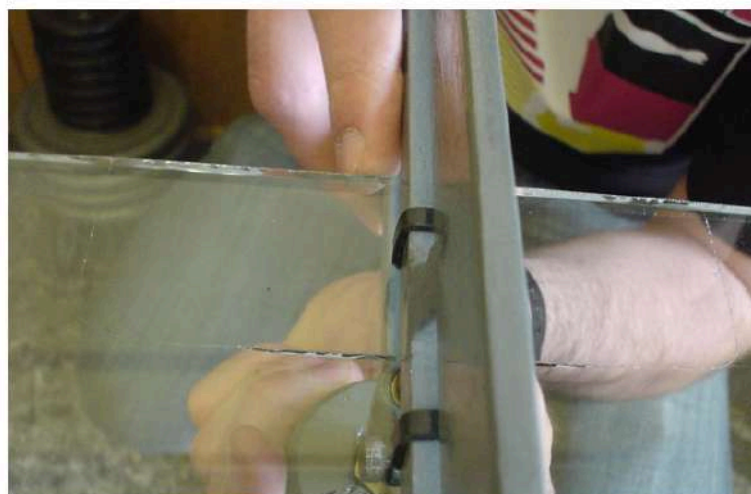


Disposicion de los elementos y marcado en el corte entrante de lado

En la fotografía de arriba se puede ver la disposición de plantilla, antes de ubicar los elementos la placa de vidrio debe limpiarse con alcohol isopropanol o isopropílico, luego una vez que se han ubicado los elementos para realizar el marcado del corte se realiza la simulación del corte como se explicó en el caso del corte entrante de esquina, el cortavidrios es el mismo que el utilizado en el corte entrante de esquina al igual que la regla y la fuerza de marcado.

Luego de realizar el marcado se limpia la estela de fluido de corte sobrante como se explicó en el caso del corte entrante de esquina y se procede a la apertura del corte con las herramientas abre cortes Abreschnitt 1 y Abreschnitt 2.

En primer lugar para realizar la apertura del corte se toma la herramienta Abreschnitt 2 y se la ubica en la placa de vidrio como se muestra en la siguiente fotografía:



Comienzo de la apertura del corte entrante de costado

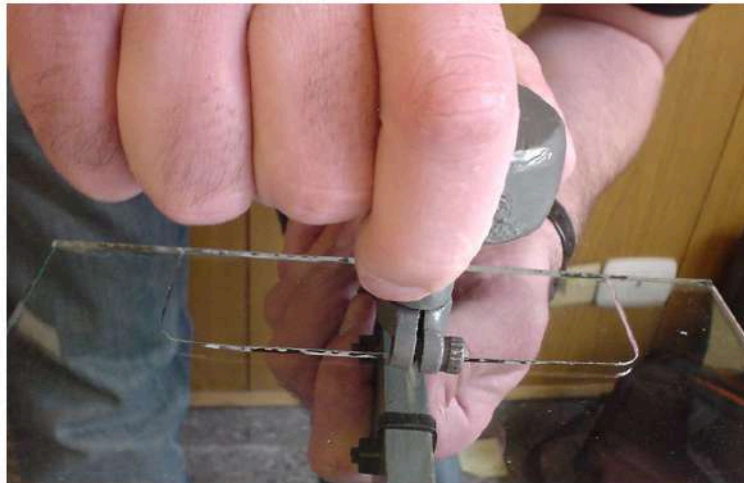
En la fotografía se puede apreciar la ubicación de la herramienta para realizar la apertura del corte sobre la mitad de la línea de corte dentro de la placa de vidrio, en la misma se puede ver el comienzo de la fisura luego la herramienta se corre cerca de uno de los extremos de la fisura y se hace continuar propagándose a la fisura hasta la mitad de la curvatura de la línea de corte, luego se procede a mover la herramienta de apertura hasta el otro extremo de la fisura original para hacer propagar a la fisura del otro extremo hasta la mitad de la otra curvatura de la línea de corte. Seguidamente se toma la herramienta de abrir cortes Abreschnitt 1 y se la sitúa en el borde de la placa de vidrio como se muestra en la próxima fotografía:



Comienso y propagacion de la fisura desde el borde de la placa de vidrio

En la fotografía anterior se puede apreciar la ubicación de la herramienta abre cortes Abreschnitt 1, esta herramienta se posiciona en el borde de la placa de vidrio y se hace comenzar la fisura del vidrio muy lentamente y luego se la hace avanzar hasta que se une con la otra fisura, este proceso se realiza en ambas líneas de corte que entran en la placa de vidrio, luego de esto la placa de vidrio esta totalmente cortada de un lado al igual que se explico en el caso del corte entrante de esquina.

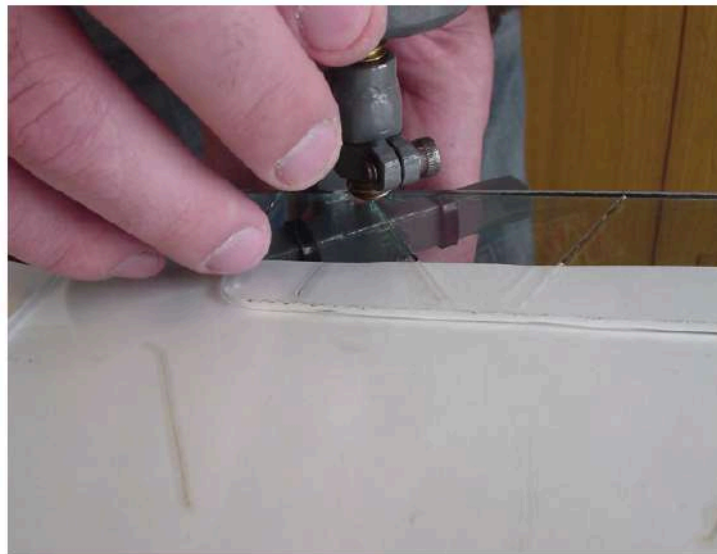
Una ves que el corte se termino de realizar de un lado, se toma nuevamente la herramienta abre cortes Abreschnitt 2 y se la sitúa con los puntos de presión en forma invertida como se muestra en la siguiente fotografía:



Comienzo de la fisuración completa del corte

En la fotografía de arriba se puede ver a la placa de vidrio totalmente abierta de un lado y a la herramienta de abrir cortes posicionada en forma invertida para terminar de fisurar a la placa de vidrio, ya que como se explicó anteriormente al fisurar a un vidrio desde un solo lado la fisura llega a penetrar cerca de un 90% dentro de la placa, esto se realiza de modo análogo a lo explicado para abrir el corte inicialmente haciendo propagar la fisura hasta la mitad de las curvas de la línea de corte con la herramienta Abreschnitt 2 y posteriormente con la herramienta Abreschnitt 1 desde los bordes también en forma invertida.

Una vez que se ha figurado la placa en un 100% a través de todo su espesor no es posible extraer simplemente el pedazo ya que el pedazo está encajonado, para ello se practican dos cortes auxiliares como se muestra en la siguiente fotografía:

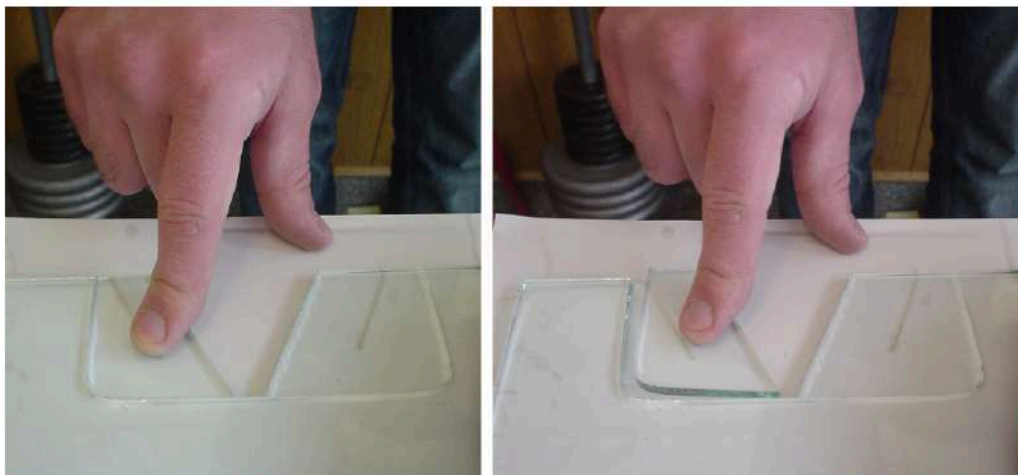


Finalización de la apertura de los cortes auxiliares

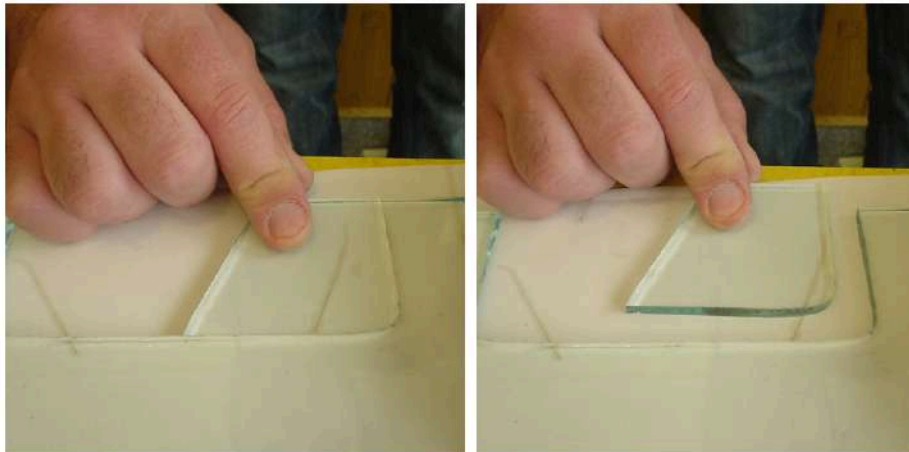
En la fotografía se puede ver en el momento que se esta terminando de realizar la apertura de los cortes auxiliares, en este caso también hay que hacer que las fisuras se propaguen un 100%, una vez terminada de realizarse la apertura es posible extraer los pedazos porque el corte auxiliar realizado no se encuentra encajonado, seguidamente se muestra una secuencia de fotografías de la extracción de los pedazos de vidrio:



Extraccion del pedazo central



Secuencia de la extraccion de uno de los pedacitos laterales



Secuencia de extracción del otro pedacito lateral

En la fotografía de la extracción del pedazo central se puede observar la disposición de la herramienta Abreschnitt 1, la cual se dispuso así para poder ir con vidrio y todo contra la mesa con lo cual se le da un pequeño golpe a la placa de vidrio de tracción que termina por abrir todos los cortes, al golpear contra la mesa automáticamente se desprende este pedazo central y los otros dos pedacitos se extraen con mucha facilidad. Como puede verse en la última fotografía en este corte también se logra un canto de borde de 90° con una terminación muy prolija con lo cual el proceso de pulido se disminuye que al realizar el entrante de lado del modo tradicional.

Este tipo de corte entrante de lado también es posible de realizar en vidrio laminado (vidrio sandwich), esto es posible mediante el procedimiento que se detalla a continuación.

En primer lugar se debe realizar todos los procesos de limpieza de ambas caras del vidrio como se explicó para el caso del vidrio monolítico recién, luego se efectúa el posicionado de la plantilla sobre uno de las caras del vidrio y se lo marca con el cortavidrios, posteriormente se realiza el marcado con el cortavidrios y se procede a la apertura total del corte como en el caso del vidrio monolítico abriendo en un 100% el corte en el vidrio que se marco del vidrio laminado. Luego una vez que se abrió el 100% de los cortes se da vuelta en vidrio y se posiciona la plantilla en el otro vidrio del vidrio laminado de manera que ambas líneas de corte coincidan y se marca el corte en el segundo vidrio y posteriormente se procede a la apertura del corte, una vez que los dos vidrios del vidrio laminado están en un 100% abiertos y sus líneas de corte son coincidentes, se procede a realizar los cortes auxiliares al igual que con el vidrio monolítico, estos cortes auxiliares se practican en ambos vidrios del vidrio laminado y deben ser coincidentes. Luego se realiza la apertura de los cortes auxiliares, los cuales deben estar abiertos en un 100%.

Una vez que se ha realizado la apertura al 100% de todos los cortes se sitúa la herramienta Abreschnitt 1 en la forma en que se situó en la fotografía de extracción del pedazo central y se golpea contra la mesa para que terminen de abrir todos los cortes, a excepción de lo ocurrido con el vidrio monolítico en este caso el pedazo central va a quedar adherido al conjunto debido a la película plástica de PVB que une a los dos vidrios en el laminado, esto se soluciona derritiendo al plástico con una pistola de aire caliente, la cual debe estar calibrada para que expulse aire cerca de los 300 °C, seguidamente se muestra una fotografía de

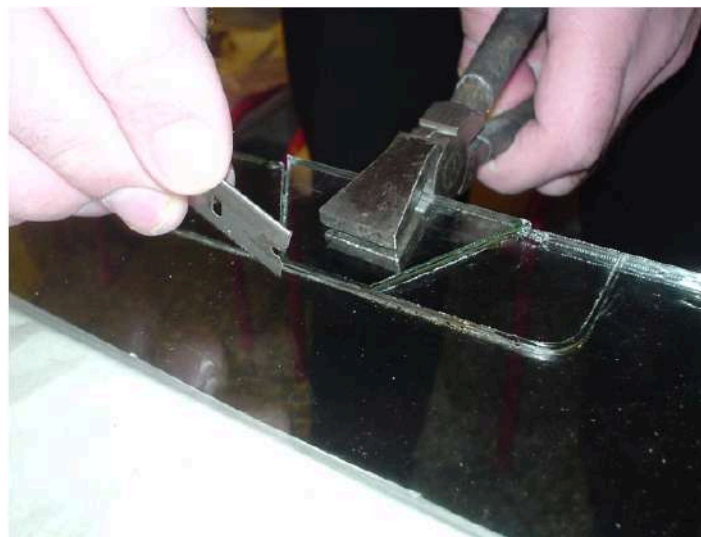
cuando se estaba llevando a cabo el proceso de calentado para la extracción del pedazo central:



Proceso de calentado para la extracción del pedazo central

En la fotografía se puede observar la distancia a la que se está aplicando el chorro de aire, la pistola debe circular rápidamente y debe calentarse ligeramente los alrededores de vidrio del pedazo central para evitar intensos gradientes de temperatura que puedan originar una rotura térmica de la placa de vidrio, el calentamiento debe efectuarse de esta manera de ambas caras del vidrio.

Luego de efectuar el calentamiento con la pistola de aire inmediatamente debe tomarse una pinza y una hoja de afeitar para poder cortar el plástico del PVB como se muestra en la siguiente fotografía:



Proceso de extracción del pedazo central con pinza y hoja de afeitar

Como puede verse en la fotografía al ablandarse el PVB este se suda y es posible extraer unos 3 [mm] al pedazo central, luego con la hoja de afeitar se corta al plástico para liberar completamente al pedazo central del resto de los pedazos de vidrio, de la misma manera se opera calentando con la pistola de aire a los pedazos de costado luego separándolas ligeramente y finalmente cortando con la hoja de afeitar el PVB para liberarlos de la placa de vidrio definitivamente.

De esta manera es posible obtener un entrante de lado en un vidrio laminado, este es un proceso delicado y el mecánico tiene que tener mucha práctica para realizarlo con éxito.

Como aclaración de este corte conviene decir que al tirar del vidrio para cortar con la hoja de afeitar el plástico de PVB no debe hacerse un esfuerzo exagerado si el plástico todavía no tiene la temperatura adecuada ya que de hacerlo se barrería parte del plástico dentro del vidrio quitándole en esa zona la cualidad de laminado y también provocando un aspecto feo en el borde del entrante.

Muy importante es que luego de practicar un corte de esta clase no se intente cortar al vidrio por un par de horas, ya que se producirían un motón de pequeñas fisuras a lo largo del marcado con el cortavidrios que saldrían para todas partes echando a perder la pieza.

Limitaciones de las herramientas de corte

Las herramientas para abrir cortes como la Abreschnitt 2 o el abrecortes Silverschnitt BO 706.0 están limitadas en profundidad a la que pueden acceder, si bien por ejemplo pueden realizar cortes en etapas, es decir por ejemplo hacer un corte entrante de lado en dos o más pasos como para llegar a realizar el corte que se pudiese llegar a desear, esto traería una pérdida mayor de vidrio y de tiempo de ejecución y en el caso de que no se podría cortar del todo el vidrio, como por ejemplo que sea necesario, ya no se podrían utilizar dichas herramientas. Por otro lado una herramienta como la pistola abrecortes Silverschnitt BO 710.0 o la BO 710.1 causan bordes irregulares. Tanto las pistolas abrecortes como los abrecortes necesitan que las placas de vidrio estén en el aire, esto implica cierto riesgo para el operario y mayor sería este en el caso de realizar la apertura del corte utilizando un martillo.

NACIMIENTO DE LA IDEA.

Abreschnitt Master 1.0

(Parte 4)

Reconocimiento de la problemática y determinación de la posible solución y análisis de las diferentes alternativas tecnológicas.

Considerando las limitaciones de las herramientas de corte de vidrio existentes se quiere construir una herramienta para poder superar varios de estos obstáculos, como se expone en otro capítulo de este trabajo la configuración de tres puntos de presión sobre la laca de vidrio previamente marcada con el cortavidrios es una alternativa de corte altamente atractiva ya que permite una alta creatividad en los cortes a un costo económico muy bajo, por lo tanto poder lograr una disposición de tres puntos de presión en donde se puedan superar las limitaciones de las herramientas que se menciono en el apartado anterior de este trabajo, expandiría las posibilidades de trabajo eliminando el problema de golpear al vidrio o tener que cortarlo con algún elemento complejo como el corro de agua a alta presión. Así mismo una configuración de tres puntos que pueda utilizarse en un margen más amplio podría traer economía de material y también un marco de trabajo mas seguro.

Una de las posibilidades seria construir una herramienta como la Abreschnitt 2 mucho mas robusta, pero para que esta pueda poner en forma precisa las fuerzas es necesario una herramienta exageradamente grande para poder lograr un poco mas de penetración en la placa de vidrio con la cual la misma se tornaría inmanejable y por lo tanto obsoleta.

Otra posibilidad seria la de realizar un puente donde se coloquen los puntos de presión en la parte superior, algo semejante al Abreschnittmesser con la variante de que se pueda indistintamente manejar de la parte superior o inferior los puntos de presión 1 y 2 o 3, esto tiene desventajas en que para realizar un puente a escalas útiles este tendría que ser muy grande, esto es fácil de observar en el Abreschnittmesser donde solo se pueden introducir pequeños vidrios para realizar ensayos. En el caso de que se pusiera cabezales móviles se tendría un problema con el posicionamiento para que los puntos queden en los lugares necesarios para que pudieran producir una apertura de corte satisfactoria.

Analizando la problemática se deduce que es necesario generar algún medio que genere en forma precisa y controlada la fuerza para que actúa en los puntos de presión 1, 2 y 3, y además es necesario algo que mantenga en forma precisa y controlada la ubicación de dichos puntos de presión.

De las cuestiones de arriba se desprende que la fuerza de atracción se puede generar mediante atracción magnética, con lo que queda por determinar la forma de posicionamiento, ya que esta puede tener distintas alternativas, debido a que al ser de atracción magnética la fuerza que ejerce la presión en la placa de vidrio no se tendrá el problema de deformación con lo que es posible utilizar una U como en el caso de la Abreschnitt 2 o la Abrecorte Silverschnitt BO 706.0, siendo dicha U ligera pudiéndose utilizar aluminio para su construcción por ejemplo, o es posible utilizar un puente ligero como en el caso del Abreschnittmesser.

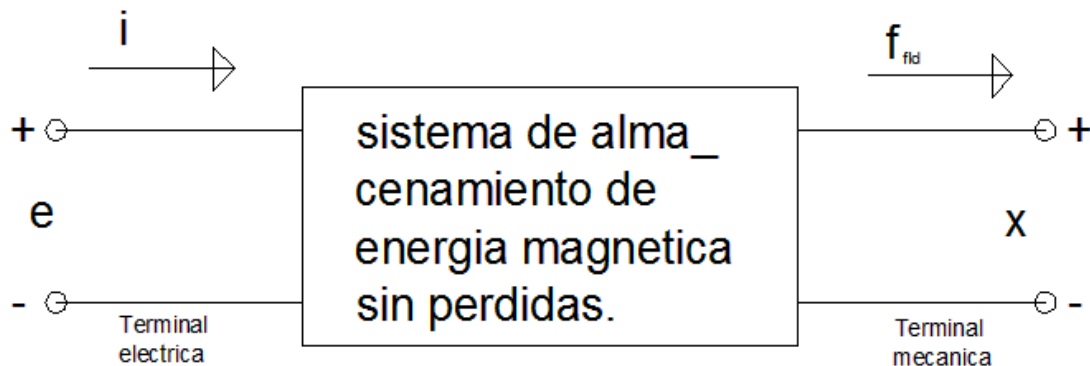
Por otro lado se desprende que al utilizar fuerza de atracción magnética para realizar la apertura del corte en la placa de vidrio, esta misma fuerza se puede utilizar para posicionar un cabezal que provoque la apertura del corte con lo que no seria necesario la utilización de ningún puente ni tampoco ninguna U de posicionamiento dando la ventaja de que la parte superior de la mesa de trabajo se encontraría totalmente libre y evitando la incomodidad de posicionar una U de posicionamiento.

Con los datos así analizados se determina realizar el diseño de una base en donde se encuentren alojadas las bobinas y un cabezal de material magnético, donde tanto como en la base y en el cabezal se encuentren los puntos de presión 1,2 y 3 pudiendo utilizarlos indistintamente.

Análisis de la energía electromagnética y determinación de la fuerza de atracción

Las Técnicas de cálculo de las fuerzas detalladas y localizadas que actúan sobre los materiales magnéticos son extremadamente complejas y requieren de un conocimiento detallado de la distribución del campo a través de la estructura. Afortunadamente la mayor parte de los dispositivos de conversión de energía electromecánica se fabrica con estructuras rígidas, no deformables. En esos dispositivos la fuerza o par neto es lo importante, y los detalles de la distribución de las fuerzas localizadas son de interés secundario. Por ejemplo, en un motor diseñado en forma adecuada, el par neto de aceleración que actúa sobre el rotor determina la característica del motor; las fuerzas que lo acompañan, que actúan para aplastar o hacer ovalo al rotor macizo, no juegan un papel de importancia y en general ni siquiera se calculan.

Se han desarrollado varias técnicas para calcular las fuerzas netas que interesan en la conversión de la energía electromecánica. La técnica que se desarrolla se conoce como el MÉTODO DE LA ENERGÍA, y se basa en el principio de la CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA. La base para este método para este método se puede comprender haciendo referencia al la figura 3-3a; en la cual se indica en forma esquemática un dispositivo electromecánico de conversión de energía como un sistema de almacenamiento de energía magnética con dos terminales y sin pérdidas.



Esquema de un dispositivo de conversión electromecánica de la energía del campo magnético

Figura 3-3a

La terminal eléctrica tiene las variables e , voltaje, e i , corriente, y la terminal mecánica tiene las variables f_{fid} , fuerza, y x , posición. Este tipo de representación es válido en casos en los que el mecanismo de pérdidas se puede separar del de almacenamiento de energía. En estos casos las pérdidas eléctricas, como las ohmicas, se pueden representar como elementos externos conectados a las terminales eléctricas, y las pérdidas mecánicas, como la fricción, se pueden representar como externas a las terminales mecánicas. La figura 3-3b muestra un ejemplo de esos sistemas: un dispositivo sencillo productor de fuerza con una espira sencilla que forma la Terminal eléctrica, y un embolo móvil, que funciona como la Terminal mecánica.

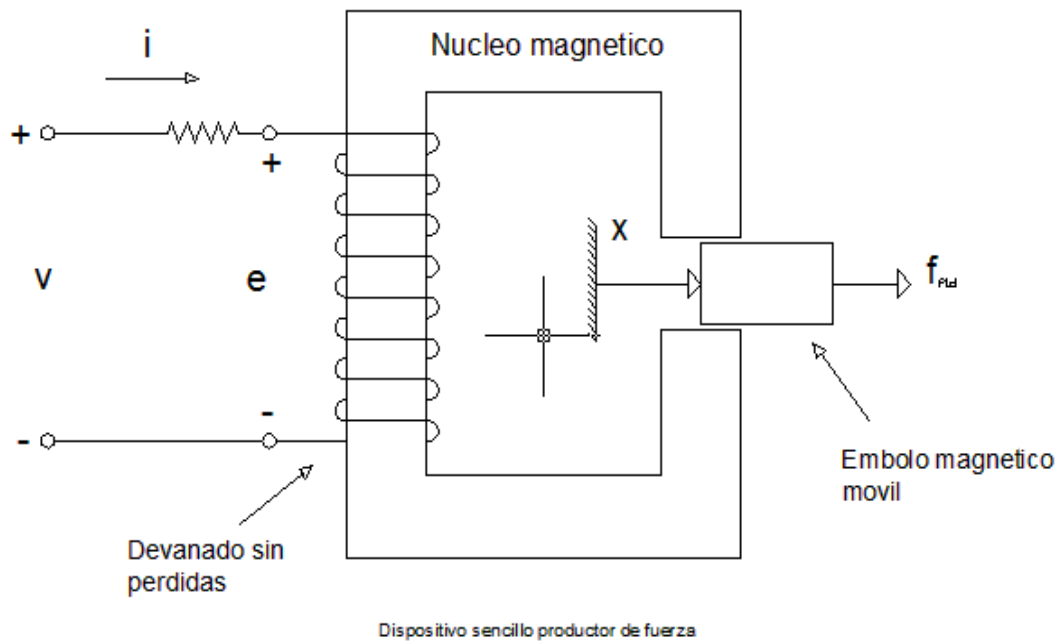


Figura 3-3b

La interacción entre las terminales eléctricas y mecánicas, es decir, la conversión de la energía electromecánica, se lleva a cabo a través del medio de la energía magnética almacenada. Como el sistema de almacenamiento de energía es sin pérdidas, es cosa sencilla el planteo de que la razón de cambio de W_{fld} , la energía almacenada en el campo magnético, es igual a la potencia eléctrica de entrada menos la potencia mecánica de salida del sistema de almacenamiento de energía:

$$\frac{dW_{fld}}{dt} = ei - f_{mec} \frac{dx}{dt} \quad (3-5)$$

Empleando la ecuación 1-21

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (1-21)$$

y multiplicando la ecuación 3-5 por dt, se obtiene:

$$dW_{fd} = id\lambda - f_{fd} dx \quad (3-6)$$

La ecuación 3-6 permite despejar la fuerza simplemente como función del flujo λ y de la posición de la Terminal mecánica x . Este se debe a la capacidad de separa las pérdidas del problema físico, lo que resulta en un sistema de almacenamiento de energía sin pérdidas como en la figura 3-3a.

Las ecuaciones 3-5 y 3-6 forman la base para el método de la energía. Esta técnica es muy poderosa para calcular las fuerzas y pares en casos complejo de sistemas electromecánicos de conversión de energía.

Las fuerzas se producen por fenómenos físicos, como la ley de la fuerza de Lorente sobre elementos portadores de corriente, o bien la interacción de campos magnéticos con los dipolos del material magnético.

Balance de energía

El principio de la conservación de la energía establece que esta no se crea ni se destruye, solo cambia de forma.

Para sistemas aislados con fronteras claramente identificables, el flujo neto de energía hacia el sistema, cruzando su frontera, es igual a la razón de cambio de la energía almacenada en el sistema.

Aunque este resultado, que es un enunciado de la primera ley de la termodinámica, es bastante general, se aplicara a los sistemas electromecánicos, cuyo mecanismo principal de almacenamiento de energía es en forma de campos magnéticos, en estos sistemas se puede definir a la transferencia de energía de la siguiente manera:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{de entrada} \\ \text{de fuentes} \\ \text{eléctricas} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{energía} \\ \text{mecánica} \\ \text{de salida} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{aumento en} \\ \text{energía} \\ \text{almacenada en} \\ \text{campo magnético} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{energía} \\ \text{convertida} \\ \text{en calor} \end{array} \right]$$

ecuación 3-7

En estos sistemas la conversión de energía en calor se lleva a cabo mediante mecanismos tales como el calentamiento ohmico debido al paso de la corriente en los devanados de las terminales eléctricas, y a la fricción mecánica

debida al movimiento de las componentes del sistema que forman las terminales mecánicas.

En general es posible separar matemáticamente esos mecanismos de pérdida del mecanismo de almacenamiento de energía. En este caso el dispositivo se puede representar como un sistema de almacenamiento de energía magnética sin pérdidas con terminales eléctricas y mecánicas, como se muestra en la figura 3-4. Entonces se pueden representar las pérdidas mediante elementos externos conectados a estas terminales, como resistencias a las terminales eléctricas, y amortiguadores mecánicos a las terminales mecánicas. La figura 3-4 es muy general en el sentido de que no hay límite de número de terminales eléctricas o mecánicas. Para este tipo de sistema, el campo magnético sirve como el medio de acoplamiento entre las terminales eléctricas o mecánicas.

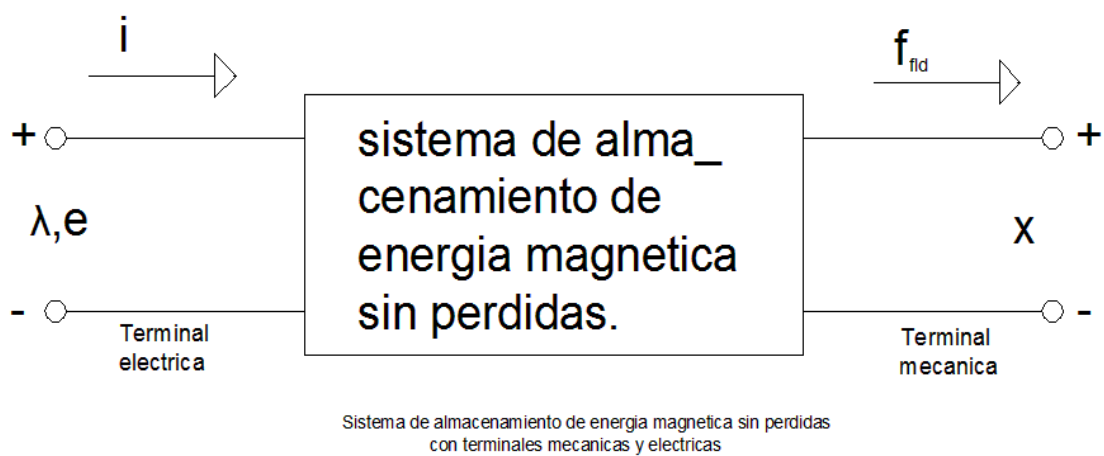


Figura 3-4

La capacidad de identificar un sistema de almacenamiento de energía sin pérdidas en la esencia del método de la energía. Es importante reconocer que esto se lleva a cabo matemáticamente como parte del proceso de modelado. Es natural que no sea posible quitar la resistencia de los devanados, o la fricción de los rodamientos. En lugar de ellos estamos haciendo uso del hecho de que un modelo en el cual se hace lo anterior, es una representación válida del sistema físico.

Para el sistema de almacenamiento de energía magnética sin pérdidas, de la figura 3-4, la ecuación 3-7 se puede escribir:

$$dW_{elec} = dW_{mec} + dW_{fid} \quad (3-8)$$

Donde

- dW_{elec} = diferencial de energía eléctrica de entrada
- dW_{mec} = diferencial de energía mecánica de salida
- dW_{fid} = diferencial de variación en la energía magnética almacenada

en un dt ,

$$dW_{elec} = eiddt$$

Aquí e es el voltaje inducido en las terminales eléctricas por la variación de la energía magnética almacenada. Es a través de este voltaje de reacción que el circuito eléctrico externo suministra potencia al campo magnético de acoplamiento, y por lo tanto a las terminales mecánicas de salida. Así, el proceso básico de conversión de energía implica al campo de acoplamiento y su acción y reacción sobre los sistemas eléctrico y mecánico.

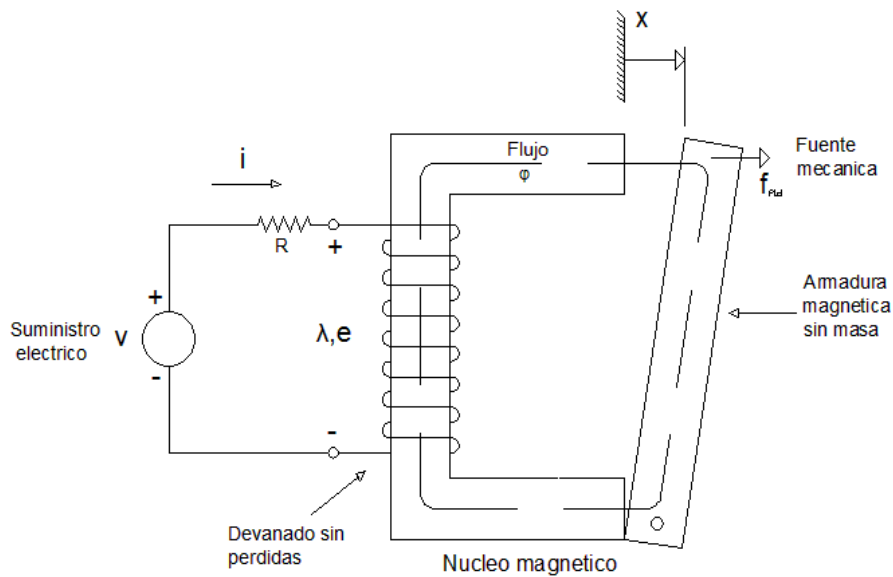
Combinando las ecuaciones :

$$\boxed{dW_{elec} = eiddt = dW_{mec} + dW_{fld}} \quad (3-10)$$

Esta ecuación junto con la ley de Faraday del voltaje inducido, forman la base del método de la energía.

Energía fuerza en sistemas de campos Magnéticos con excitación única

Los circuitos magnéticos tienen entrehierros entre los miembros estacionarios y móviles, en los cuales se almacena bastante energía en el campo magnético. Este campo funciona como medio de conversión de energía, y su energía es el recipiente entre los sistemas eléctrico y mecánico.



Esquema de un relevador electromagnetico. Figura 5

Se considera el relevador electromagnético que se muestra en forma esquemática en la figura 5. La resistencia de la bobina de excitación se muestra como resistencia externa R , y las variables de la Terminal mecánica se indican como una fuerza f_{mec} producida por el campo magnético que se dirige del relevador al sistema mecánico externo y a un desplazamiento x ; se pueden incluir a las pérdidas mecánicas en forma de elementos externos conectados a la Terminal mecánica. Igualmente la armadura móvil aparece como carente de masa; su masa representa el almacenamiento de energía mecánica y se puede incluir como una masa externa conectada a la Terminal mecánica. Como resultado de ello, el núcleo y la armadura magnética constituyen un sistema magnético sin pérdidas, como el de la figura 3-4.

De la ley de Faraday se puede despejar al voltaje inducido "e" en términos de los encadenamientos de flujo λ

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3-11)$$

Y por lo tanto,

$$dW_{elec} = i d\lambda \quad (3-12)$$

El circuito magnético de la figura 5 se puede describir mediante una inductancia L , que es función de la geometría de la estructura magnética y de la permeabilidad del material magnético. Los dispositivos electromagnéticos de conversión de energía contienen entrehierros en sus circuitos magnéticos para separar las partes móviles. En la mayor parte de esos casos la reluctancia del entrehierro es mucho mayor que la del material magnético. Por ello el almacenamiento principal de energía ocurre en el entrehierro, y las propiedades del circuito magnético se determina por las dimensiones del entrehierro.

Debido a la simplicidad de las relaciones resultantes, las no linealidades magnéticas y las pérdidas de núcleo se omiten con frecuencia en el análisis de los dispositivos prácticos. Los resultados finales de ese análisis aproximado se pueden, de ser necesario, corregir para tomar en cuenta los efectos de los factores omitidos mediante métodos semiempíricos. En consecuencia, se llevan a cabo los análisis bajo el supuesto de que el flujo y la fuerza magnetomotriz son directamente proporcionales, como en el aire, para el circuito magnético completo. Por lo tanto los encadenamientos de flujo λ y la corriente i se consideran en relación lineal mediante un factor que solo depende de la geometría y por lo tanto de la posición x de la armadura.

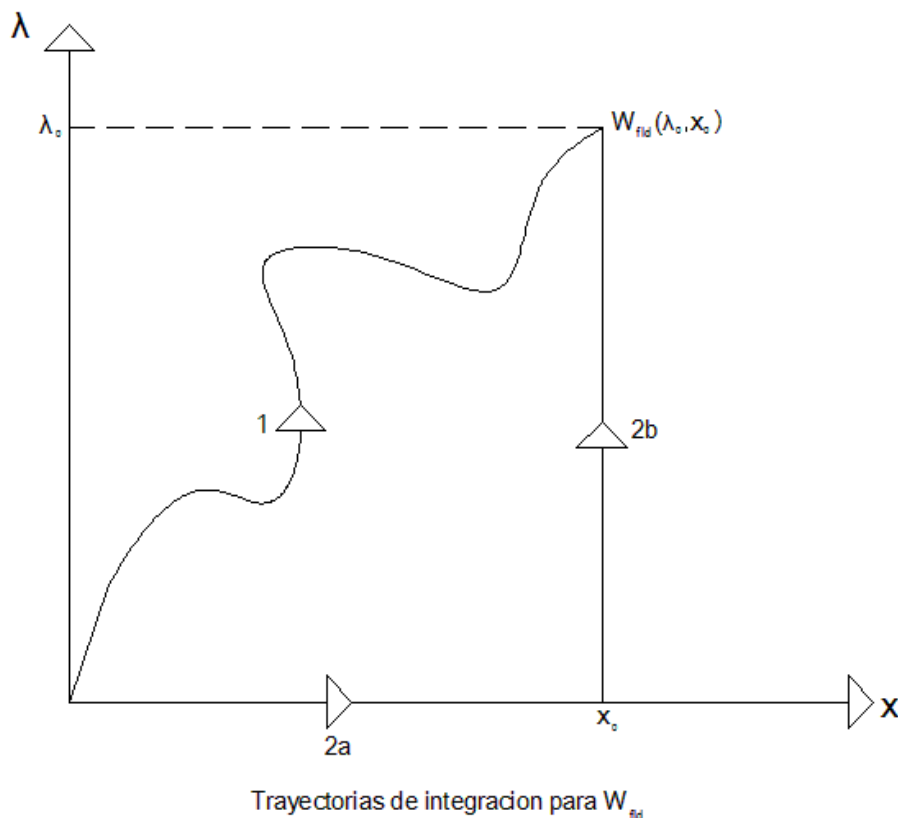


Figura 3-6

$$\lambda = L(x)i \quad (3-13)$$

En la cual se ha indicado la dependencia explícita entre L en x.

Como la fuerza magnética f_{fld} se ha definido como actuando desde el relevador sobre el sistema mecánico externo, y dW_{mec} se define como la salida de energía mecánica del relevador, se puede escribir

$$dW_{mec} = f_{fld} dx \quad (3-14)$$

Luego usando las ecuaciones 3-12 y 3-14 se puede escribir a la ecuación 3-8 en la forma

$$dW_{fld} = id\lambda - f_{fld} dx \quad (3-15)$$

Como el sistema de almacenamiento de energía magnética es sin pérdidas es un SISTEMA CONSERVATIVO, y el valor de W_{fld} está especificado únicamente por los valores de λ y x . Así, W_{fld} es el mismo INDEPENDIENTE DE CÓMO ALCANZAN SUS VALORES FINALES λ y x . Para calcular W_{fld} en el punto (λ_0, x_0) , la trayectoria es general y es difícil de integrar a menos se conozcan en forma explícita tanto i como f_{fld} como función de λ y de x . Sin embargo otra trayectoria de el mismo resultado y es mucho más fácil de integrar.

$$W_{fld}(\lambda_0, x_0) = \int_{trayectoria\ 2a} dW_{fld} + \int_{trayectoria\ 2b} dW_{fld} \quad (3-16)$$

Así de la ecuación 3-15, la ecuación 3-16 se reduce a

$$W_{fld}(\lambda_0, x_0) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda, x_0) d\lambda \quad (3-17)$$

Para un sistema lineal en el cual λ sea proporcional a i , la ecuación 3-17 da:

$$W_{fld}(\lambda_0, x_0) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda, x_0) d\lambda = \int_0^{\lambda_0} \frac{\lambda}{L(x_0)} d\lambda = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0^2}{L(x_0)} \quad (3-18)$$

La energía también se puede expresar en términos de la densidad de energía del campo magnético integrada sobre el volumen V del campo magnético:

$$W_{fld} = \int_V \left(\int_0^{B_0} H dB \right) dV \quad (3-19)$$

Para un medio magnético con permeabilidad constante ($B=\mu H$) esto se reduce a

$$W_{fld} = \int_V \left(\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \right) dV \quad (3-20)$$

Determinación de la fuerza magnética, coenergía

La energía magnética almacenada W_{fld} se determina de manera única mediante λ y x . El sistema de almacenamiento de energía magnética, sin pérdidas, es un sistema conservativo, y W_{fld} es una función de estado que se determina únicamente por los valores de las variables de estado independientes λ y x . Esto se puede mostrar de forma explícita formulando la ecuación 3-15 como sigue:

$$dW_{fld}(\lambda, x) = i d\lambda - f_{fld} dx \quad (3-21)$$

Para cualquier función $F(x_1, x_2)$, la diferencial total de F con respecto a las dos variables independientes de estado, x_1 y x_2 , se puede escribir:

$$dF(x_1, x_2) = \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} dx_2 \quad (3-22)$$

Como la ecuación 3-22 es válida para cualquier función de estado F , es válida para W_{fid} ; por lo tanto:

$$dW_{fid}(\lambda, x) = \frac{\partial W_{fid}}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial W_{fid}}{\partial x} dx \quad (3-23)$$

Como λ y x son variables independientes, las ecuaciones 3-21 y 3-23 deben ser iguales para todos los valores de $d\lambda$ y dx , y por lo tanto:

$$i = \frac{\partial W_{fid}(\lambda, x)}{\partial \lambda} \quad (3-24)$$

En la cual se toma la derivada parcial manteniendo constante a x y en este caso λ permanece constante al tomar la derivada parcial.

$$f_{fid} = - \frac{\partial W_{fid}(\lambda, x)}{\partial x} \quad (3-25)$$

Una vez conocido W_{fid} como función de λ y de x , se debe utilizar la ecuación 3-24 para despejar $i(\lambda, x)$.

Se puede utilizar la ecuación 3-25 para despejar a la fuerza mecánica $f_{fid}(\lambda, x)$. la derivada parcial de la ecuación 3-25 se toma manteniendo constantes los encadenamientos de flujo λ . Esto se hace con facilidad siempre que W_{fid} se conozca como función de λ y de x . es un requisito puramente matemático y no tiene que ver con el hecho de que λ se mantenga fijo en el dispositivo real.

Se puede usar una función de estado que no sea la energía, como por ejemplo la coenergía, para obtener la fuerza en forma directa como función de la corriente. La selección de la función de estado es solo cuestión de comodidad; ambas dan el mismo resultado pero una u otra pueden tener un tratamiento analítico más simple, dependiendo del resultado que se desee y de la descripción inicial del sistema que se está analizando.

La coenergía W'_{fid} se define como una función de i y de x , de tal forma que:

$$W'_{fld}(i, x) = i\lambda - W_{fld}(\lambda, x) \quad (3-26)$$

La transformación se lleva a cabo mediante el diferencial de $i\lambda$:

$$d(i\lambda) = i d\lambda + \lambda di \quad (3-27)$$

y el diferencial de $dW_{fld}(\lambda, x)$ de la ecuación 3-21. De la ecuación 3-26,

$$dW'_{fld}(i, x) = d(i\lambda) - dW_{fld}(\lambda, x) \quad (3-28)$$

Al sustituir las ecuaciones 3-21 y 3-27 en la ecuación 3-28, se obtiene

$$dW'_{fld}(i, x) = \lambda di + f_{fld} dx \quad (3-29)$$

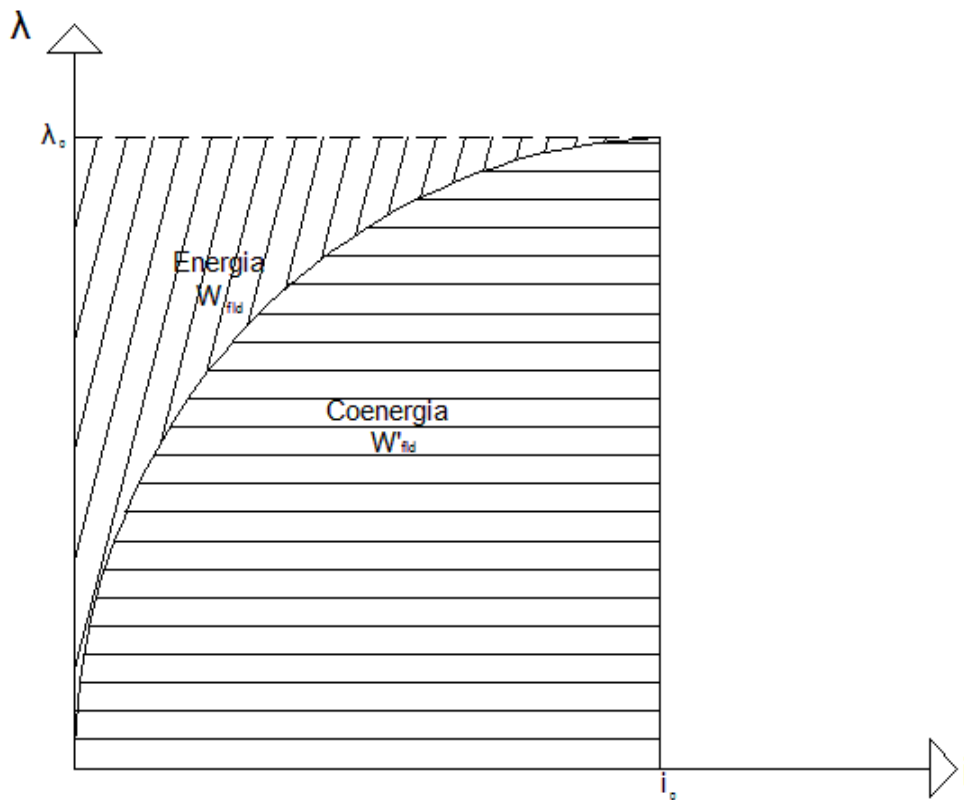
la coenergía $W'_{fld}(i, x)$ es una función de estado de las dos variables independientes i y x . Por lo tanto su diferencial se puede expresar como:

$$\boxed{dW'_{fld}(i, x) = \frac{\partial W'_{fld}}{\partial i} di + \frac{\partial W'_{fld}}{\partial x} dx} \quad (3-30)$$

Las ecuaciones 3-29 y 3-30 deben ser iguales para todos los valores de i y de x ; así,

$$\boxed{x = \frac{\partial W'_{fld}(i, x)}{\partial i}} \quad (3-31)$$

$$f_{fld} = \frac{\partial W'_{fld}(i, x)}{\partial x} \quad (3-32)$$



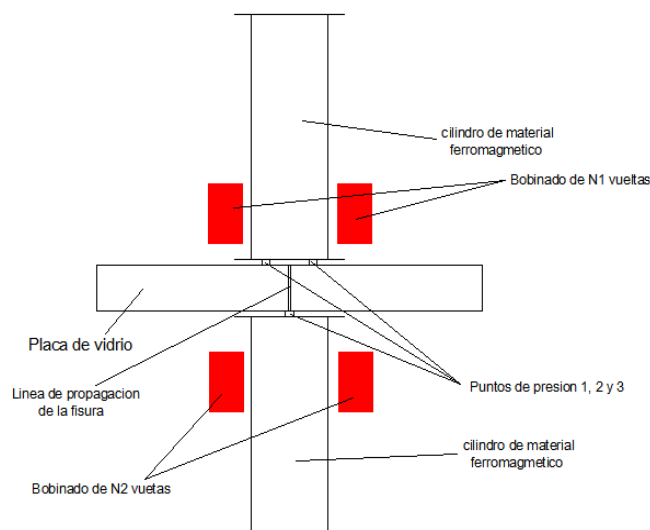
Interpretación grafica de la energía y la coenergía para un sistema con excitación única

Figura 3-8

Diseño del aparato de simulación y justificación de su forma frente a las demás alternativas

Teniendo en cuenta los puntos anteriores de este trabajo, se decide la utilización de electroimanes para la generación de la fuerza en los puntos de presión 1, 2 y 3 para que produzcan la apertura del corte en la placa de vidrio.

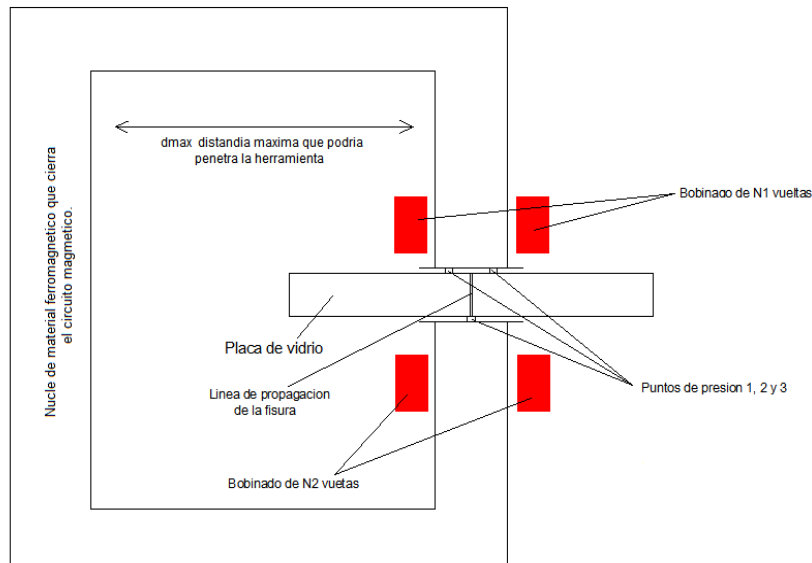
La primera forma de electroimanes analizada constaba de cilindros de hierro, a los cuales se les enrollaba las bobinas de alambre de cobre, estas serian posicionadas sobre un mismo eje con una estructura de aluminio cada uno en una cara de la placa de vidrio, al hacer circular corriente por las bobinas conectadas en serie se provocaría una fuerza de atracción o repulsión la cual depende de como estén hechos y conectados los bobinados. Considerando que se conecten los bobinados para que efectúen fuerzas de atracción esta seria aprovechada para poner sobre los electroimanes los puntos de presión 1, 2 y 3 para poder generar sobre la placa de vidrio el estado tensional deseado y poder realizar la apertura del corte. En la siguiente figura se puede apreciar un esquema de esta disposición:



Primer diseño de electroimanes para realizar la apertura del corte

En este primer diseño se observó que el campo magnético pasaría a través de los núcleos de material ferromagnético, atravesando a la placa de vidrio y cerrándose a través del aire alrededor de los electroimanes. De inmediato se identificó que este sería un diseño poco eficiente, ya que la energía electromagnética generada por los electroimanes se almacenaría en mayor parte por los alrededores de los electroimanes mientras que lo deseado es que esta se almacene en el gap entre los electroimanes en el cual se encuentra la placa de vidrio.

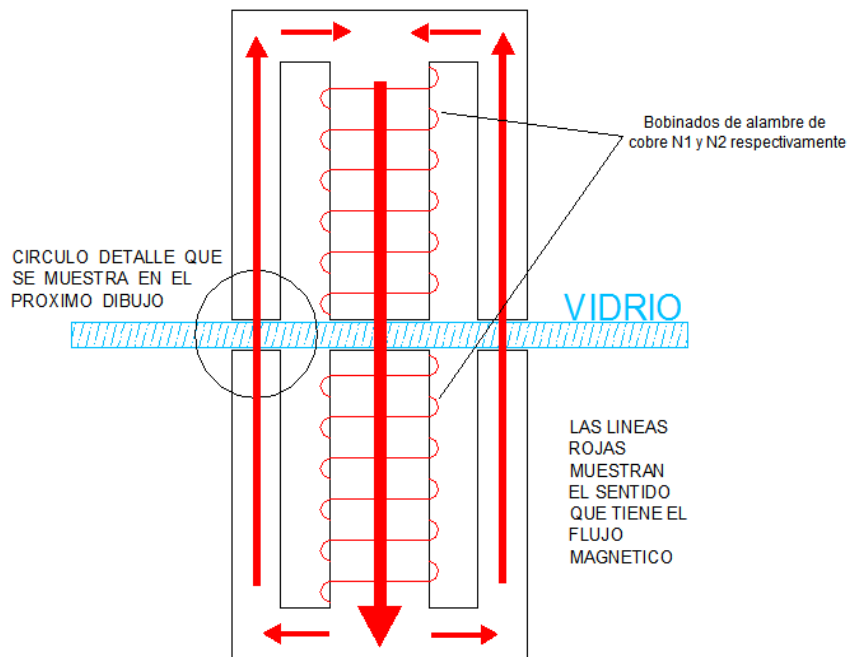
Este diseño se mejoró cerrando el circuito magnético con material ferromagnético entre los electroimanes, de manera que ahora la energía electromagnética se almacene en el gap donde se encuentra la placa de vidrio. Seguidamente se muestra un esquema con esta disposición:



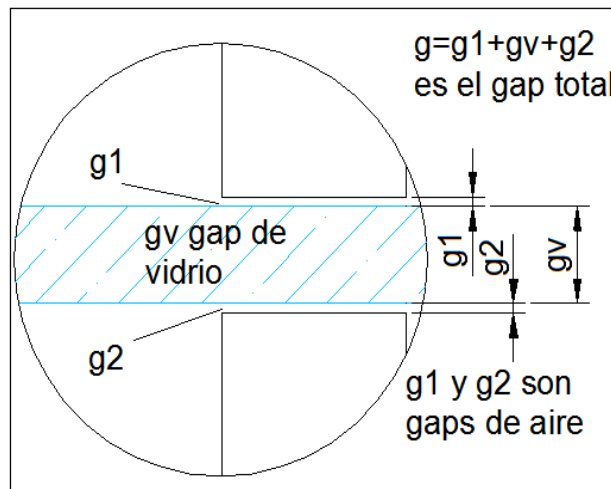
Segundo diseño de electroimanes para realizar la apertura de cortes

En esta alternativa se pueden lograr fuerzas de atracción magnética mayores sin tener que utilizar tanta potencia como en el caso anterior, este diseño debería estar articulado para permitir la libre atracción entre los electroimanes. La dificultad que presenta este diseño es que la distancia d_{max} esta limitada por la cantidad de material ferromagnético que se le podría agregar al dispositivo, ya que un tamaño excesivo del núcleo lo tornaría dificultoso para poder manipularlo y además incrementaría la inercia mecánica del sistema lo que podría volverlo obsoleto para la función para la cual se pretende construirlo. En caso de querer utilizar una distancia d_{max} pequeña, esta no tendría sentido debido a que para este caso se pueden construir un sistema mucho mas sencillo que permita aplicar la fuerza en los puntos de presión 1, 2 y 3 con la intensidad y precisión necesaria.

Para superar los obstáculos de diseño antes mencionados se recurrió a un nuevo diseño, el cual es mostrado en el siguiente dibujo:



Tercer diseño de electroiman para realizar la apertura del corte

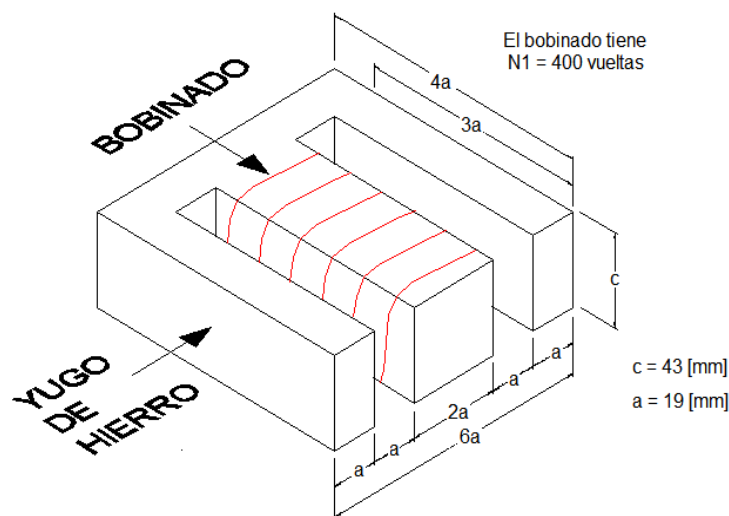


Detalle de la imagen anterior

En este tercer diseño se puede observar como las líneas del campo magnético, encuentran un camino muy reducido, con una pequeña cantidad de material ferromagnético. El detalle del diseño muestra unos pequeños gaps de aire estos son ocasionados por los puntos de presión que se encuentran entre los electroimanes y los vidrios, uno de los gaps es ocasionados por los puntos de presión 1 y 2 mientras que el otro gap es accionado por el punto de presión 3, pudiendo indistintamente causar el gap $g1$ o $g2$ dependiendo de la situación de trabajo que se este efectuando.

Otro motivo por el cual este diseño es atractivo es debido a que esta disposición tipo E se puede lograr con laminaciones de chapas para transformadores estándar, con lo cual se facilita mucho la construcción de un prototipo para poder realizar ensayos y comparar los valores calculados y tener una real estimación de los mismos.

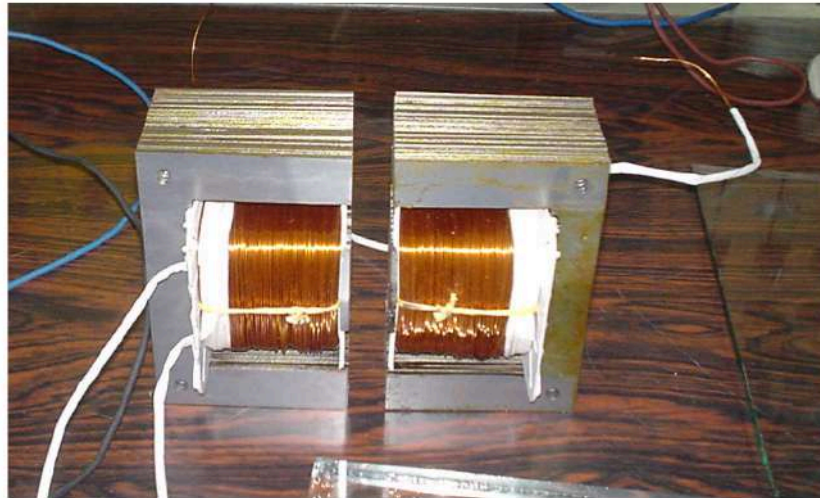
Se realizó el dimensionado del tercer diseño basados en las características dimensionales de un transformador quemado que se pudo reciclar para posteriormente construir un prototipo. En las siguiente imagen se puede observar uno de los electroimanes, ambos son exactamente iguales:



Grafica tridimensional del electroimán del tercer diseño

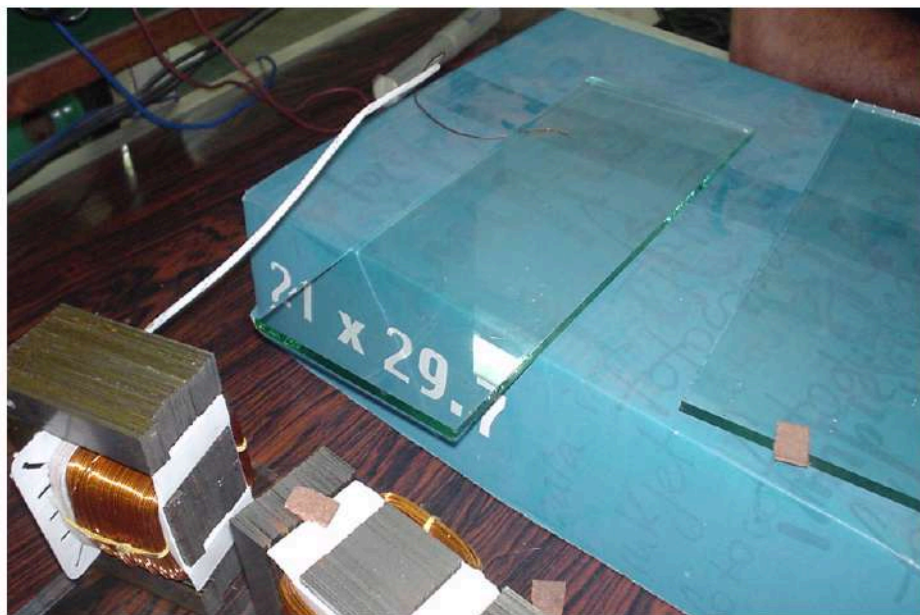
En el próximo punto de este trabajo se utilizarán las dimensiones de este prototipo para realizar la simulación y análisis dinámico del prototipo en el entorno de Simulink de Matlab.

Seguidamente se muestra una fotografía de los electroimanes fabricados según el diseño tres:



Electroimanes fabricados según el diseño tres

La próxima fotografía muestra la primera apertura de corte que se realizó en la historia en una placa de vidrio a mediados del mes de diciembre del año 2005 en el laboratorio de máquinas eléctricas de la facultad de ingeniería de la UNMDP:

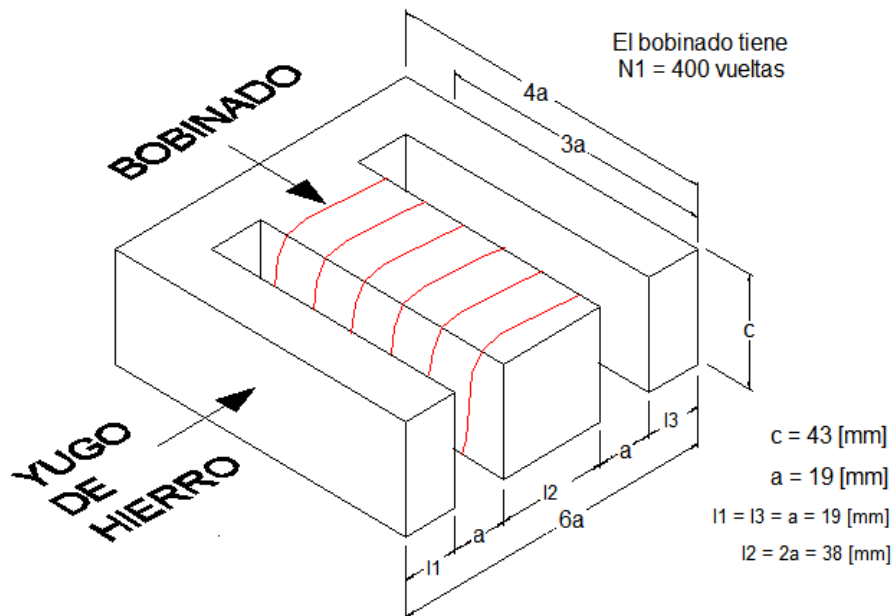


Primera apertura de corte de una placa de vidrio con energía eletromagnética.

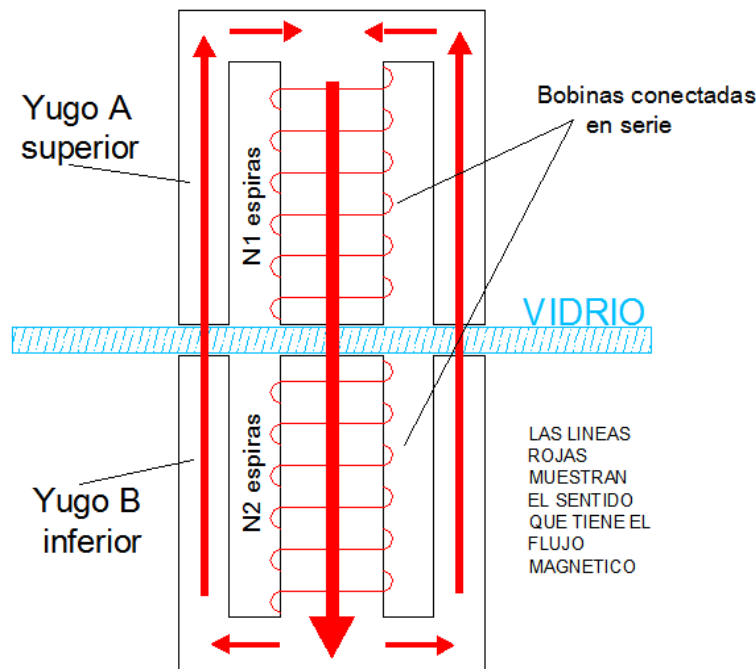
En la fotografía se pueden observar unos pequeños pedazos rectangulares de corcho con goma que fueron utilizados como puntos de presión 1, 2 y 3.

Análisis dinámico en Simulink del prototipo

En esta parte del trabajo se realizara la simulación del electroimán diseñado en el apartado anterior del trabajo. Primeramente se presentan dos dibujos donde se pueden ver las dimensiones y parámetros utilizados en este punto del trabajo, sin embargo pueden verse las figuras del apartado anterior si se requiere de mayor detalle.



Esquema de uno de los yugos de simulación



Esquema de los yugos y la placa de vidrio

Entre el vidrio y cada uno de los yugos hay un gap de aire de 1mm de espesor, el mismo se debe a que entre los yugos y el vidrio se colocaran en distintas posiciones unos cilindritos de teflón de 6mm de diámetro y 1 mm de espesor que se utilizarán para provocar tensiones en las placas de vidrio en el esquema denominado de los tres puntos, que en otra parte del trabajo ya se analizó. En esta sección se calcularán y analizarán las fuerzas que se obtienen al hacer circular corriente eléctrica por las bobinas mediante la simulación con MATLAB.

Para este análisis se considerará infinita la permeabilidad magnética del hierro, mientras que la del aire y la del vidrio se las considerará iguales a la permeabilidad magnética del vacío.

Las dimensiones transversales de los yugos se denominarán "I1,I2,I3" respectivamente de derecha a izquierda, al ancho "c" y el yugo superior "A" y el inferior "B", los diferentes espesores de vidrio serán denominados genéricamente como "g_v" y los gaps de aire como "g₁" y "g₂" para el gap superior y el inferior respectivamente a la suma de las tres gaps la denominamos "g" (hay un g correspondiente a cada espesor de vidrio), las dimensiones de I1, I2 y I3 son de 19 mm, 38 mm y 19 mm respectivamente y puede observarse en la figura que están separados por a = 19 mm.

Las bobinas que se encuentran en los yugos están conectadas en serie formando una sola bobina.

Seguidamente se detallarán los distintos parámetros del conjunto:

$$g_1 = g_2 = 1 \text{ mm}$$

$$g_v = \text{espesor del vidrio en [mm]}$$

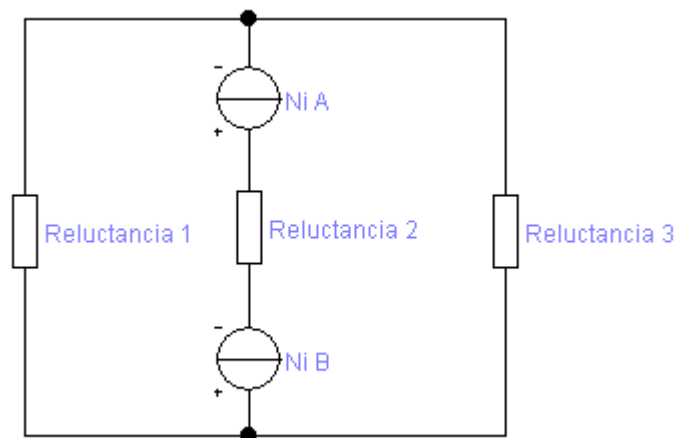
$$g = g_1 + g_2 + g_v$$

$$\mu_{\text{aire}} \cong \mu_{\text{vidrio}} \cong \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}$$

$g_v = [2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19, 25]$ [mm] son los distintos espesores de vidrio

$$N_A = N_B = 400 \text{ [vueltas]; } N = N_A + N_B = 800 \text{ [vueltas]}$$

Del primer grafico donde se muestra la disposición de los yugos, los gaps y las bobinas se extrae el siguiente circuito magnético:



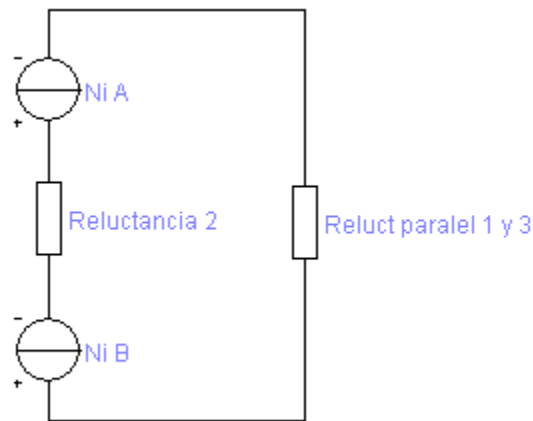
Circuito magnético del sistema yugos y placa de vidrio

Donde las reluctancias corresponden a las de los gaps, ya que se considera la reluctancia del hierro infinita. A continuación se muestran los cálculos de las reluctancias:

$$R_2 = \frac{g}{\mu_0 l_2 c}$$

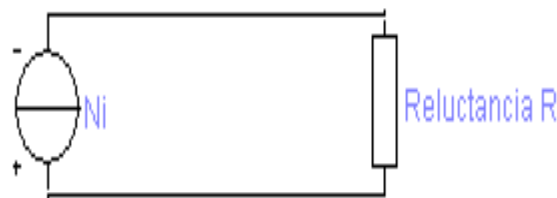
$$R_1 = R_3 = 2R_2$$

En el siguiente circuito se muestra la reducción de la rama en paralelo del circuito magnético, logrando una sola rama en serie:



Primera reducción del circuito magnético

Finalmente se muestra como se logra una sola fuente de fuerza magnetomotriz equivalente y una sola reluctancia equivalente para calcular el flujo magnético que circula por la columna central del yugo es decir la columna 2, desde ya por cada columna lateral va a circular la mitad de flujo magnético que el que circula por la columna central, ya que por las columnas laterales el flujo magnético tiene distinto sentido de circulación de flujo que la central y además debido a la simetría del equipo es evidente que tenía que ser de esta manera:



Reduccion total del circuito magnetico

$$R = R_2 + R_1 // R_3 = R_1$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{Ni}{R_1}$$

$$\phi = \frac{\mu_0 l_c}{[(g_1 + g_3) + g_{\text{vidrio}}]} Ni$$

$$\lambda = N\phi$$

$$L = \frac{d\lambda}{di} = \frac{\lambda}{i} = \frac{N^2 \mu_0 l_1 c}{[(g_1 + g_3) + g_{\text{vidrio}}]}$$

Luego $e = L di/dt + i dL/dt$; la potencia en los terminales de un devanado de un circuito magnético es una medida de la razón del flujo de energía al circuito a través de ese devanado en particular.

$P = i \cdot e = i d\lambda/dt \Rightarrow$ que el cambio de energía magnética almacenada ΔW en un circuito magnético, en el intervalo de tiempo es:

$$\Delta W = \int_{i_1}^{i_2} P dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda = \frac{1}{2L} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)$$

$$\Rightarrow W = \frac{1}{2L} \lambda^2 = \frac{L}{2} i^2$$

En este caso como se considero una relación lineal con el campo H y el flujo magnético puede calcularse la fuerza de atracción derivando la energía magnética almacenada con respecto a la posición:

$$W = \frac{L}{2} i^2 = \frac{N^2 \mu_0 l_1 c}{2g} i^2$$

$$F = \frac{dW}{dg} = \frac{-N^2 \mu_0 l_1 c}{2 * [(g_1 + g_3) + g_{\text{vidrio}}]^2} i^2$$

En este caso la fuerza dio con signo negativo lo cual esta bien ya que la fuerza es de atracción y por lo tanto se encuentra en sentido opuesto al avance o sea la dirección.

Luego de realizar las cuentas para los parámetros del circuito la fuerza queda expresada como una constante para cada espesor de vidrio por la corriente al cuadrado en cuyo caso la corriente hay que expresarla en Ampere y el resultado obtenido de la fuerza es en Newton.

También la densidad de flujo magnético puede ser expresada también de la misma forma con una constante para cada tipo de espesor de vidrio por la corriente, en este caso la corriente se expresa en Ampere y la densidad de flujo es obtenida en Tesla.

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{\phi}{c * l_2} = \frac{N \mu_0}{2[(g_1 + g_3) + g_{\text{vidrio}}]} i$$

A continuación se muestra el archivo-m que permite graficar y calcular los distintos valores de corriente magnetizante, de flujo, densidad de flujo y fuerza magnética de atracción entre yugos en función de la corriente magnetizante y de los distintos espesores:

```
%en el siguiente archivo se cargan y calculan los valores
%para efectuar la simulación en Matlab
%de la atracción de las masas de hierro del proyecto.
g1=1; %en [mm]
g2=1; %en [mm]
gv=[2,3,4,5,6,8,10,12,15,19,25];
g=g1+g2+gv;
l1=19; %en [mm]
l3=l1;
l2=2*l1;
c=43; %en [mm]
Na=400; %en vueltas
Nb=Na;
N=Na+Nb;
mu=4*pi*0.0000001;
L=N*N*mu*l1*c./g;
im=[0:0.001:10];
plot(g,L)
v=g-2;
fi2=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(1);
fi3=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(2);
fi4=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(3);
fi5=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(4);
fi6=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(5);
fi8=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(6);
fi10=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(7);
fi12=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(8);
fi15=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(9);
fi19=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(10);
fi25=N*im.*mu*l1*c*0.001./g(11);
B2=fi2./(l2*c)*1000000;
B3=fi3./(l2*c)*1000000;
B4=fi4./(l2*c)*1000000;
B5=fi5./(l2*c)*1000000;
B6=fi6./(l2*c)*1000000;
B8=fi8./(l2*c)*1000000;
B10=fi10./(l2*c)*1000000;
B12=fi12./(l2*c)*1000000;
B15=fi15./(l2*c)*1000000;
B19=fi19./(l2*c)*1000000;
B25=fi25./(l2*c)*1000000;
F2=N*N*mu*l1*c*im.*im./(2*g(1)*g(1));
F3=N*N*mu*l1*c*im.*im./(2*g(2)*g(2));
```

```
F4=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(3)*g(3));
F5=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(4)*g(4));
F6=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(5)*g(5));
F8=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(6)*g(6));
F10=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(7)*g(7));
F12=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(8)*g(8));
F15=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(9)*g(9));
F19=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(10)*g(10));
F25=N*N*mu*I1*c*im.*im./(2*g(11)*g(11));
```

```
%zona de graficos
```

```
%para el caso de los flujos y fuerzas
%se graficaran para 6,10 y 15 mm en función de la
%corriente por ser los de mayor importancia
```

```
plot(gv,L);hold
title('Grafico de la inductancia del circuito magnético en función del
espesor del vidrio');
xlabel('Espesor del vidrio en [mm]');
ylabel('Inductancia del circuito en [H]');
pause;
```

```
plot(im,fi6);hold
xlabel('Corriente de magnetización en [A]');
ylabel('Flujo magnético en [Wb]');
title('Flujo magnético en func de la corriente magn para vidrio de 6
mm');
pause;
```

```
plot(im,fi10);hold
title('Flujo magnético en func de la corriente magn para vidrio de 10
mm');
ylabel('Flujo magnético en [Wb]');
xlabel('Corriente de magnetización en [A]');
pause;
```

```
plot(im,B6);hold
ylabel('Densidad de flujo magnético en [T]');
xlabel('Corriente de magnetización en [A]');
title('Densidad de flujo magnético en func de la corriente magn para
vidrio de 6 mm');
pause;
```

```
plot(im,B10);hold
title('Densidad de flujo magnético en func de la corriente magn para
vidrio de 10 mm');
xlabel('Corriente de magnetización en [A]');
ylabel('Densidad de flujo magnético en [T]');
```

pause

```
plot(im,B15);hold
title('Densidad de flujo magnético en func de la corriente magn para
vidrio de 15 mm');
ylabel('Densidad de flujo magnético en [T]');
xlabel('Corriente de magmetizacion en [A]');
```

```
plot(im,F6);hold
xlabel('Corriente de magmetizacion en [A]');
ylabel('Fuerza magnética de atracción en [N]');
title('Fuerza de atracción magnética en func de la corriente magn para
vidrio de 6 mm');
pause;
```

```
plot(im,F10);hold
title('Fuerza de atracción magnética en func de la corriente magn para
vidrio de 10 mm');
ylabel('Fuerza magnética de atracción en [N]');
xlabel('Corriente de magmetizacion en [A]');
pause;
```

```
plot(im,F15);hold
xlabel('Corriente de magmetizacion en [A]');
ylabel('Fuerza magnética de atracción en [N]');
title('Fuerza de atracción magnética en func de la corriente magn para
vidrio de 15 mm');
pause;
```

```
plot(im,F2);hold
plot(im,F3);
plot(im,F4);
plot(im,F5);
plot(im,F6);
ylabel('Fuerza magnética de atracción en [N]');
xlabel('Corriente de magmetizacion en [A]');
title('Fuerza de atracción magnética para vidrio de 2,3,4,5 y 6 [mm] de
espesor');
pause;
```

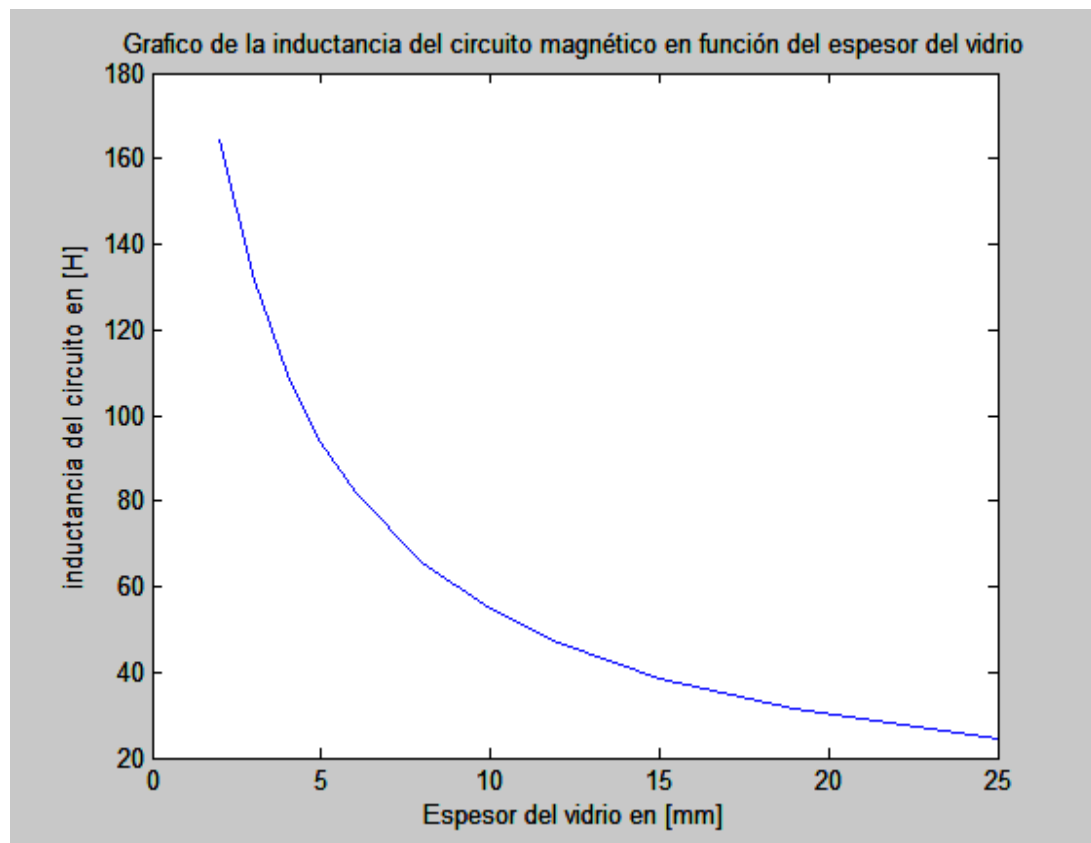
```
plot(im,F8);hold
plot(im,F10);
plot(im,F12);
plot(im,F15);
plot(im,F19);
plot(im,F25);
title('Fuerza de atracción magnética para vidrio de 8,10,12,15,19 y 25
[mm] de espesor');
xlabel('Corriente de magmetizacion en [A]');
```



```
ylabel('Fuerza magnética de atracción en [N]');  
pause;
```

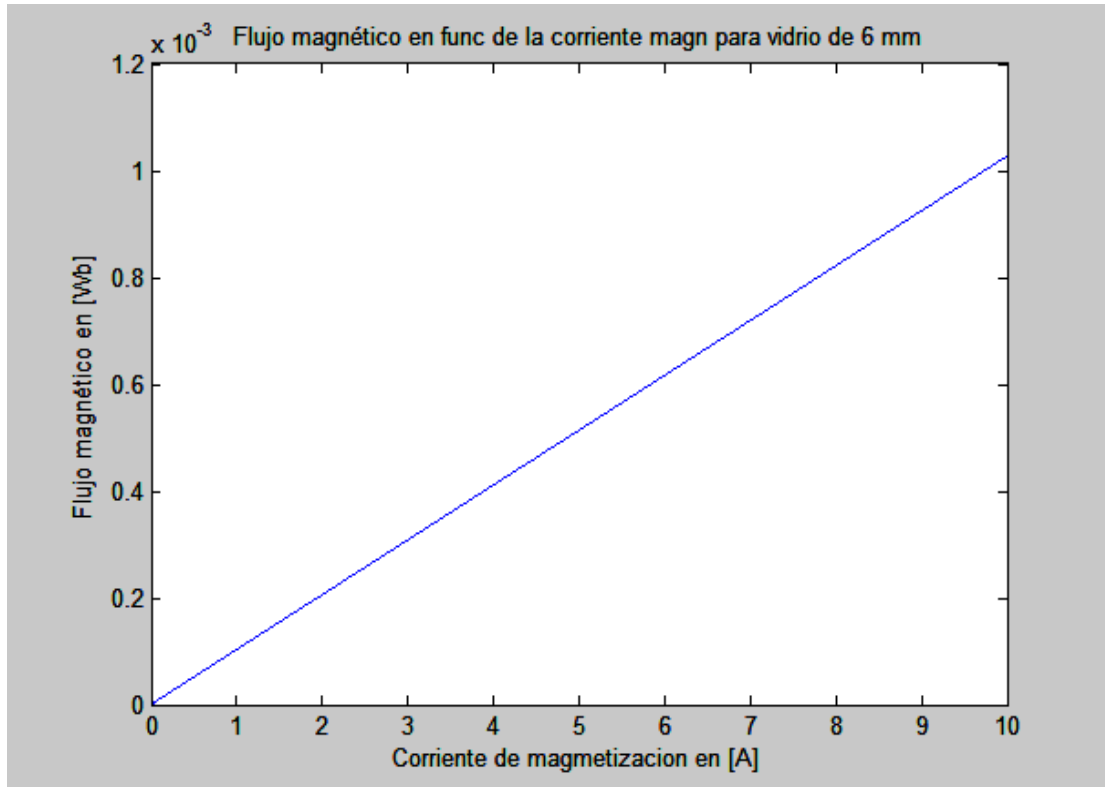
luego se muestran los gráficos obtenidos con el archivo-m recién mostrado, no se han expuesto todos los gráficos, ya que no tendría mucho sentido, y en caso de necesitar un gráfico en particular, rápidamente se lo podría obtener con el archivo-m, ya que en él están cargados todos los posibles datos. Por este motivo se han hecho las graficas para los espesores mas relevantes en lo que al dispositivo respecta, ya que por ejemplo querer hacer un corte por este mecanismo a un vidrio de menos de 5 mm no tiene sentido e incluso traería mas dificultades que soluciones en ese caso.

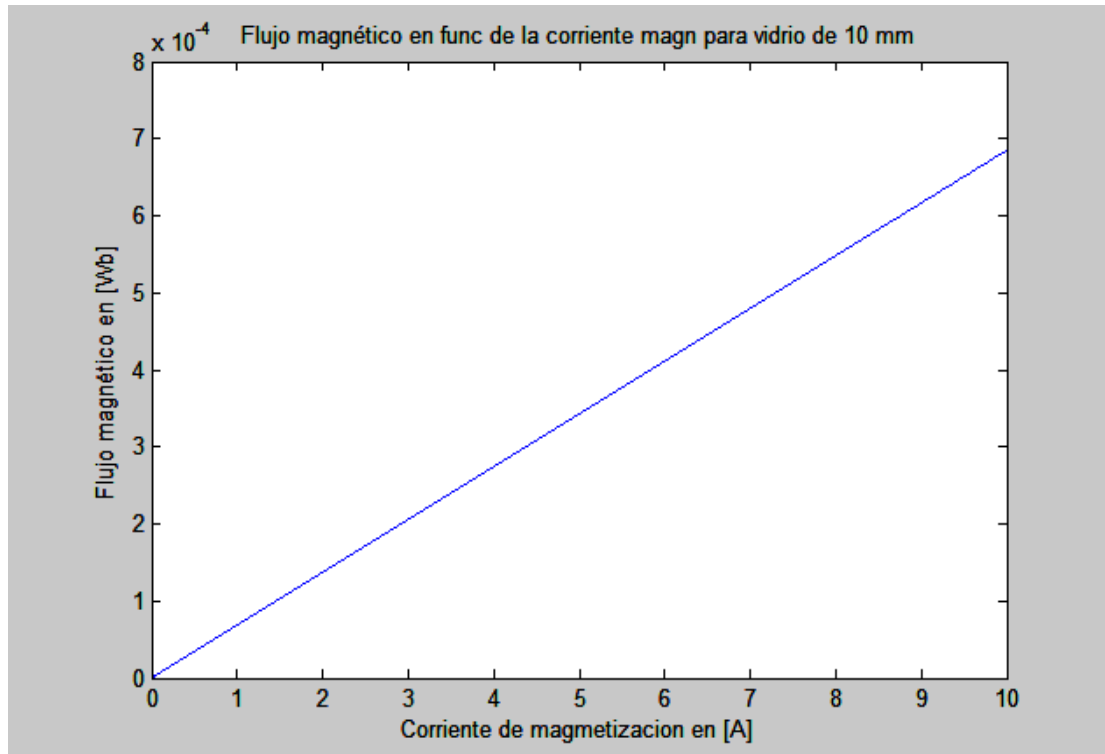
Seguidamente se muestra una grafica general que expone la variación de la inductancia magnética del circuito con respecto a los distintos espesores de vidrio:



Se puede apreciar claramente como varia la inductancia en forma casi hiperbólica, lo que haría pensar que si no existiese vidrio seria infinita, pero esto sirve hasta cierto limite, ya que en espesores muy reducidos empezaría a ponderar la permeabilidad del hierro, la cual se la considero infinita en este estudio, hay que recordar que la grafica esta en función del gap de vidrio y no del total, ya que si esto no se considera se podría pensar que la curva no se hace asintótica con un eje vertical.

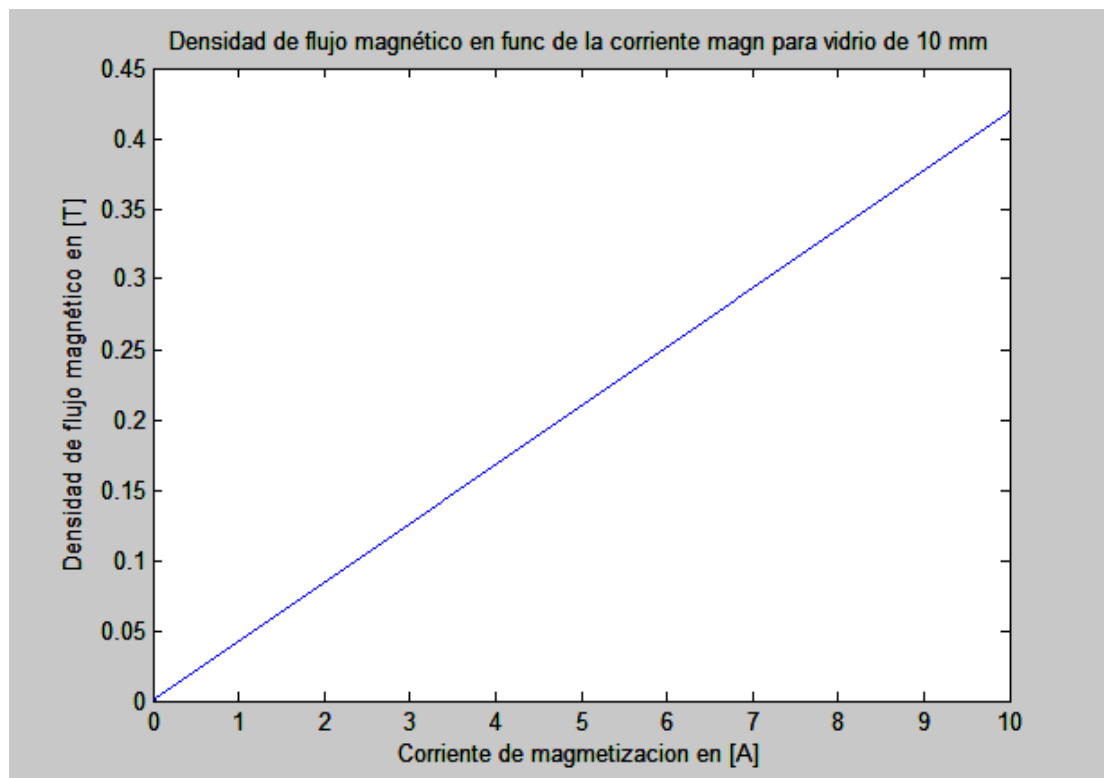
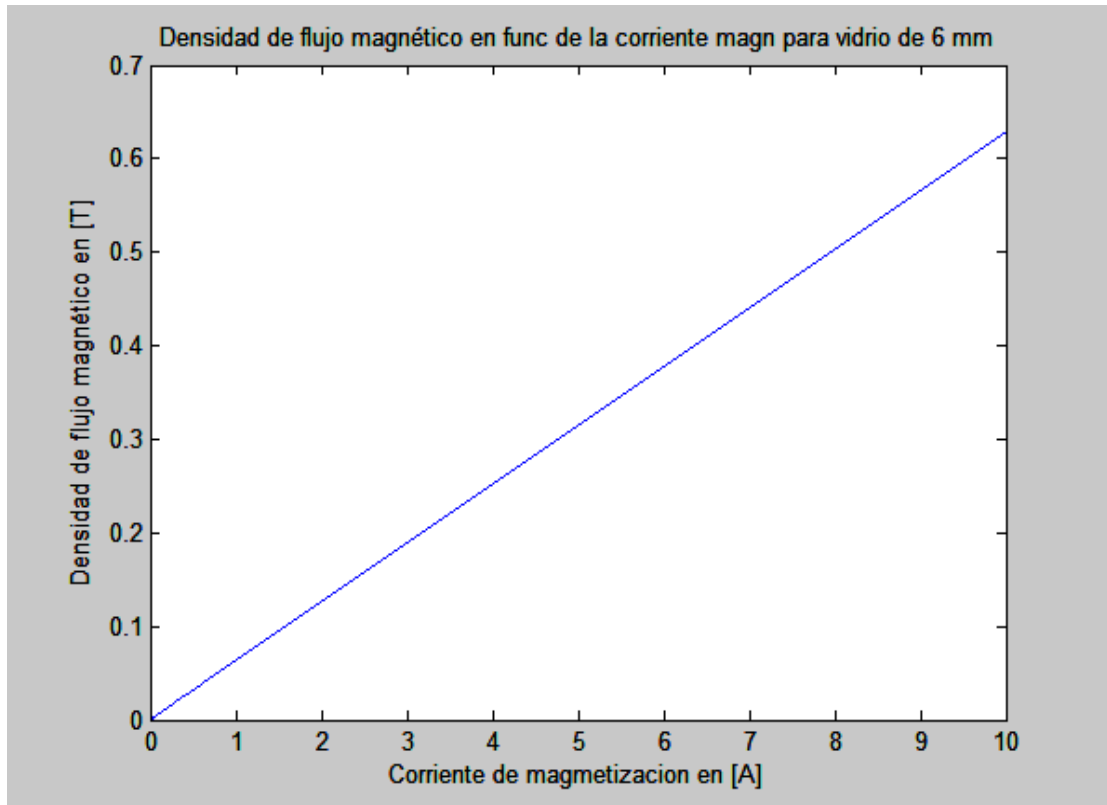
A continuación se muestran las graficas del flujo magnético en función de la corriente magnetizante para dos espesores distintos de vidrio, que fueron elegidos por ser los más representativos en la práctica del uso, que son 6 mm y 10 mm respectivamente:



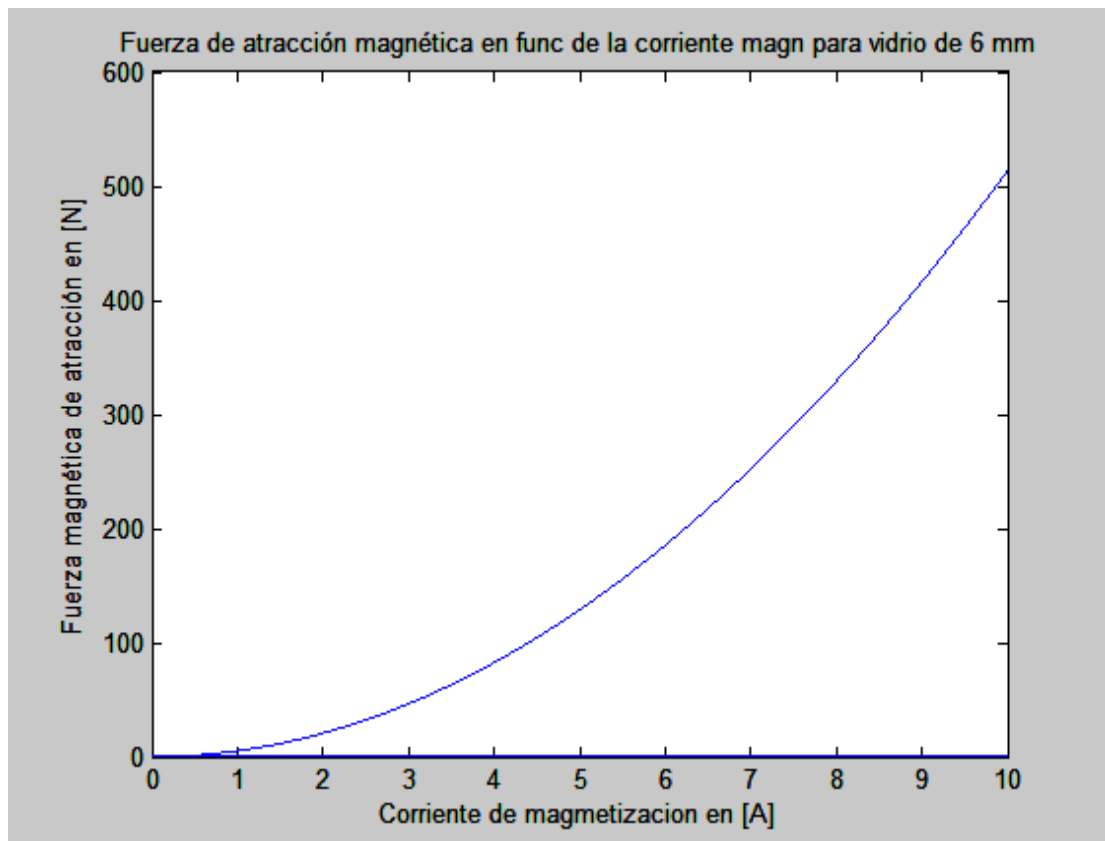


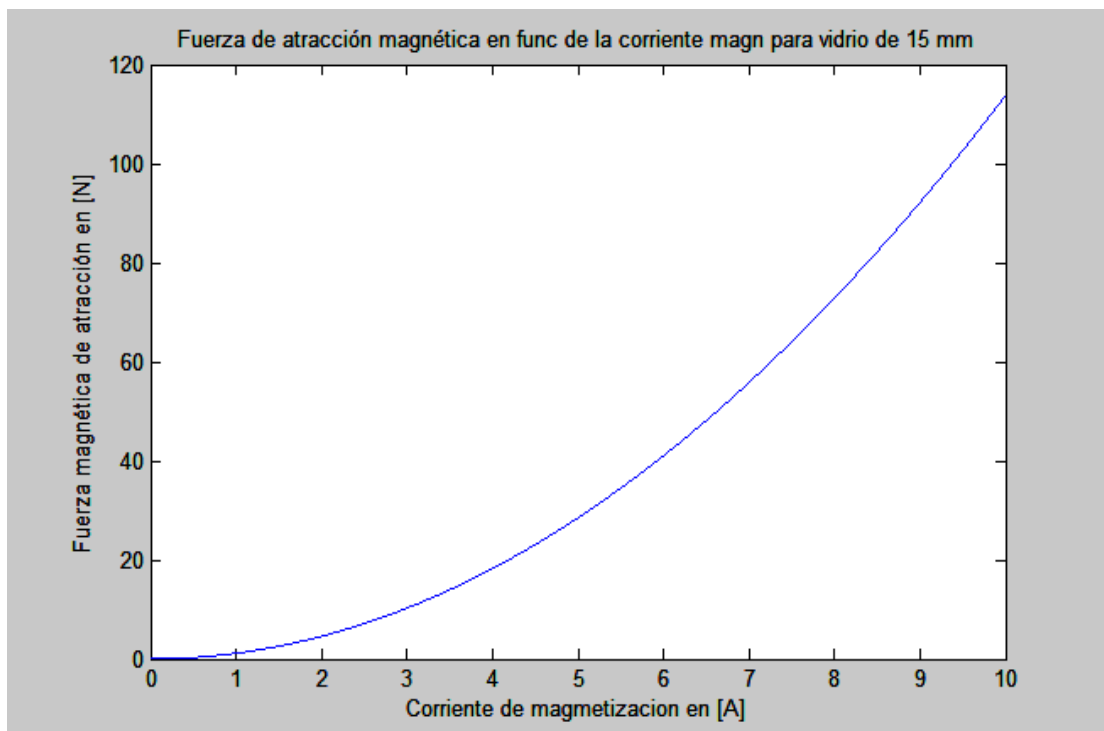
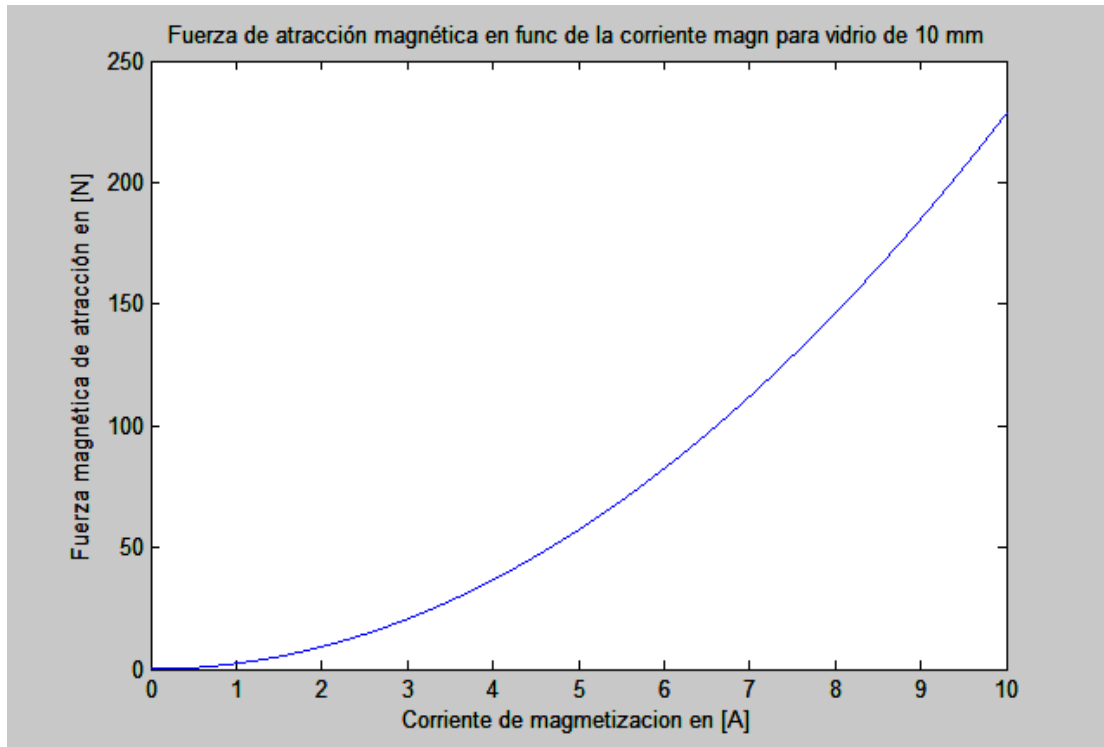
Se puede apreciar como claramente disminuye la pendiente de las rectas al aumentar el espesor.

A continuación al igual que en el caso anterior se grafican los espesores representativos, en este caso se grafican la densidad de flujo en función de la corriente de magnetización:



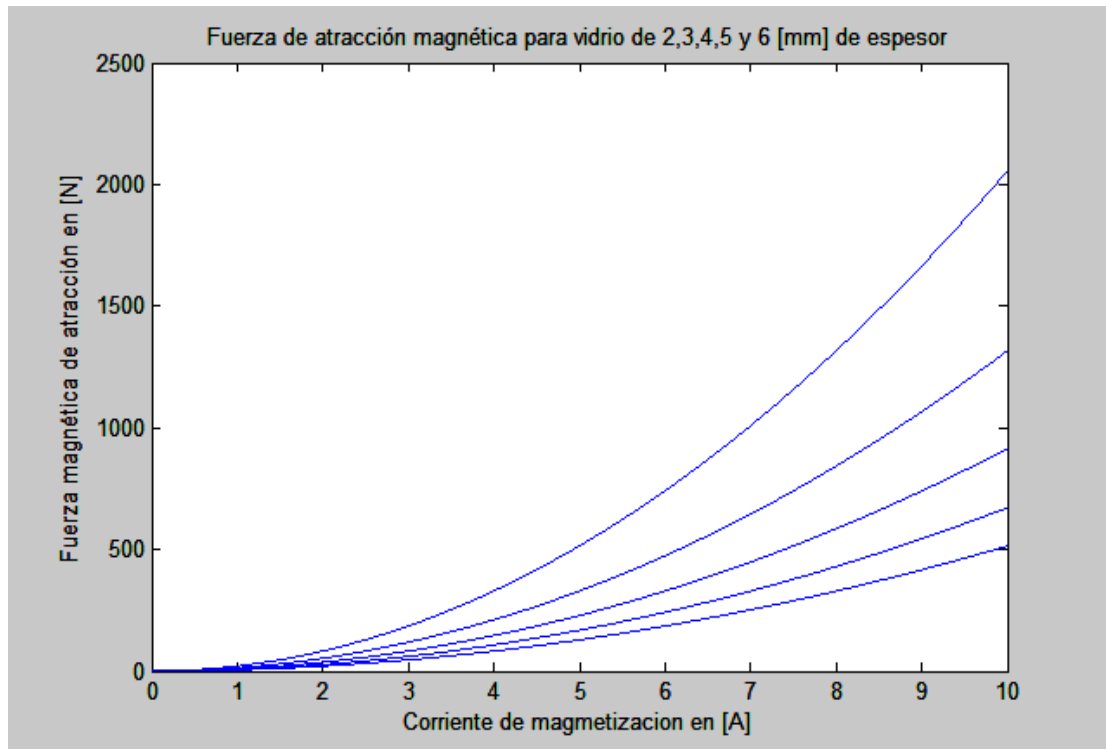
Seguidamente se muestran las graficas de la fuerza de atracción magnética en función de la corriente magnetizante que al igual que en los casos anteriores se realizan las graficas para los espesores representativos:

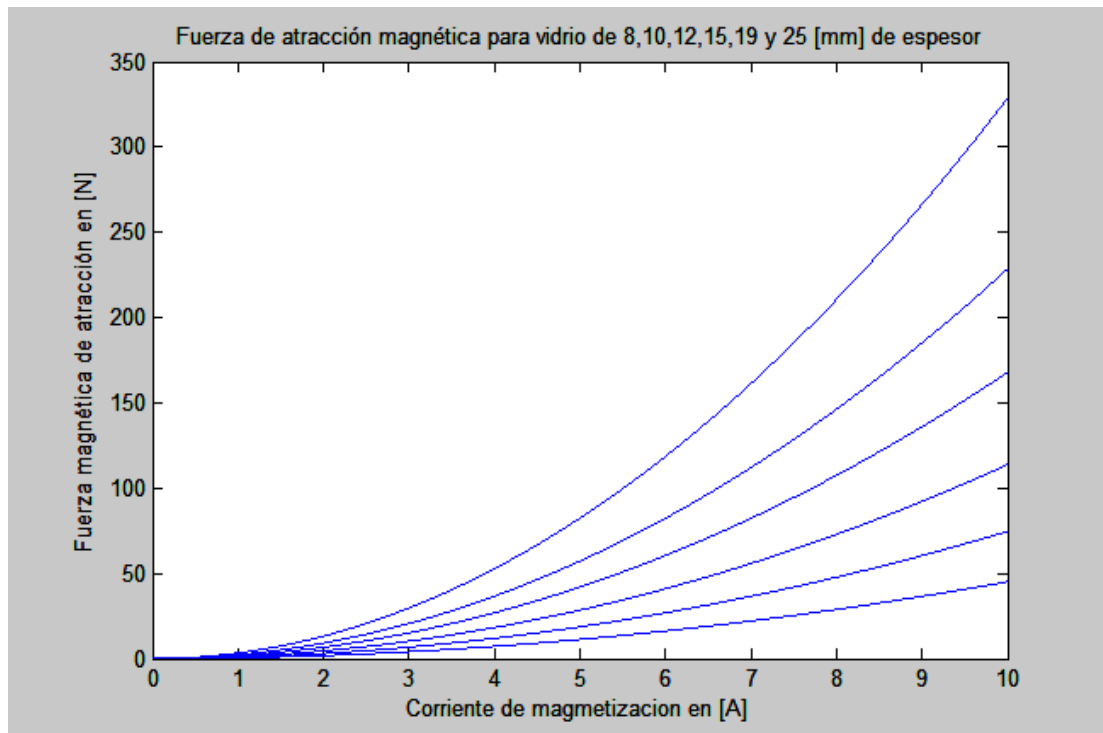




Se puede ver claramente el carácter parabólico de las curvas ya que la fuerza depende del cuadrado de la corriente, donde se puede apreciar resultados muy interesantes en el caso del vidrio de 6 mm, donde las magnitudes de las fuerzas exhibidas resultan ser muy adecuadas para los esfuerzos necesarios para realizar cortes con precisión.

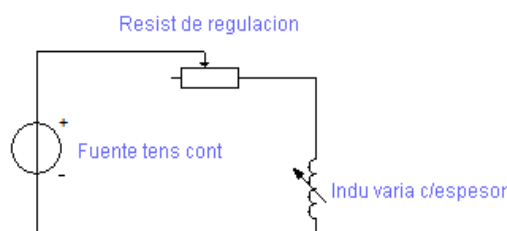
En las próximas graficas se muestra una comparación de las fuerzas para poder cuantificar su variación con el espesor. A medida que la curva baja corresponde a un espesor mayor.





Hay que aclarar que para espesores pequeños desde los 4 mm para abajo no se podría superar el ampere y medio de corriente y talvez menos, por lo que hay que mirar con cautela el intervalo observado.

Por otra parte se procede a definir esquemáticamente un circuito eléctrico para obtener la corriente magnetizante, el que estará comprendido por una fuente de tensión continua (igualmente se realizaron ensayos de corriente alterna para poder analizar las distintas alternativas), una resistencia de regulación y la inductancia del circuito magnético de yugos. Seguidamente se muestra el circuito eléctrico esquemático:



Esquema del circuito electrico de regulacion

Luego como se puede ver se va a tener un circuito donde estará presente una resistencia en serie con una inductancia, lo que va a definir una constante del tiempo determinada para cada espesor de vidrio y posición del reóstato. Seguidamente se planteara el balance de voltajes para la configuración mostrada en el circuito:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}$$

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2 \mu_o A_{\text{circ-mag}}}{g} = \text{cte.}$$

$$\Rightarrow V = Ri + L \frac{di}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V - Ri)$$

Despejando de esta manera se puede calcular la derivada de la corriente, sin perder la información media de la corriente hecho que se cometería si se derivara directamente para reemplazar en la ecuación de equilibrio de voltajes.

Con la corriente calculada a partir de las variables que la constituyen y sus parámetros y junto con la ecuación de la fuerza de atracción magnética y la ecuación de la densidad de flujo magnético que se plantea el diagrama en bloque para realizar la simulación en el entorno de Simulink de MATLAB. De esta manera se analiza el transitorio y los valores de estado permanente que pueden compararse con los valores obtenidos con el archivo-m anterior. Seguidamente se muestran dichas ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V - Ri) \\ B = \frac{\phi}{A} = \frac{\phi}{c * l_2} = \frac{N \mu_o}{2[(g_1 + g_3) + g_{\text{vidrio}}]} i \\ F = \frac{dW}{dg} = \frac{- N^2 \mu_o l_1 a}{2 * [(g_1 + g_3) + g_{\text{vidrio}}]^2} i^2 \end{array} \right.$$

Luego se muestra el diagrama en bloque que se obtuvo de descomponer dichas ecuaciones en los distintos bloques componentes, en el mismo se indican cuatro referencias que son posteriormente explicadas, para poder comprender las operaciones y sus interacciones y poder verificar los valores de cada bloque:

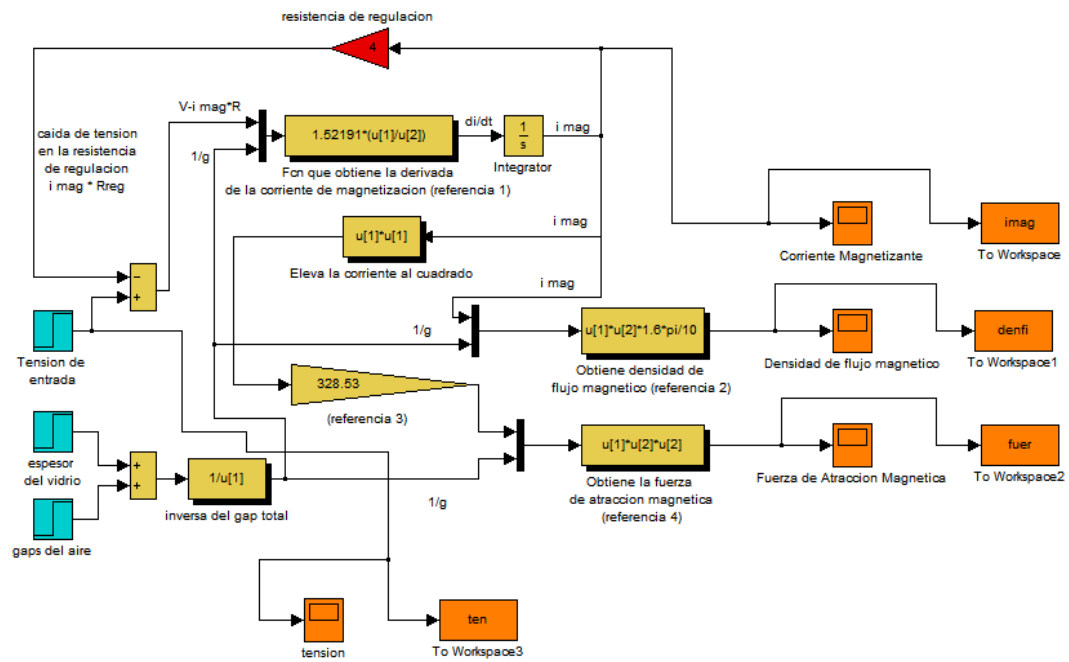
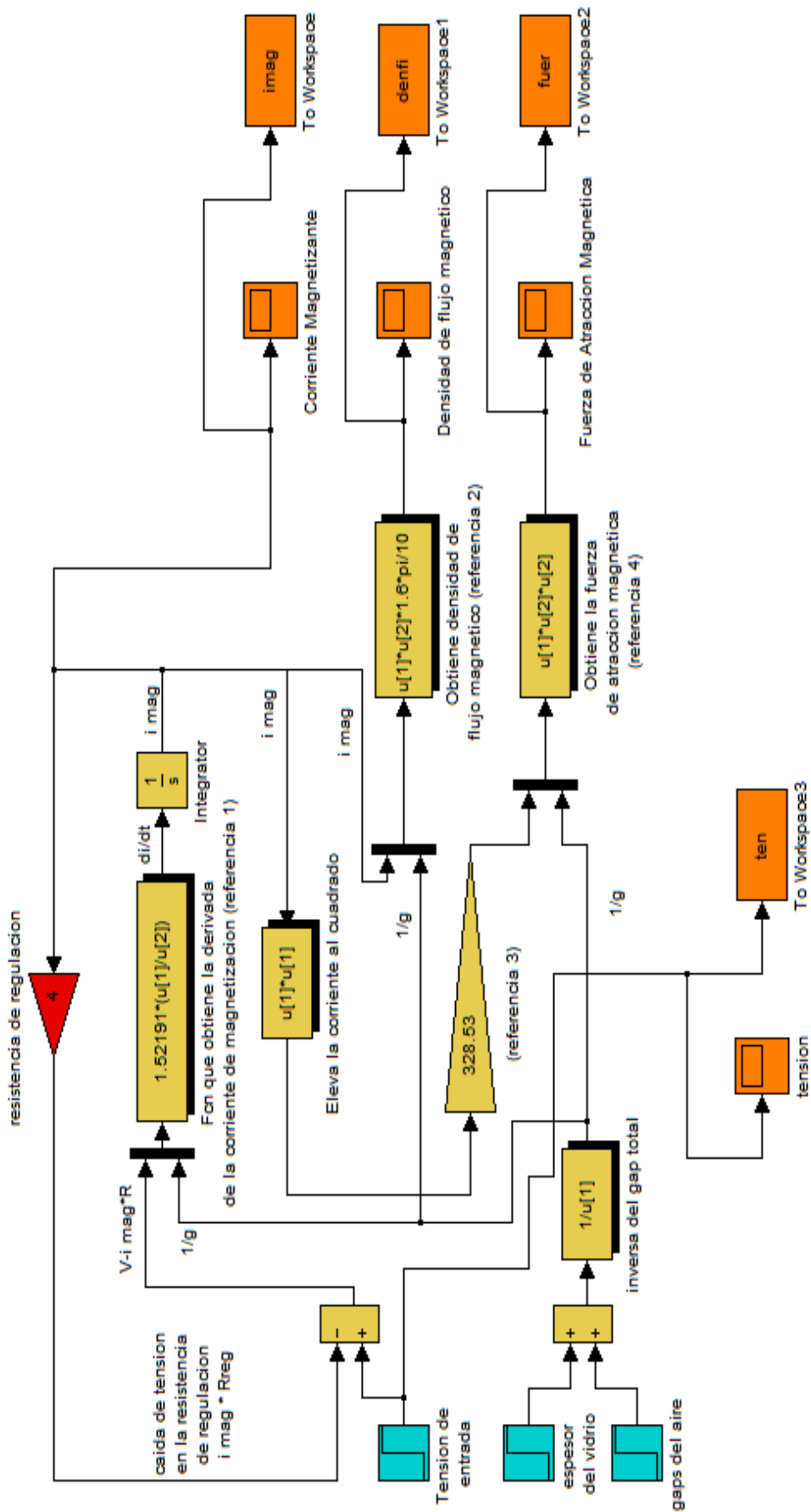


Diagrama en bloque de Simulink

Seguidamente se muestra una ampliación del diagrama en bloque:



Referencia 1:

Este bloque funcional calcula con la constante dentro de el y el componente u[2], el valor 1/L del circuito magnético. Luego al entrar el valor u[1] = V - i_{mag}* R_{reg} a la salida del bloque funcional se obtiene la derivada de la corriente magnetizante.

Dentro del bloque funcional se tiene: $1.72215 \cdot (u[1]/u[2]) \Rightarrow$

$$1/L = 1.52191 \cdot (1/u[2]); \quad u[2] = 1/g$$

$$\phi = \frac{\mu_o l_1 c}{[(g_1 + g_3) + g_{vidrio}] Ni}$$

$$\lambda = N\phi$$

$$L = \frac{d\lambda}{di} = \frac{\lambda}{i} = \frac{N^2 \mu_o l_1 c}{[(g_1 + g_3) + g_{vidrio}]} = \frac{800^2 * 4 * \pi * 10^{-7} * 19 * 43 * 10^{-3}}{g} = \frac{0.65707 [H * mm]}{g}$$

L: [H]

$g_1 + g_2 + g_{vidrio} = g$: [mm]

Referencia 2:

Dentro del bloque funcional se encuentra la siguiente expresión: $u[1] \cdot u[2] \cdot 6.4 \cdot \pi / 10$; donde u[1] es la corriente magnetizante y u[2] es la inversa del gap

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{\phi}{c \cdot l_2} = \frac{N \mu_o}{2[(g_1 + g_3) + g_{vidrio}]} i = \frac{800 * 4 * \pi * 10^{-7}}{2 * 10^{-3}} * u[1] * u[2] = \frac{1.6 * \pi}{10} * u[1] * u[2]$$

B: [T]

i: [A]

g_1, g_2, g_{vidrio} : [mm]

Referencia 3:

El valor que se encuentra en esta ganancia es de 290.33; esta ganancia condensa una serie de constantes que multiplicadas por el cuadrado de la corriente magnetizante, se utiliza posteriormente para calcular la fuerza de atracción, seguidamente se muestran los valores que se encuentran condensados en la ganancia.

$$\frac{N^2 * \mu_o * l_1 * c}{2} = \frac{800^2 * 4 * \pi * 10^{-7} * 19 * 43}{2} = 328.53$$

En este caso no se multiplica por 10^{-3} en la expresión porque luego al calcular la fuerza los valores de los gaps vendrán también en [mm].

Referencia 4:

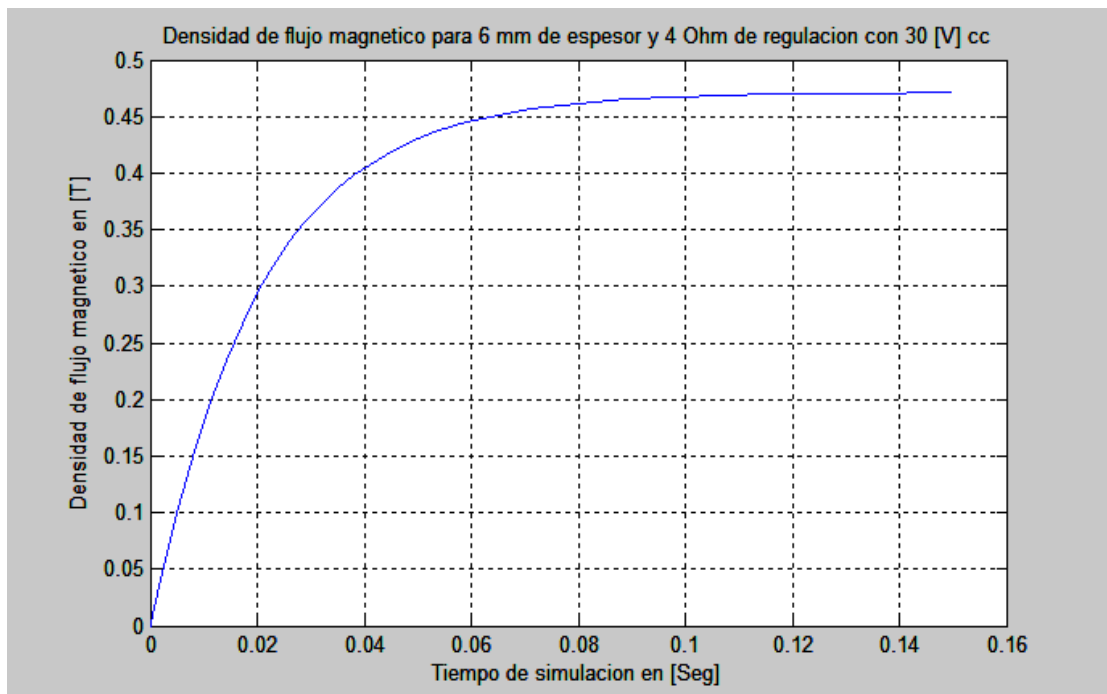
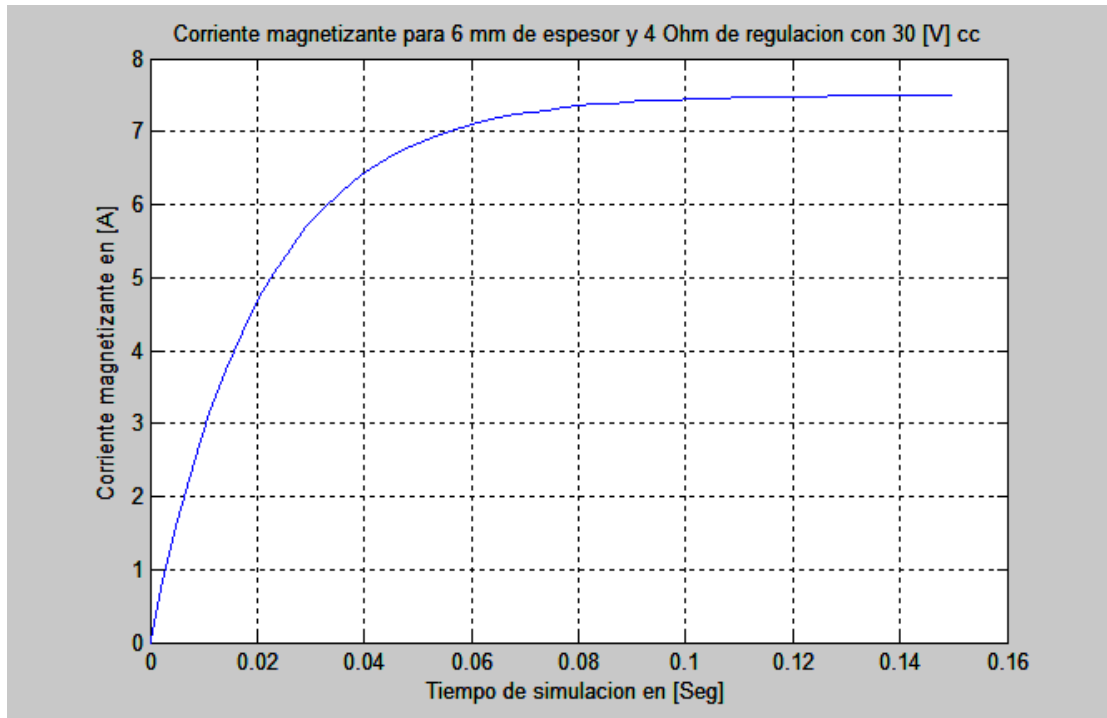
En este bloque funcional se encuentran los siguientes valores $u[1]*u[2]*u[2]$; donde se ve que $u[1]$, es el valor que se calculó en la ganancia de la referencia 3 multiplicada por el cuadrado de la corriente de magnetización; y $u[2]$ es el valor de la inversa del gap total; seguidamente se muestra la expresión de la fuerza de atracción:

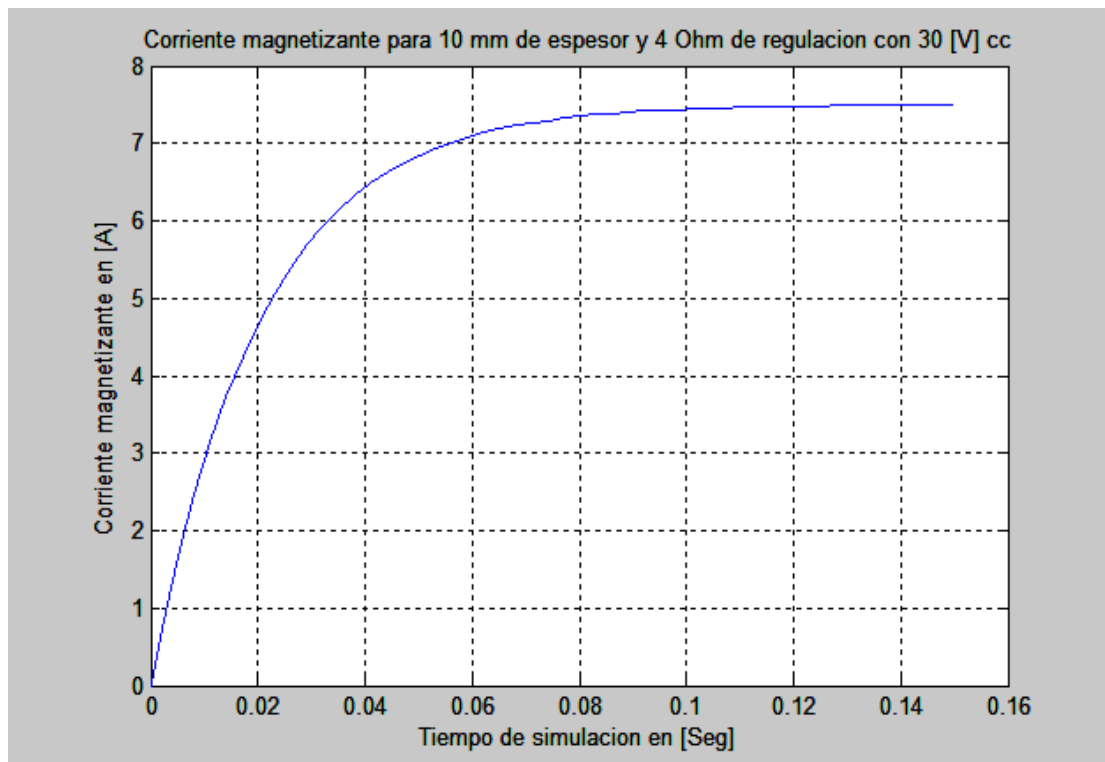
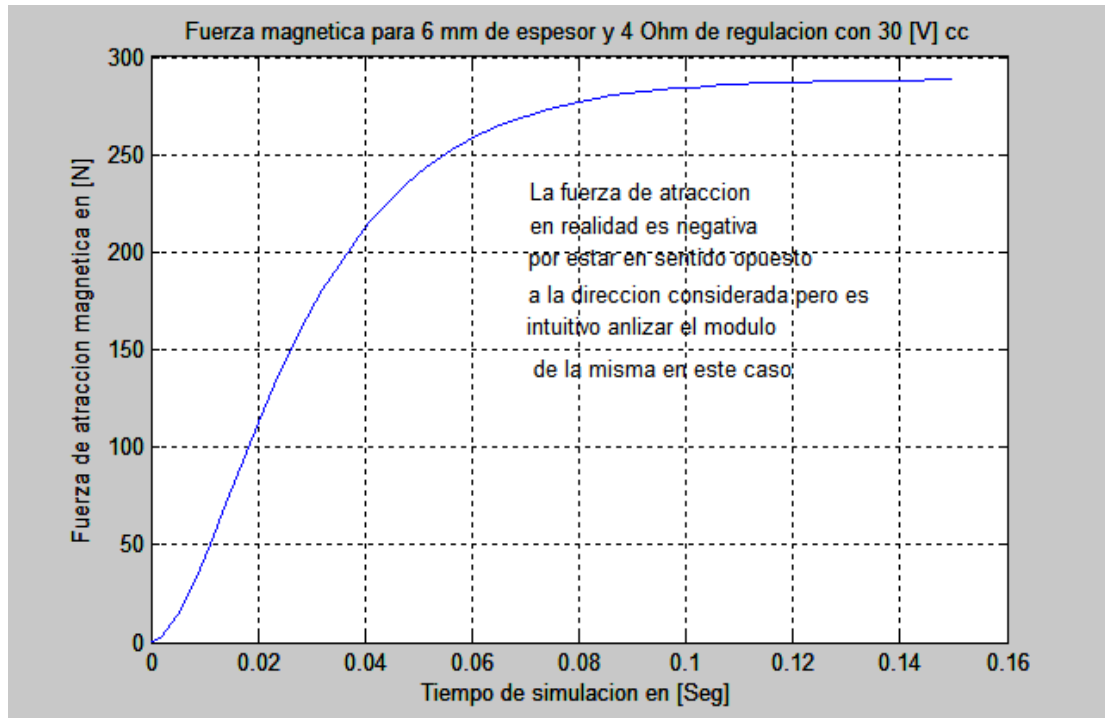
$$F = \frac{dW}{dg} = \frac{-N^2 \mu_0 l_1 c}{2 * [(g_1 + g_3) + g_{vidrio}]^2} i^2 = \left[\frac{-N^2 \mu_0 l_1 c}{2} i^2 \right] * u[2]^2 = u[1] * u[2]^2$$

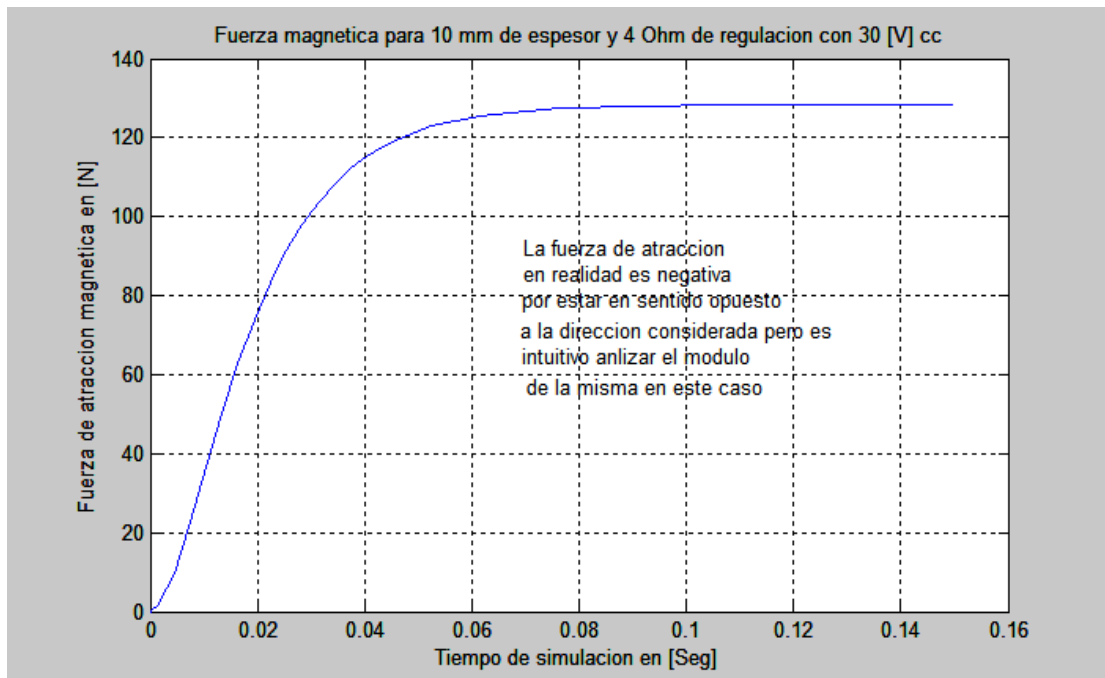
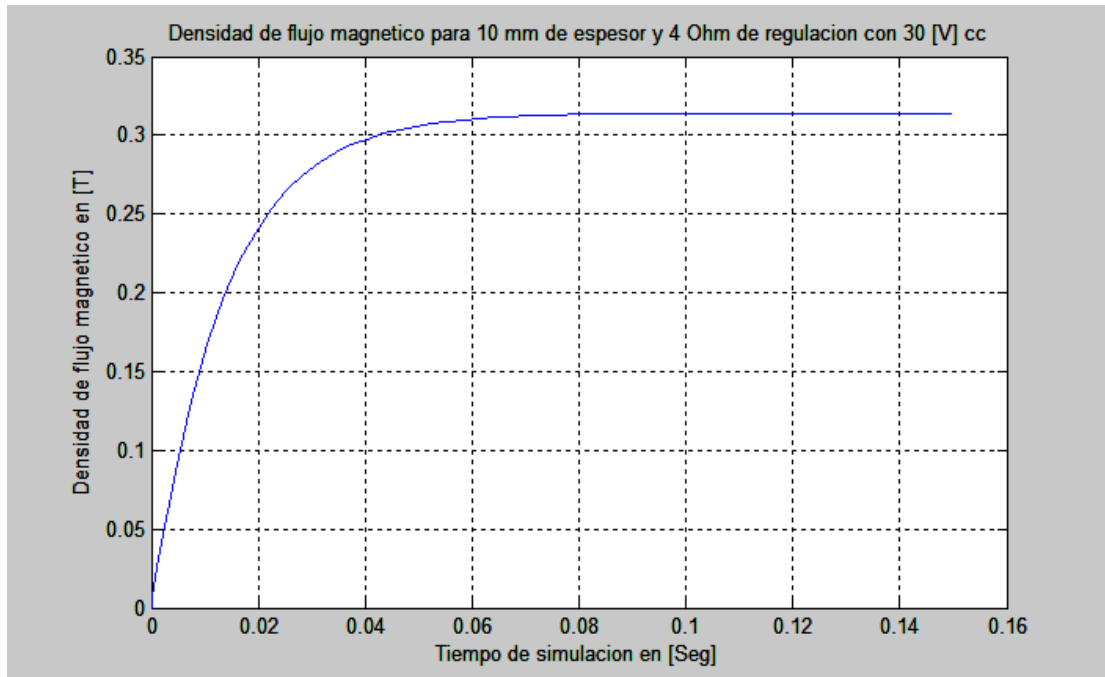
F: [N]
 l_1 : [mm]
 c: [mm]
 g_1, g_2, g_{vidrio} : [mm]

En el diagrama en bloque se puede observar la ganancia que hay en la parte superior con un valor de 4 la misma indica la resistencia de regulación en Ohm, en celeste se pueden ver los parámetros de entrada, mientras que en naranja se aprecian las salidas del sistema y en rojo se encuentra la resistencia de regulación. Hay que aclarar que en el diagrama en bloque se observa el valor del módulo de la fuerza, ya que para interpretar las gráficas es mejor ver como evoluciona un valor positivo y porque en definitiva lo que interesa saber es el módulo de dicha fuerza para poder realizar comparaciones y diseños.

Seguidamente se muestran los oscilogramas para espesores representativos como se hizo con las gráficas del archivo-m, pero se puede obtener también en este caso la simulación para el espesor que uno lo desee y con los parámetros que uno desee, ya que cualquier parámetro es modificable.







Se puede observar que los regímenes permanentes se alcanzan en más o menos en una décimas de segundo y que los valores de régimen permanente o estacionario coinciden con los valores calculados mediante el archivo-m.

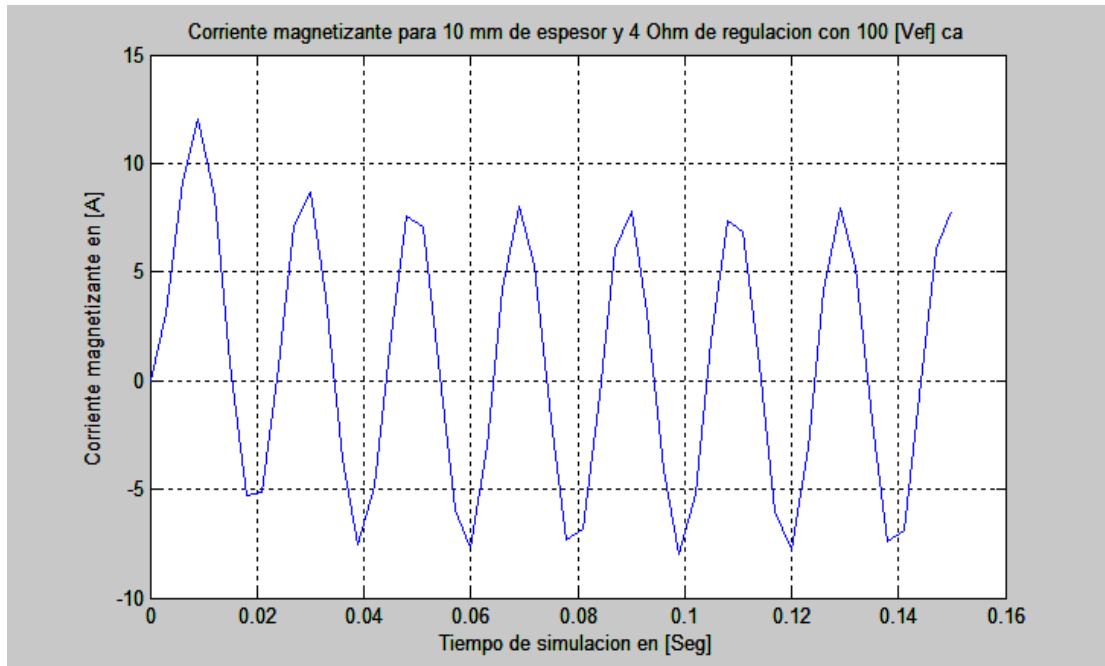
Luego se muestra el archivo-m, que se utilizó para realizar los últimos gráficos de la simulación:

```
plot(tout,imag);hold
title('Corriente magnetizante para 10 mm de espesor y 4 Ohm de
regulacion con 30 [V] cc');
xlabel('Tiempo de simulacion en [Seg]');
ylabel('Corriente magnetizante en [A]');
grid;
pause;

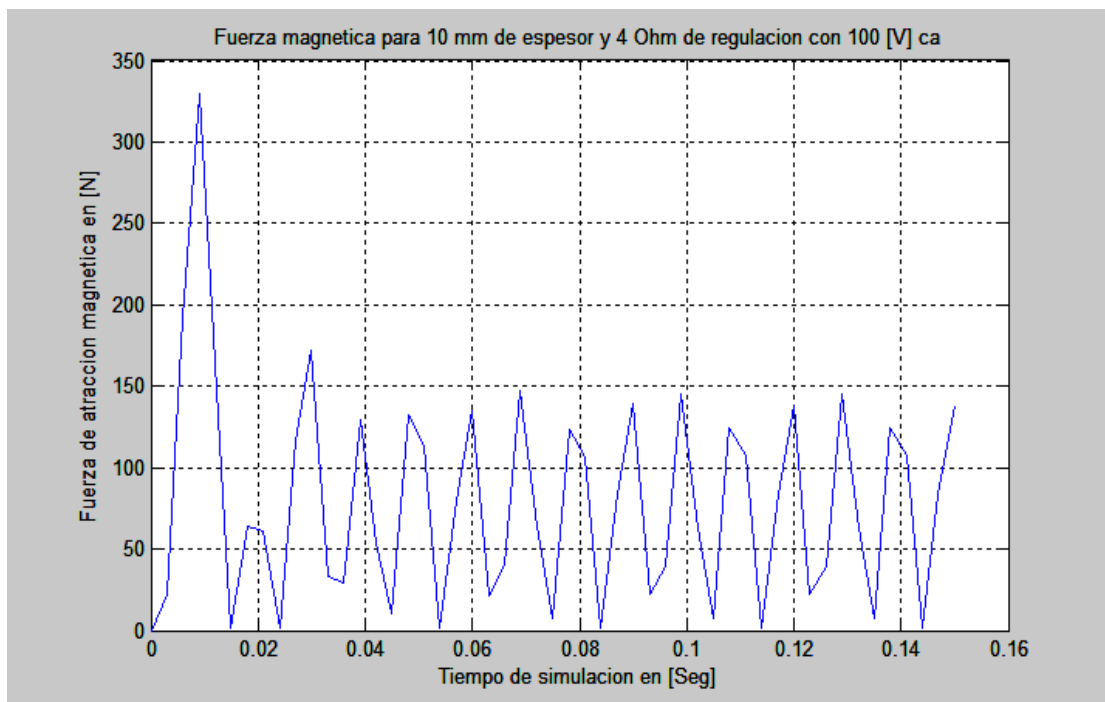
plot(tout,denfi);hold
xlabel('Tiempo de simulacion en [Seg]');
ylabel('Densidad de flujo magnetico en [T]');
title('Densidad de flujo magnetico para 10 mm de espesor y 4 Ohm de
regulacion con 30 [V] cc');
grid;
pause;

plot(tout,fuer);hold
title('Fuerza magnetica para 10 mm de espesor y 4 Ohm de regulacion
con 30 [V] cc');
xlabel('Tiempo de simulacion en [Seg]');
ylabel('Fuerza de atraccion magnetica en [N]');
grid;
gtext('La fuerza de atraccion');
gtext('en realidad es negativa');
gtext('por estar en sentido opuesto');
gtext('a la direccion considerada pero es');
gtext('intuitivo analizar el modulo ');
gtext(' de la misma en este caso');
pause;
```

A continuación se realizó la simulación del prototipo en Simulink con corriente alterna de 50 [Hz], de los oscilogramas obtenidos hay que analizar los valores eficaces para la corriente de magnetización y el valor medio de la fuerza de atracción magnética. En primer lugar se ven dos gráficos que corresponden a la corriente de magnetización y a la fuerza de magnetización cuando se está empleando el prototipo con placas de vidrio de 10 [mm] de espesor:

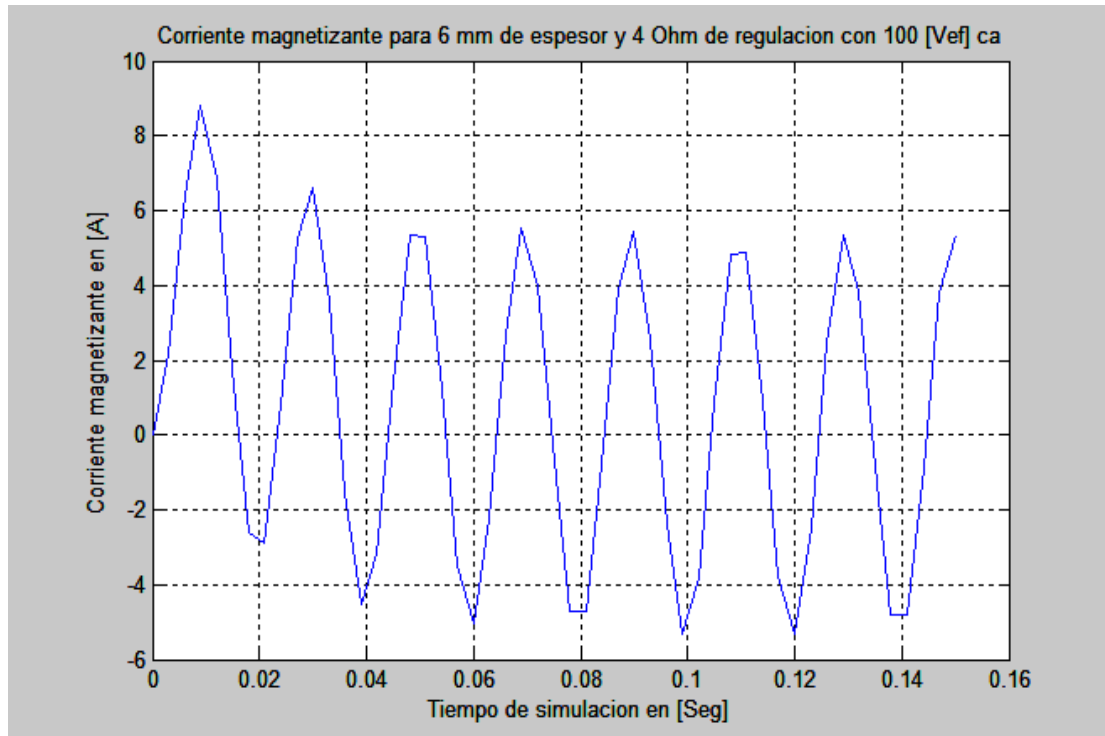


La corriente pico puede verse que se estabilizo en un valor muy cercano a los 7.5 [A], con lo que el valor de régimen permanente puede considerarse que es de unos 5.3 [Aef] es decir valor eficaz.

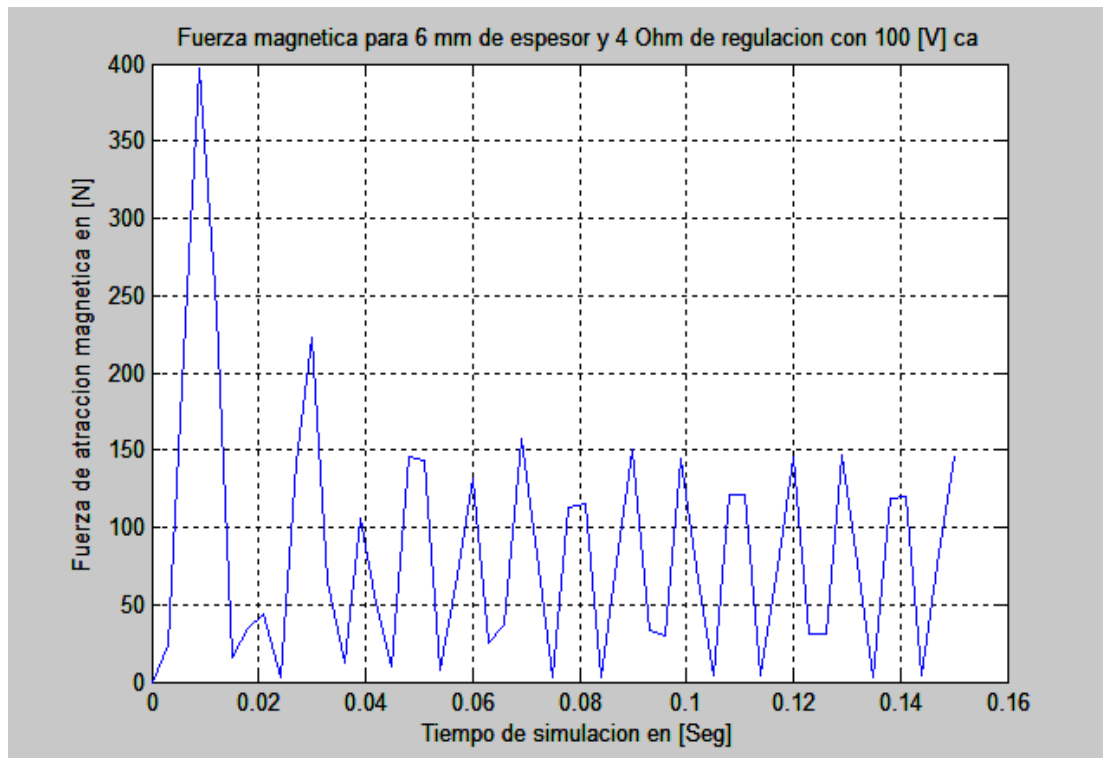


El valor pico para el caso de 10 [mm] puede verse que se encuentra cerca de los 150 [N] con lo que el valor medio de la fuerza para este caso puede considerarse del orden de los 75 [N].

Luego se pueden apreciar las graficas de corriente magnetizante y fuerza de atracción magnética para el caso cuando se esta empleando el prototipo con placas de 6 [mm] de espesor:



En este caso la corriente pico dio un valor de 5.5 [A], con lo que se puede calcular que el valor de la corriente magnetizante es de 3.9 [Aef] valor eficaz.



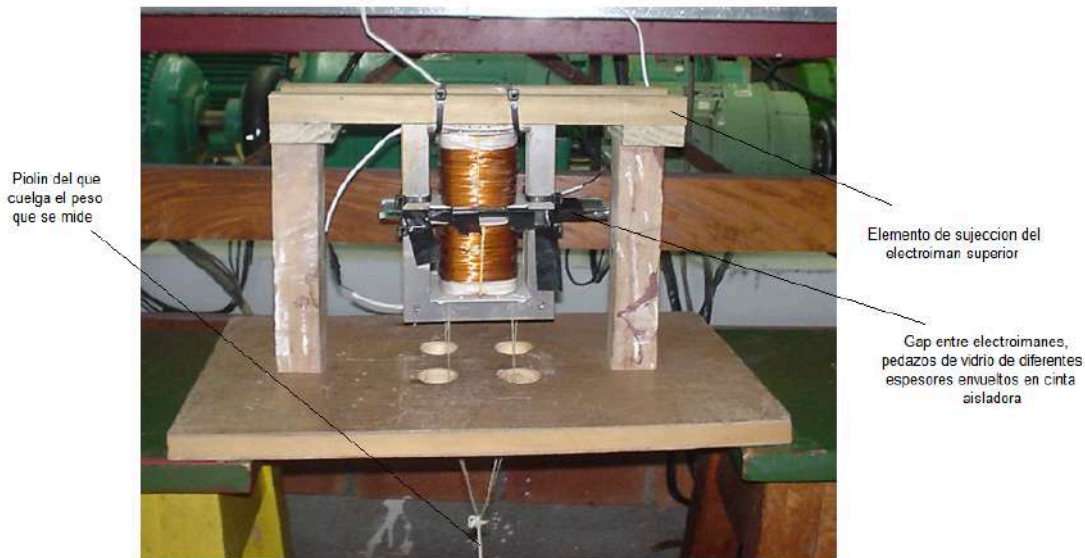
Para este caso se puede apreciar un valor pico de la fuerza de atracción magnética cercano a los 160 [N], con lo que es posible considerar una fuerza de atracción media de 80 [N].

Al comparar los valores de corrientes eficaces y fuerzas medias de la simulación de corriente alterna con los valores de simulación del caso de corriente continua estos son muy semejantes. Con lo que es posible concluir que se pueden utilizar los valores de la simulación de corriente continua para realizar comparaciones en los ensayos posteriores del prototipo, tanto en corriente alterna con valores eficaces como para comparar ensayos de corriente continua.

Ensayos del prototipo y comparación de resultados con los del análisis dinámico en Simulink

Al prototipo citado en apartados anteriores del trabajo se realizaron ensayos, tanto en corriente alterna como en corriente continua, para comparar los valores obtenidos con los de las simulaciones efectuadas en el apartado anterior del trabajo.

En primer lugar se realizó un ensayo de corriente alterna, para ello se construyó un dispositivo de soporte para uno de los electroimanes que permitiera al otro electroimán poder moverse libremente y que se le pudiera colgar libremente peso hasta que se despegaran los electroimanes, y con este peso poder determinar cuál es la fuerza de atracción que existía entre ellos cuando se colocaban distintos gaps de separación entre ellos y se los tensionaba con un variac de modo de poder regular distintas disposiciones de corrientes y pesos. A continuación se muestra una fotografía en la que se puede observar dicha disposición:



Dispositivo para realizar los ensayos de medición de fuerzas de atracción electromagnética

Se puede observar en la fotografía que el electroimán superior está firmemente sujeto, mientras el electroimán inferior está flotando. Entre los electroimanes hay un pedazo de vidrio, al cual se le colocó uso pedazos de cinta aisladora para que los electroimanes no lastimaran a los bordes del vidrio, ya que cuando se acercaba el momento del despegue empezaban a producirse pequeñas vibraciones. También en la fotografía puede observarse que del electroimán inferior cuelgan cuatro hilos que pasan por cuatro agujeros en la tabla de base, estos cuatro hilos convergen abajo de la tabla a un solo hilo del que se cuelgan los diferentes pesos, debajo de la tabla se encuentra una plaquita de fibra fácil (que no se puede ver en la fotografía, pero se podrá apreciar en una imagen más adelante en este punto del trabajo) para separar los cuatro hilos de los agujeros de la tabla de base evitando que entren en contacto y que de esta manera puedan alterar los resultados.

Los cuatro hilos fueron tensados de manera que sus esfuerzo en el ensayo sean lo mas similares posibles para que se efectuó una fuerza pareja en toda la superficie de contacto de los electroimanes y del pedazo de vidrio que estaba en contacto entre ellos.

En este ensayo se regulo una tensión determinada, luego se tomaron los valores de la corriente y se le iba adicionando peso a una plataformita que se sostenía con el hilo que estaba atado a los cuatro hilos sujetos al electroimán. El peso se iba agregando gradualmente mediante pesos calibradas y se lo hacia con movimientos leves para que no existiese influencias dinámicas de los pesos.

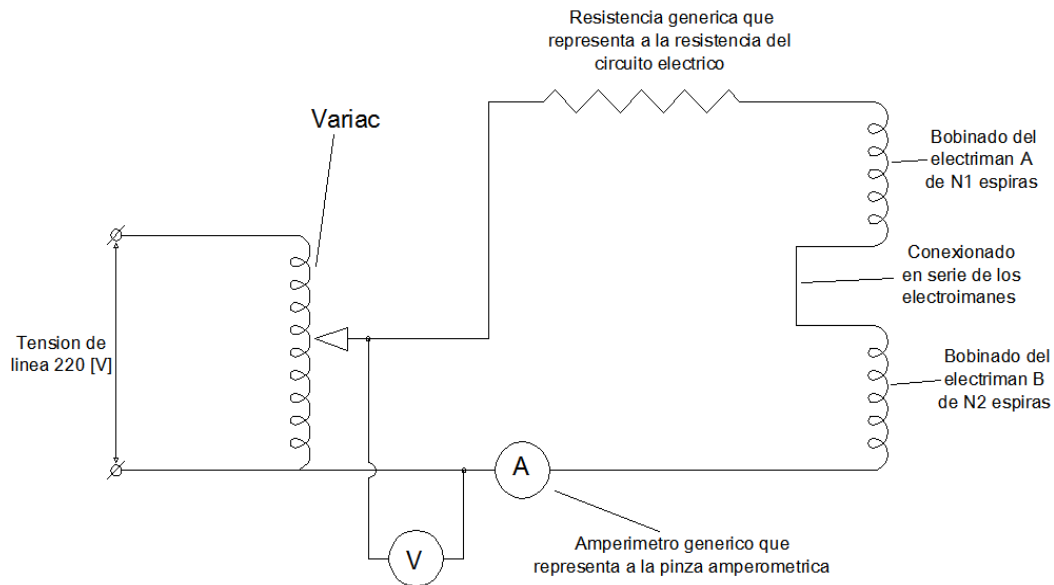
Seguidamente se muestra una fotografía donde se puede apreciar el conexionado:



Diagrama de conexionado del ensayo de corriente alterna

En la fotografía se puede observar al dispositivo para el ensayo, un variac, un tester usado como voltímetro, una pinza aperometrica y una balanza con la cual se calibraron los diferentes pesos.

Seguidamente se muestra un simple esquema del conexionado eléctrico de la figura anterior:



Esquema del circuito electrico del ensayo de corriente alterna

Los ensayos fueron realizados con tres espesores de pedazos de vidrio para que auspiciaran de gap entre los electroimanes, estos fueron de 4 [mm], 6 [mm] y de 10 [mm] de espesor. Seguidamente se muestran unas tablas con los valores obtenidos en dicho ensayo:

Espesor 4[mm]

Corriente (valores eficaces)	Fuerza medida (media en kg)	Fuerza medida (media en N)
1.4 [A] c.a.	5.05 [kg]	49.54 [N]
1.5 [A] c.a.	6.1 [kg]	59.84 [N]
2.1 [A] c.a.	8.1 [kg]	79.46 [N]
2.5 [A] c.a.	9.85 [kg]	96.63 [N]
2.7 [A] c.a.	10.85 [kg]	106.44 [N]

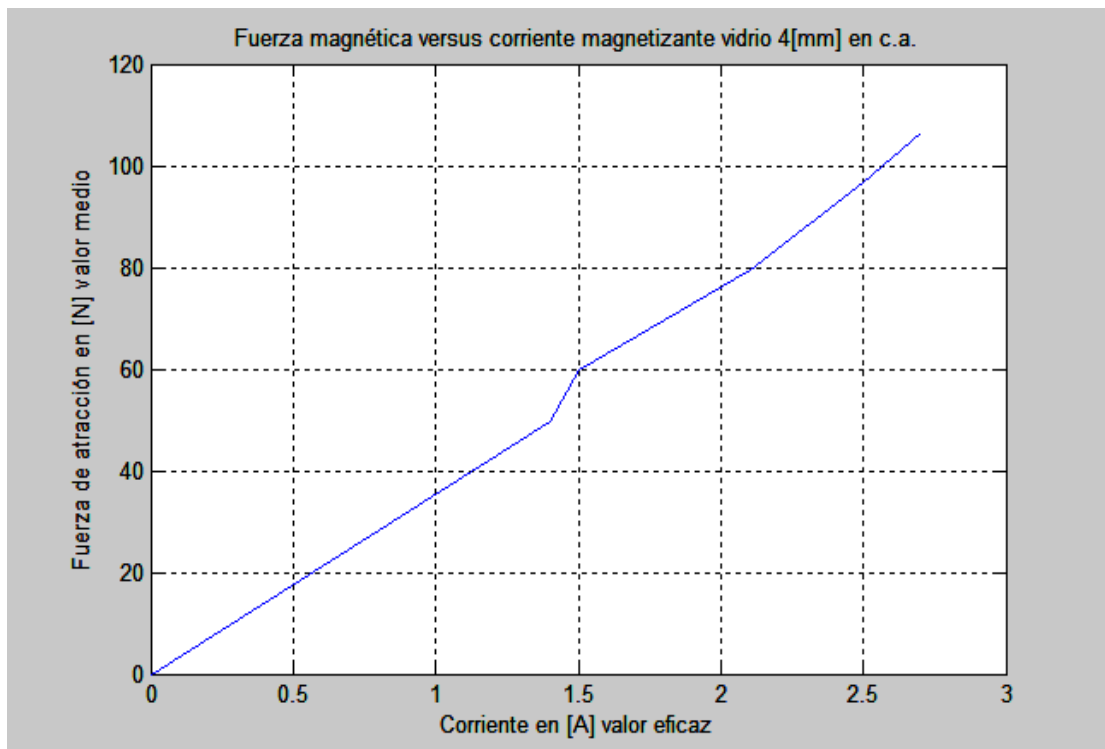
Espesor 6 [mm]

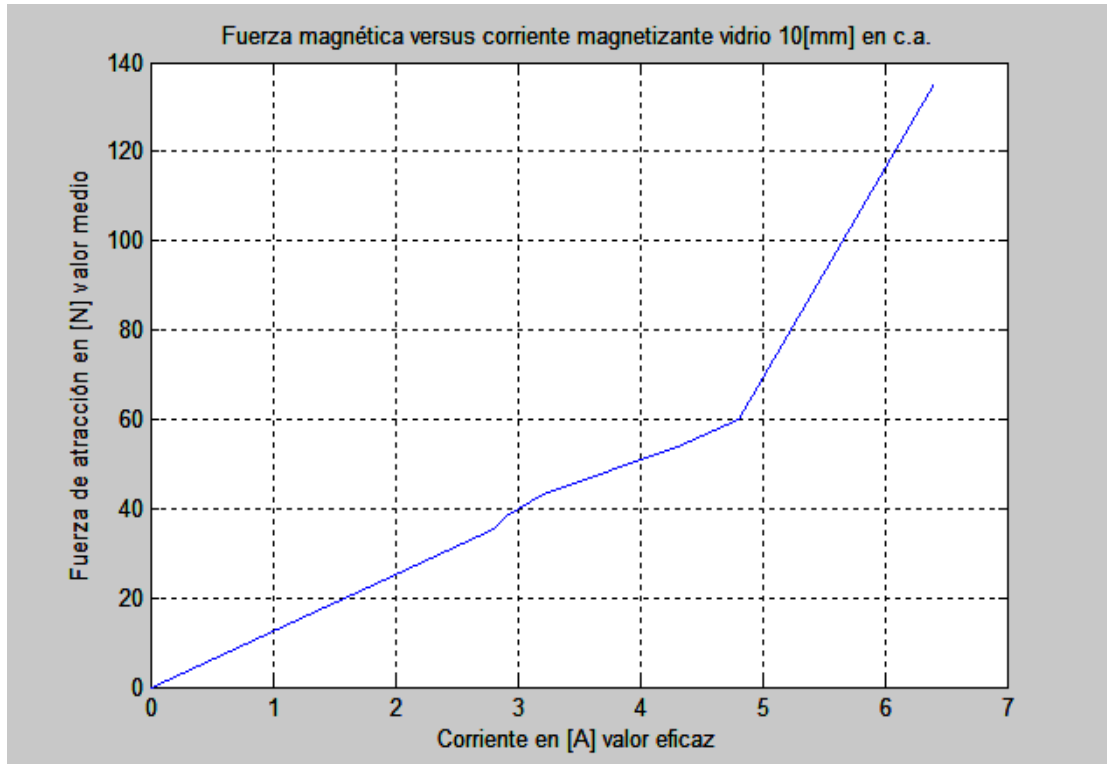
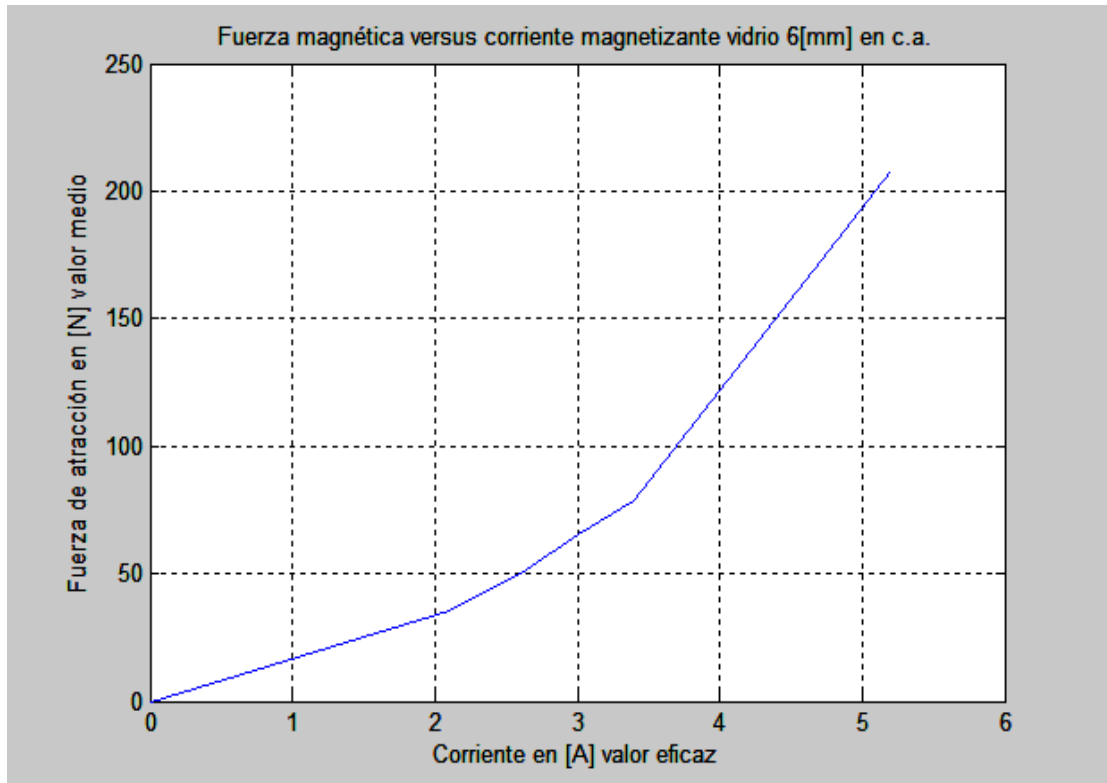
Corriente (valores eficaces)	Fuerza medida (media en kg)	Fuerza medida (media en N)
2.1 [A] c.a.	3.6 [kg]	35.32 [N]
2.6 [A] c.a.	5.1 [kg]	50.03 [N]
3 [A] c.a.	6.7 [kg]	65.73 [N]
3.4 [A] c.a.	8 [kg]	78.48 [N]
5.2 [A] c.a.	21.2 [kg]	207.97 [N]

Espesor 10 [mm]

Corriente (valores eficaces)	Fuerza medida (media en kg)	Fuerza medida (media en N)
2.8 [A] c.a.	3.6 [kg]	35.32 [N]
2.9 [A] c.a.	3.9 [kg]	38.26 [N]
3.2 [A] c.a.	4.4 [kg]	43.16 [N]
4.3 [A] c.a.	5.47 [kg]	53.66 [N]
4.8 [A] c.a.	6.1 [kg]	59.84 [N]
6.4 [A] c.a.	13.8 [kg]	135.38 [N]

Seguidamente se muestran las graficas de los valores de estas tablas:





Luego se realizaron los ensayos de corriente continua de los electroimanes en este caso se podía lograr una muy buena regulación de la corriente, con lo cual los ensayos resultaron mucho más fáciles de realizar y en vez de ir adicionando peso hasta el despegue de los electroimanes, se reguló una corriente determinada, se posicionaron los electroimanes en el lugar correspondiente y se fue reduciendo la corriente hasta el despegue de los electroimanes tomando el valor de la corriente para este instante de tiempo.

Seguidamente en la siguiente fotografía se muestra una disposición de estos electroimanes en los ensayos:



Disposición de los electroimanes en el ensayo de corriente continua

En esta figura se puede apreciar la fuente de corriente continua que está alimentando a los electroimanes, la misma está ubicada detrás del dispositivo de soporte de los electroimanes. En la fotografía se puede ver también el soporte para discos de pesas, en el cual se pueden ir incorporando los diferentes pesos. Así mismo es posible observar en dicha fotografía la plaquita de fibra fácil que está debajo de la tabla de base.

En las próximas tablas se verá que hay una columna de las fuerzas en la que se coloca el peso de los discos que se van adicionando en el ensayo y otra columna en donde está la fuerza neta del electroimán, esta fuerza neta es la suma de los pesos de los discos colocados para cada caso más la del soporte para las pesas más el peso de uno de los electroimanes (en este caso el inferior), la suma del peso total adicionado al de los discos es de 3.21 [kg].

Seguidamente se muestran las tablas de valores obtenidas de este ensayo de corriente continua:

La siguiente tabla corresponde al caso de vidrio de 4 [mm] de espesor:

Corriente en [A]	Peso de los discos de pesa adicionados [kg]	Fuerza neta del electroimán en [kg]	Fuerza neta del electroimán en [N]
1.1	0	3.21	31.4901
1.3	1.25	4.46	43.7526
1.5	2.5	5.71	56.0151
1.7	3.75	6.96	68.2776
1.8	5	8.21	80.5401
2	6.25	9.46	92.8026
2.1	7.5	10.71	105.0651
2.3	8.75	11.96	117.3276
2.4	10	13.21	129.5901
2.7	11.25	14.46	141.8526
2.7	12.5	15.71	154.1151
2.8	13.75	16.96	166.3776
2.8	15	18.21	178.6401
2.9	16.25	19.46	190.9026
2.9	17.5	20.71	203.1651
2.9	18.75	21.96	215.4276
3	20	23.21	227.6901
3.1	21.25	24.46	239.9526
3.2	22.5	25.71	252.2151
3.3	23.75	26.96	264.4776
3.3	25	28.21	276.7401
3.4	26.25	29.46	289.0026
3.5	27.5	30.71	301.2651
3.5	28.75	31.96	313.5276
3.6	30	33.21	325.7901

La siguiente tabla corresponde al caso del vidrio de 6 [mm] de espesor:

Corriente en [A]	Peso de los discos de pesa adicionados [kg]	Fuerza neta del electroimán en [kg]	Fuerza neta del electroimán en [N]
1.5	0	3.21	31.4901
1.9	1.25	4.46	43.7526
2.1	2.5	5.71	56.0151
2.3	3.75	6.96	68.2776
2.6	5	8.21	80.5401
2.8	6.25	9.46	92.8026
2.9	7.5	10.71	105.0651

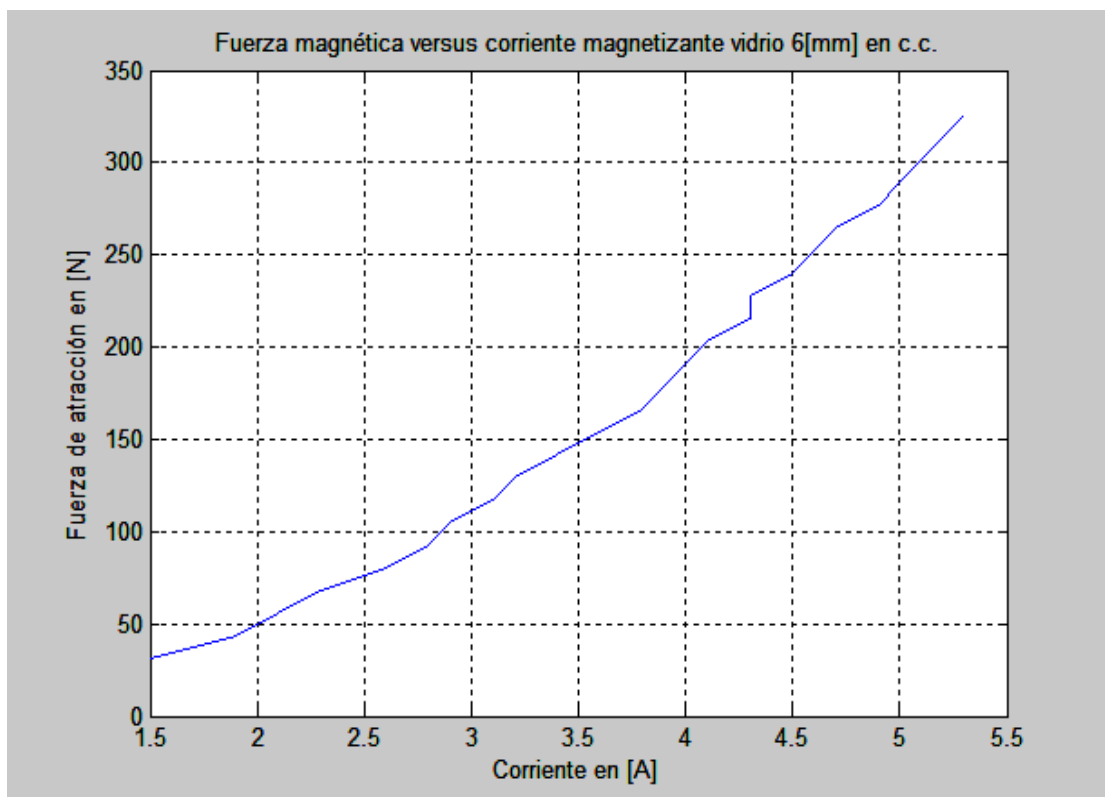
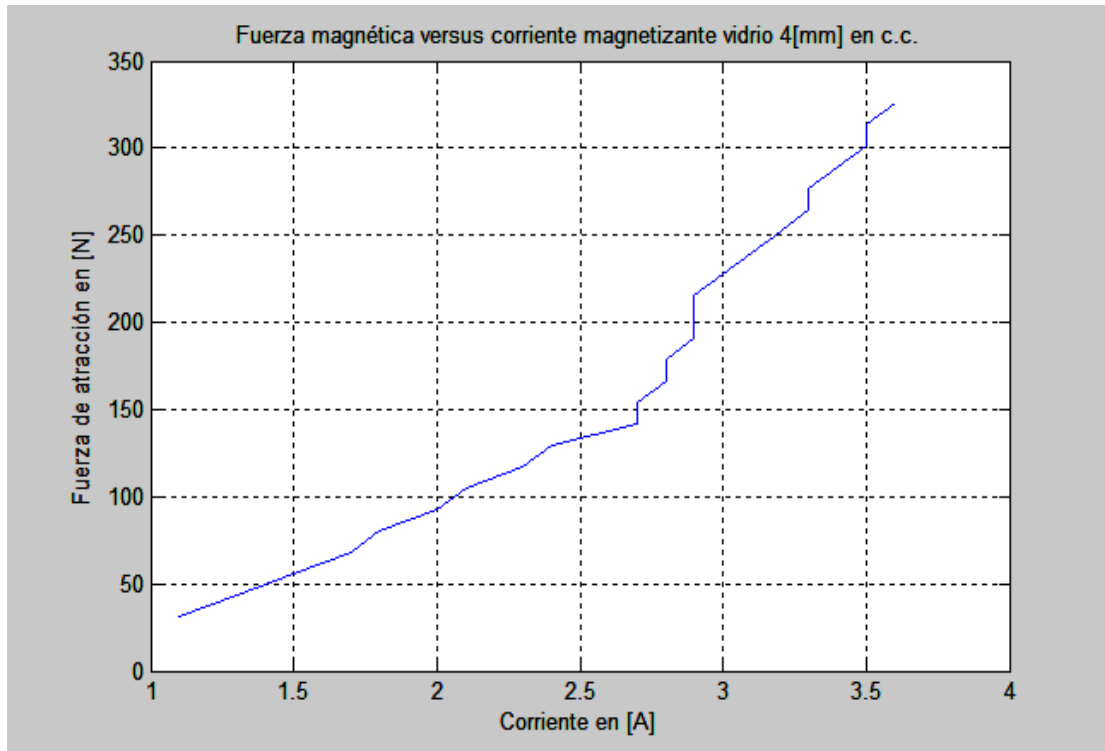
3.1	8.75	11.96	117.3276
3.2	10	13.21	129.5901
3.4	11.25	14.46	141.8526
3.6	12.5	15.71	154.1151
3.8	13.75	16.96	166.3776
3.9	15	18.21	178.6401
4	16.25	19.46	190.9026
4.1	17.5	20.71	203.1651
4.3	18.75	21.96	215.4276
4.3	20	23.21	227.6901
4.5	21.25	24.46	239.9526
4.6	22.5	25.71	252.2151
4.7	23.75	26.96	264.4776
4.9	25	28.21	276.7401
5	26.25	29.46	289.0026
5.1	27.5	30.71	301.2651
5.2	28.75	31.96	313.5276
5.3	30	33.21	325.7901

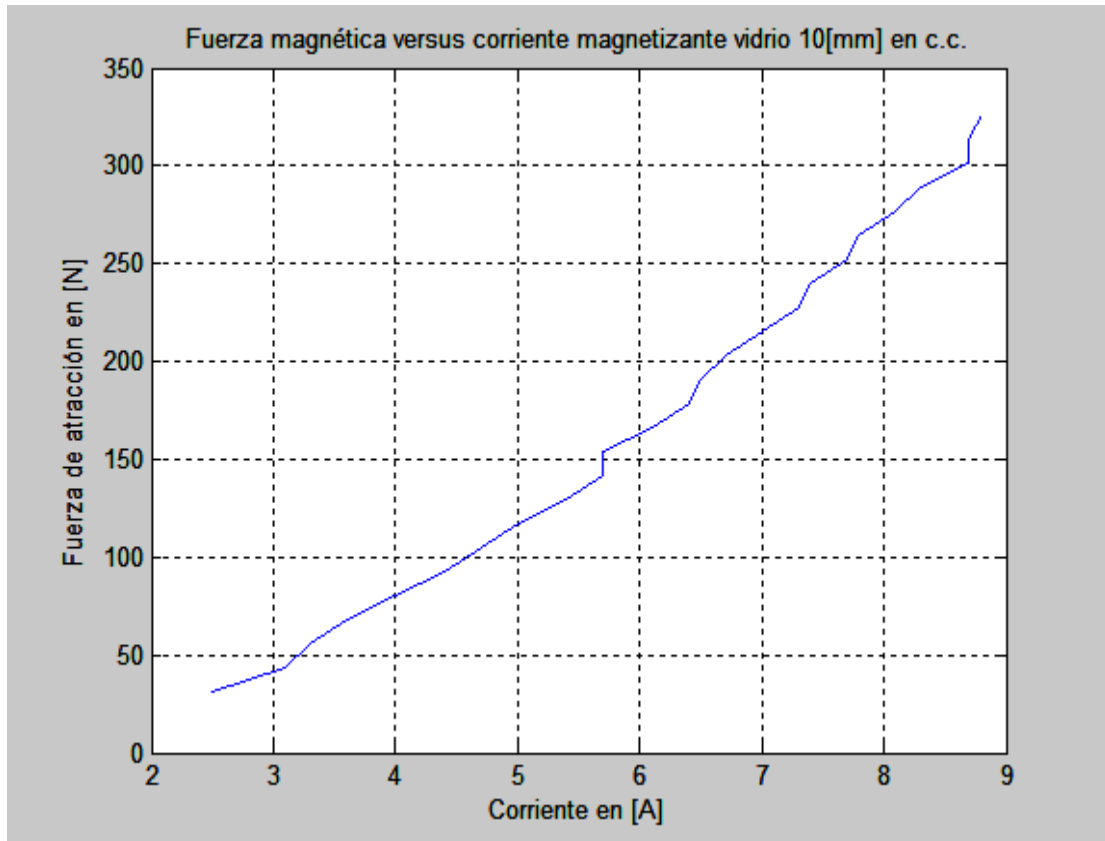
La siguiente tabla corresponde al caso del vidrio de 10 [mm] de espesor:

Corriente en [A]	Peso de los discos de pesa adicionados [kg]	Fuerza neta del electroimán en [kg]	Fuerza neta del electroimán en [N]
2.5	0	3.21	31.4901
3.1	1.25	4.46	43.7526
3.3	2.5	5.71	56.0151
3.6	3.75	6.96	68.2776
4	5	8.21	80.5401
4.4	6.25	9.46	92.8026
4.7	7.5	10.71	105.0651

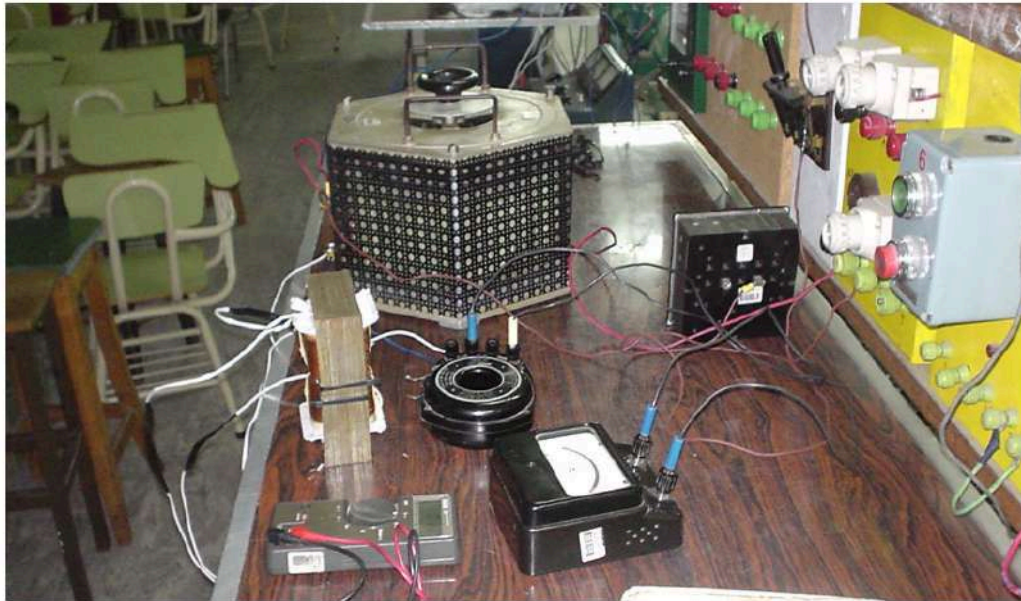
5	8.75	11.96	117.3276
5.4	10	13.21	129.5901
5.7	11.25	14.46	141.8526
5.7	12.5	15.71	154.1151
6.1	13.75	16.96	166.3776
6.4	15	18.21	178.6401
6.5	16.25	19.46	190.9026
6.7	17.5	20.71	203.1651
7	18.75	21.96	215.4276
7.3	20	23.21	227.6901
7.4	21.25	24.46	239.9526
7.7	22.5	25.71	252.2151
7.8	23.75	26.96	264.4776
8.1	25	28.21	276.7401
8.3	26.25	29.46	289.0026
8.7	27.5	30.71	301.2651
8.7	28.75	31.96	313.5276
8.8	30	33.21	325.7901

A continuación se muestran las graficas de corriente magnetizante en [A] versus fuerza de atracción entre electroimanes en [N] correspondiente al ensayo de corriente continua, el mismo fue realizado para tres diferentes espesores de vidrio 4 [mm], 6 [mm] y 10 [mm] respectivamente, los valores para la confección de estos gráficos fueron extraídos de las tres tablas precedentes de donde se tomaros los valore de la primera y cuarta columna de cada tabla para poder graficar el eje horizontal y el eje vertical respectivamente:





Por otra parte se le efectuó a los electroimanes un ensayo de vacío para poder determinar mejor las características del mismo. Seguidamente se muestra una fotografía donde se puede ver el conexionado para dicho ensayo:



Ensayo de vacío de los electroimanes

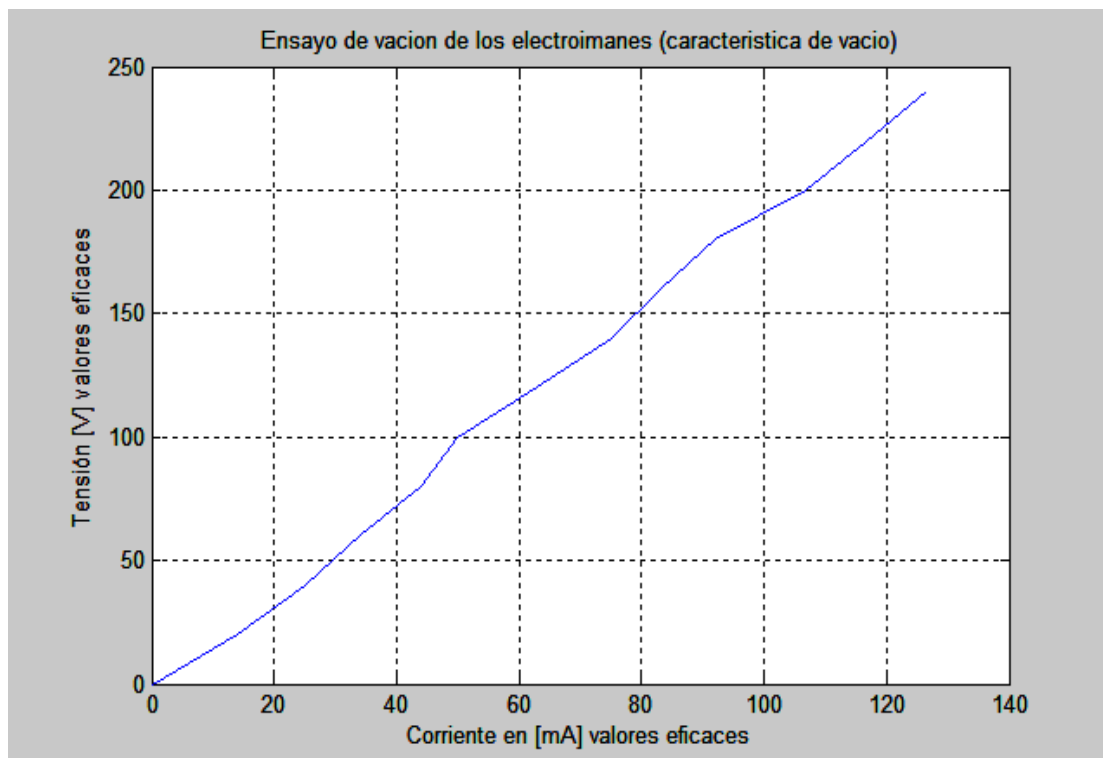
Para este ensayo se colocaron cabeza con cabeza los electroimanes, de modo que formaran una geometría de un transformador, sus bobinas estaban conectadas en serie con la misma disposición que para los ensayos de despegue de la fuerza, para la alimentación se utilizó un variac, al cual se le conectaron las bobinas de los electroimanes en serie con un TI (transformador de intensidad). Al TI se le conectó un amperímetro para tomar las mediciones de la corriente (para este ensayo el TI se conectó para amplificar el valor de la corriente). Para tomar los valores de tensión se utilizó un tester Fluke como voltímetro y se tomaron los valores a la salida del variac.

Seguidamente se muestra una tabla con los valores medidos de este ensayo:

tensión [V ef]	Corriente medida [A ef]	Escala de ampliación del TI	Corriente real [mA ef]
0	0	50/5	0
20	0.14	50/5	14
40	0.25	50/5	25
60	0.34	50/5	34
80	0.44	50/5	44
100	0.5	50/5	50
120	0.63	50/5	63
140	0.75	50/5	75
160	0.83	50/5	83
180	0.92	50/5	92
200	0.32	15/5	106.7
220	0.35	15/5	116.7
240	0.38	15/5	126.7

En la tabla anterior se muestran en la segunda columna los valores de corriente medidos, mientras que en la cuarta columna se muestran los valores reales de corriente, en la tercera columna se pueden observar la escala de amplificación que se utilizó para el TI. Los valores tomados para este ensayo son todos eficaces con la frecuencia de línea es de 50 [Hz].

A continuación se muestra una grafica de los valores de este ensayo:



De la última gráfica se puede apreciar que la característica es muy lineal, con lo que para determinar la característica de las chapas de los electroimanes se pueden utilizar los valores de los extremos.

Por lo tanto:

$$\Delta V = 240 \text{ [V]} - 0 \text{ [V]} = 240 \text{ [V]}$$

$$\Delta I = 126.7 \text{ [mA]} - 0 \text{ [mA]} = 126.7 \text{ [mA]}$$

De los electroimanes se tiene que la longitud media del recorrido del flujo magnético es de 19 veces la magnitud que se denominó en un apartado anterior del trabajo "a" (19 [mm]), el área que debe atravesar el flujo magnético es el de $2a \cdot c$, donde "c" (43 [mm]) también se determinó en ese apartado del trabajo.

Por lo tanto:

$$L = 19 * a = 19 * 19 \text{ [mm]} = 361 \text{ [mm]}$$

$$A = 2a * c = 38 \text{ [mm]} * 43 \text{ [mm]} = 1634 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$N = 800 \text{ vueltas (numero de espiras de los dos electroimanes)}$$

$$f = 50 \text{ [Hz]}$$

$$w = 2\pi * f = 314.16 \text{ [rad/seg]}$$

Entonces es posible a partir de estos datos calcular los valores del campo magnético H y la densidad de flujo magnético B y con ellos calcular la permeabilidad μ de las chapas de los electroimanes.

$$H = (\sqrt{2} * \Delta I * N) / L = (179.2 \text{ [mA]} * 800) / 361 \text{ [mm]} = 397.1 \text{ [A/m]}$$

$$B = (\sqrt{2} * \Delta V) / (N * w * A) = 339.4 \text{ [V]} / (800 * 314.16 \text{ [rad/seg]} * 1634 \text{ [mm}^2\text{]})$$

$$B = 0.826 \text{ [T]}$$

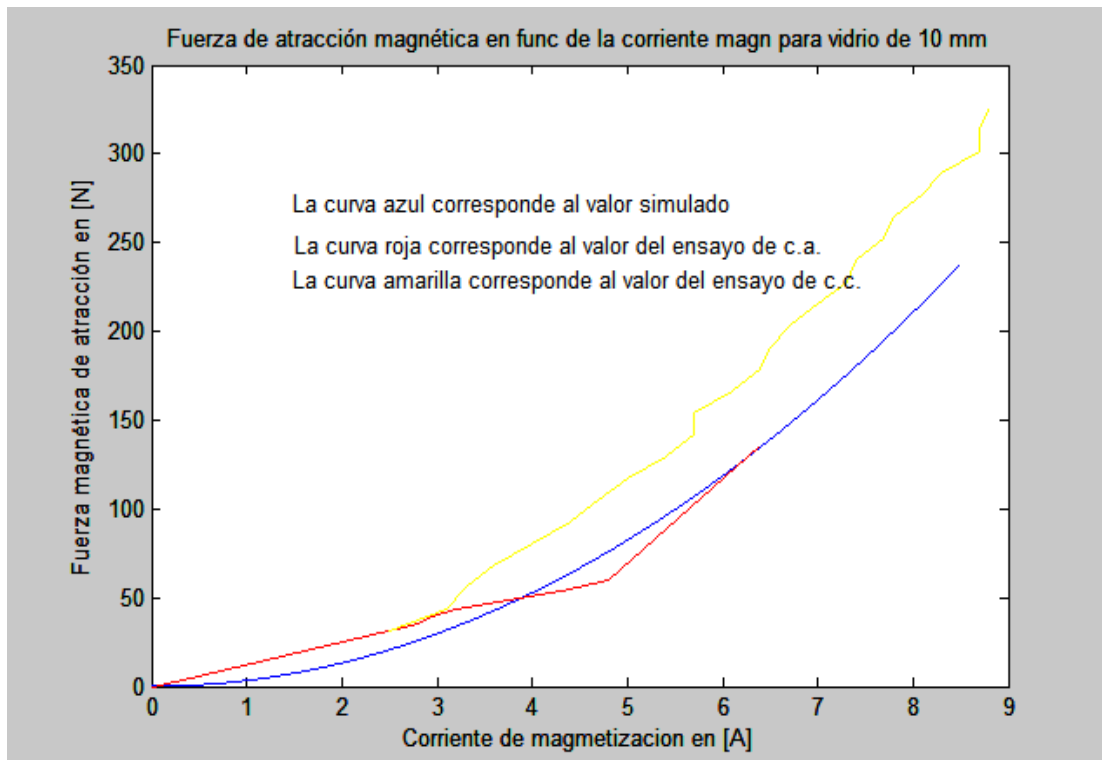
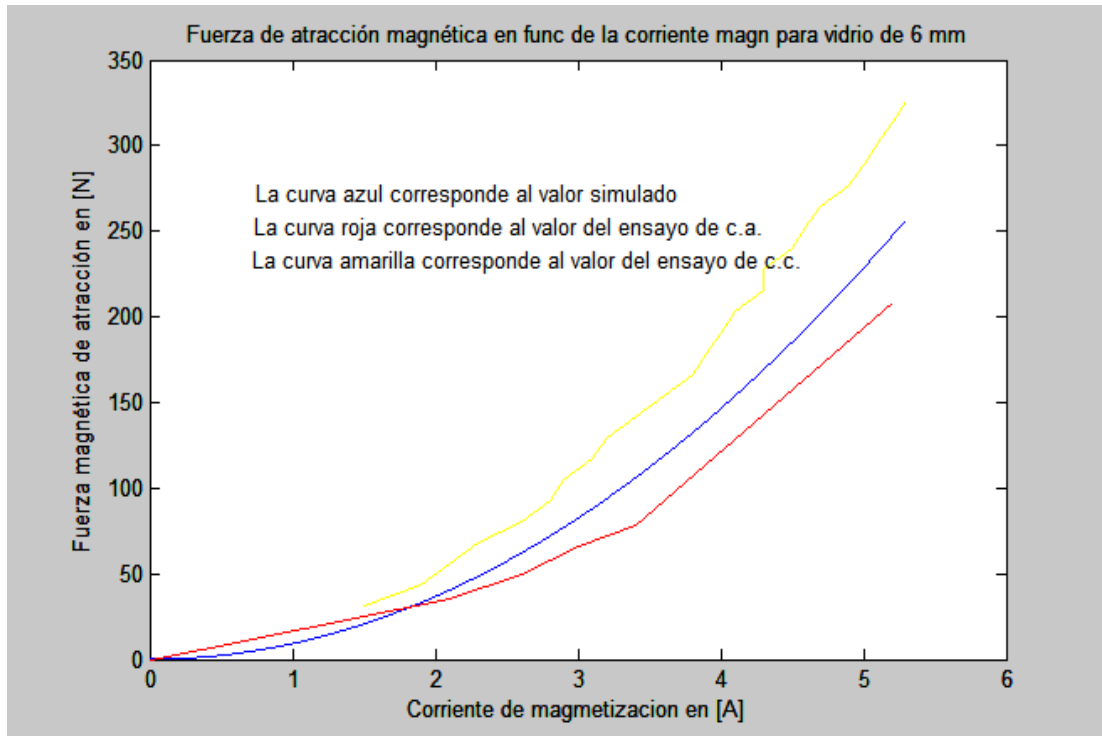
$$\mu = B / H = 0.826 \text{ [T]} / 397.1 \text{ [A/m]} = 2.1338 * 10^{-3} \text{ [H/m]}$$

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = 2.1338 * 10^{-3} \text{ [H/m]} / 12.566 * 10^{-7} \text{ [H/m]} = 1698$$

En los valores de arriba se incluyo el valor " $\sqrt{2}$ ", ya que para los cálculos se deben utilizar los valores pico.

Seguidamente se compararon los valores de los ensayos de fuerzas de atracción magnética con los valores de las simulaciones, esto se hizo para los vidrios de 6 [mm] y 10 [mm] de espesor.

Para realizar esta comparación en una misma grafica para cada espesor de vidrio se superpusieron las curvas halladas en los ensayos de corriente alterna, en los ensayos de corriente continua y en la simulación del archivo M de MATLAB. A continuación se muestran dichos gráficos:



De la comparación de los gráficos se deduce que los parámetros de diseño son correctos y que se los puede emplear para el diseño del equipo definitivo del trabajo, para esto en el próximo punto del trabajo utilizaremos los valores obtenidos

en el apartado de determinación de la fuerza necesaria para realizar la apertura del corte en la placa de vidrio.

Abreschnitt Master 1.0

Teniendo en cuenta los valores obtenidos de los ensayos del prototipo y sus comparaciones con los valores de las simulaciones, se obtiene un criterio para poder diseñar al equipo definitivo.

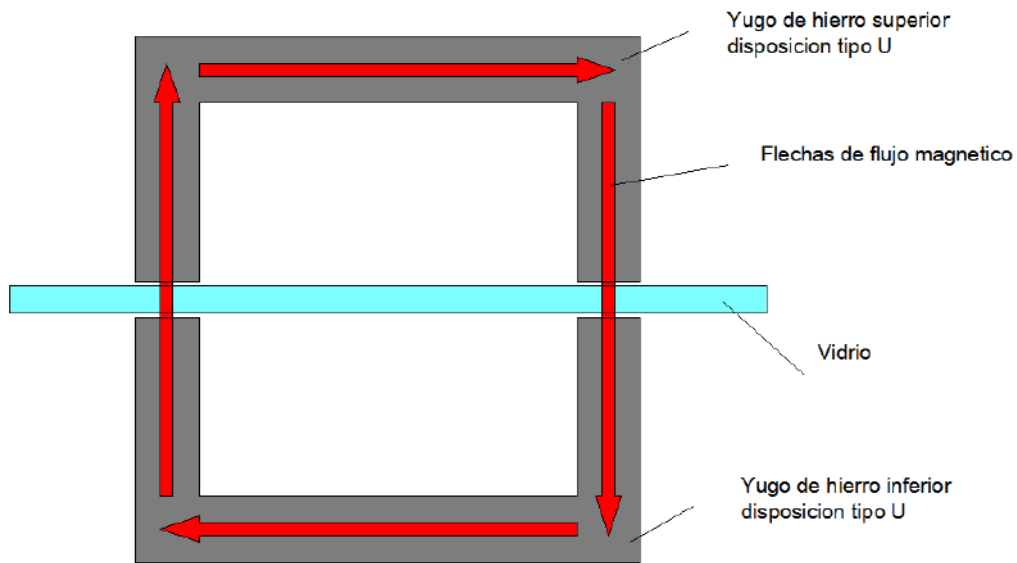
A su vez se utilizarán los valores de los ensayos donde se determinó la fuerza necesaria para producir la apertura de los cortes y la posición de los puntos de presión para poder dimensionar al equipo.

El equipo será diseñado para poder realizar apertura de cortes en placas de vidrio de 10 [mm] de espesor, ya que para mayores espesores los costos de construcción se incrementarían demasiado y además no se han podido realizar ensayos en espesores mayores debido a limitaciones económicas experimentales. Por otra parte en el vidrio de 10 [mm] de espesor se encuentra la mayor aplicación de un equipo como este en Argentina (en el exterior el espesor es ligeramente superior). En el caso de que se pretendan realizar aperturas de corte en placas de vidrio de menor espesor a 10 [mm], simplemente se deberá limitar la corriente eléctrica de trabajo con algún dispositivo.

Debido a imperfecciones y otras cuestiones que puedan surgir de la construcción de los distintos componentes se adopta un factor de seguridad igual a 2 que será aplicado a la fuerza necesaria para realizar la apertura del corte en las placas de vidrio.

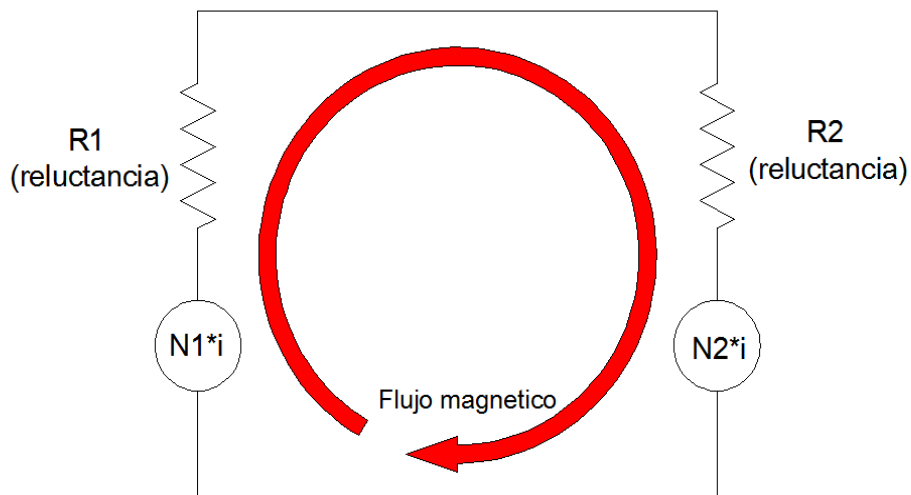
Del capítulo de determinación de la fuerza necesaria se determinó que para producir la apertura del corte en una placa de vidrio se necesitaban 700 [N], por lo tanto se tomara como fuerza F de diseño 1400 [N].

Posteriormente se determinó una configuración geométrica posible, teniendo en cuenta ya los aspectos funcionales y prácticos de los electroimanes, de donde la configuración tipo E utilizada en el prototipo se cambió a un diseño tipo U (como se mostrara en la próxima gráfica) ya que es fundamental para el mecánico una correcta observación del estado de propagación de la fisura, lo cual se vería dificultado si se utilizara una disposición tipo E. Seguidamente se mostrara una figura con la disposición tipo U y el camino que recorrerá el flujo magnético:



Disposicion tipo U de las yugos de hierro

Con esta disposición de los yugos magnéticos y considerando que en los yugos de hierro se colocaran dos bobinas conectadas en serie el circuito magnético quedara conformado de la siguiente manera como puede verse en la siguiente grafica:



Circuito magnetico de la configuracion tipo U

Con el circuito magnético en una disposición como la mostrada en la figura de arriba se procede al cálculo de la cantidad de área necesaria de los yugos de hierro, considerando un determinado número de espiras para cada bobina. El número de espiras utilizado en cada bobina es de 1800 vueltas con alambre de 0,80

[mm] de diámetro, este número surgió de la observación de la ocupación que tenían las espiras en el prototipo construido para los ensayos de comparación y de una iteración realizada en la optimización del diseño hasta llegar a este valor.

Luego de tener determinadas la fuerza y la cantidad de espiras se procedió a determinar el área necesaria, para ello se utilizó la fórmula desarrollada en el capítulo de análisis de la energía electromagnética y determinación de la fuerza de atracción siguiente:

$$F = \frac{N^2 \mu_0 A i^2}{2g^2}$$

Donde:

F: es la fuerza de atracción en [N]

N: es el número de espiras

μ_0 : es la permeabilidad del vacío (también se la considera como la del vidrio)

A: es el área normal de los electroimanes en [mm²]

g: es el gap de aire y vidrio en [mm] (en este caso dos veces el espesor del vidrio)

i: es la corriente en [A]

La corriente de trabajo considerada es de entre 5 y 6 [A], ya que para trabajo permanente se puede utilizar 4 [A] con el alambre utilizado y en este caso el trabajo es intermitente con periodos de reposo mucho mayores a los de trabajo, siendo que el periodo de trabajo nunca supera a los 10 [seg], no existe inconveniente en utilizar los valores de corriente mencionados. Por lo tanto el área necesaria será de:

$$1400[N] = \frac{3600^2 * 4\pi * 10^{-7} [N/A^2] * A * (5.5[A])^2}{2 * (20[mm])^2}$$

$$\Rightarrow A = \frac{1400[N] * 2 * (20[mm])^2}{3600^2 * 4\pi * 10^{-7} [N/A^2] * (5.5[A])^2} = 2273.4 [mm^2]$$

Con el valor de área necesaria determinado, se comenzó a ensayar posibles combinaciones dimensionales, posteriormente se observó que la medida de chapa laminada que se consigue en la industria que puede ajustarse convenientemente para lograr una configuración adecuada es la de 2" de espesor, es decir de 50.8 [mm] de espesor, con lo que será necesaria una dimensión de:

$$L1 = \frac{A}{e} = \frac{2273.4 [mm^2]}{50.8 [mm]} = 44.752 [mm]$$

Con lo que se adopta:

$$L1 = 45 [mm]$$

Con el valor del área determinada de las dimensiones de la misma se puede comenzar a dimensionar todo el electroimán. Para el diseño del electroimán, se tiene en consideración el lugar que tiene que ocupar sus elementos.

Por una cuestión de practicidad se decide colocar las dos bobinas en el yugo inferior, de este modo en el yugo superior es posible ahorrar peso y de evitar el cableado, quedando totalmente libre el yugo superior y se facilita de este modo su manipuleo en el momento de la operación del equipo al realizar la apertura de los cortes en las placas de vidrio.

La siguiente consideración que se tubo en cuenta para el diseño es la separación D de los puntos de presión 1 y 2, que fue determinada en el capítulo de Teoría de los tres puntos, determinación de su ubicación; donde se determinó una distancia de separación de los puntos de presión 1 y 2 D de 50 [mm].

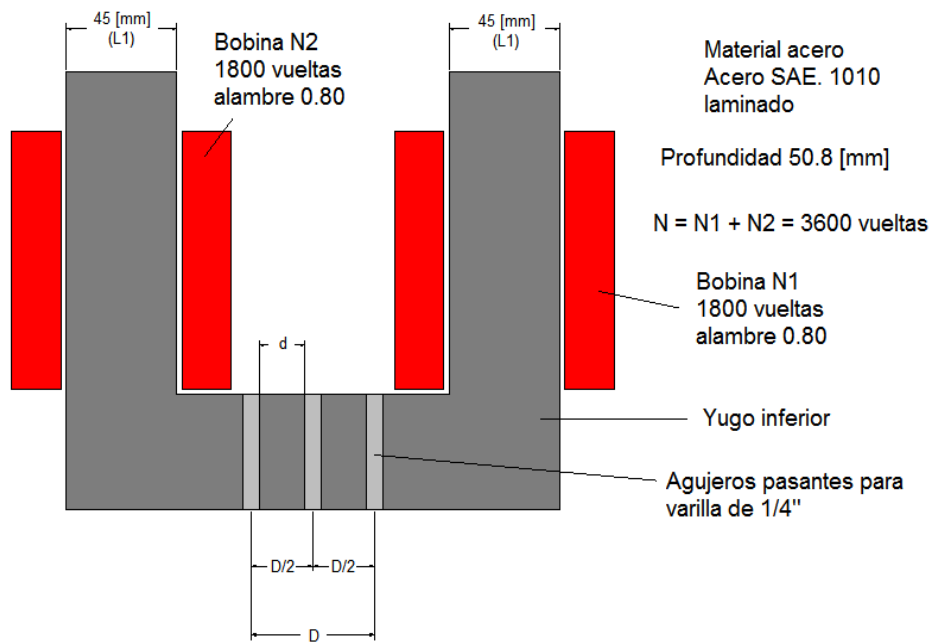
Para fabricar los puntos de presión 1, 2 y 3 del yugo inferior se utilizarán barrillas de acero SAE. 1045 de 1/4" de diámetro con roscas en una punta donde se colocaran una tuerca y una pieza de plástico delrin por cada barrilla.

Como las barrillas tienen 1/4" de pulgada de diámetro, es decir 6.35 [mm]; y la separación D es de 50 [mm], es decir que el centro de cada barrilla con el centro de la contigua está separada 25 [mm]; la separación entre las barrillas "d" será de:

$$d = \frac{D}{2} - 1/4'' = 25 [mm] - 6.35 [mm] = 18.65 [mm]$$

Con una separación d de 18.65 [mm] entre las barrillas no es posible que las bobinas queden entre ellas, al menos que se utilicen bobinados muy largos lo que sería muy impráctico. Por lo que se escogió que los yugos con sus bobinas queden por fuera de las varillas.

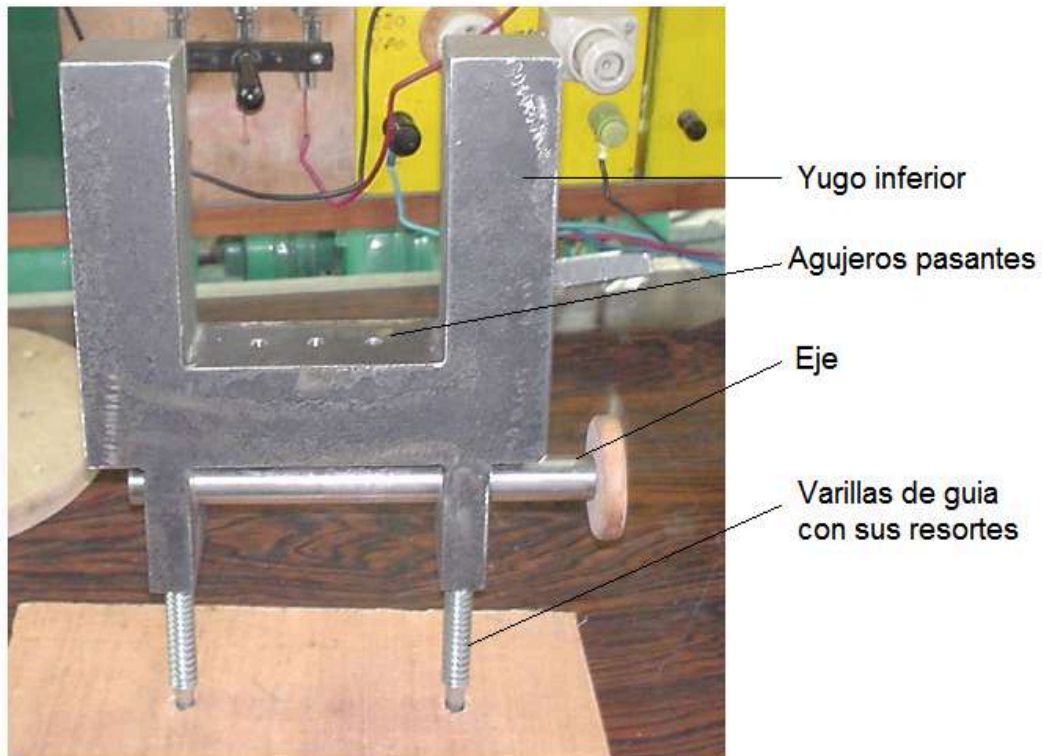
Posteriormente se comenzó a analizar la necesidad de las distintas dimensiones desde el yugo inferior como se muestra en la siguiente figura:



Primer diagrama esquemático del yugo inferior

Para lograr una distribución homogénea de las dimensiones y la cantidad requerida de espiras para los devanados, se realizaron bobinas que ocupaban dentro de los yugos 22 [mm] con carretes incluidos y su altura de 100 [mm]. Se considero una separación de 5 [mm] entre las varillas y las bobinas. Por sobre las bobinas se estipulo que el yugo inferior sobresaliera unos 25 [mm], como puede apreciarse en la figura de arriba.

Con las consideraciones dimensionales anteriores se procedió a dimensionar al yugo inferior, a estas dimensiones hay que agregarle unos soportes en la parte de abajo que soportaran u eje y unas barrillas de guías. El yugo puede apreciarse en la siguiente fotografía:



Fotografía del yugo inferior

En el yugo inferior se pueden apreciar que hay tres agujeros pasantes, esto es para que pasen a través de ellos tres varillas que en su parte inferior apoyaran sobre el eje y la parte superior esta roscada donde se soportan unas piezas de delrin que serán los puntos de presión 1, 2 y 3 para realizar la apertura del corte en la placa de vidrio. Las varillas no trabajan todas juntas, en un momento se utilizan las de los extremos como puntos de presión 1 y 2 mientras que el punto de presión 3 lo proporciona el yugo superior, en un momento posterior se utiliza la varilla del medio en el yugo inferior para que proporcione el punto de presión 3 mientras que los puntos de presión 1 y 2 son aportados por el yugo superior.

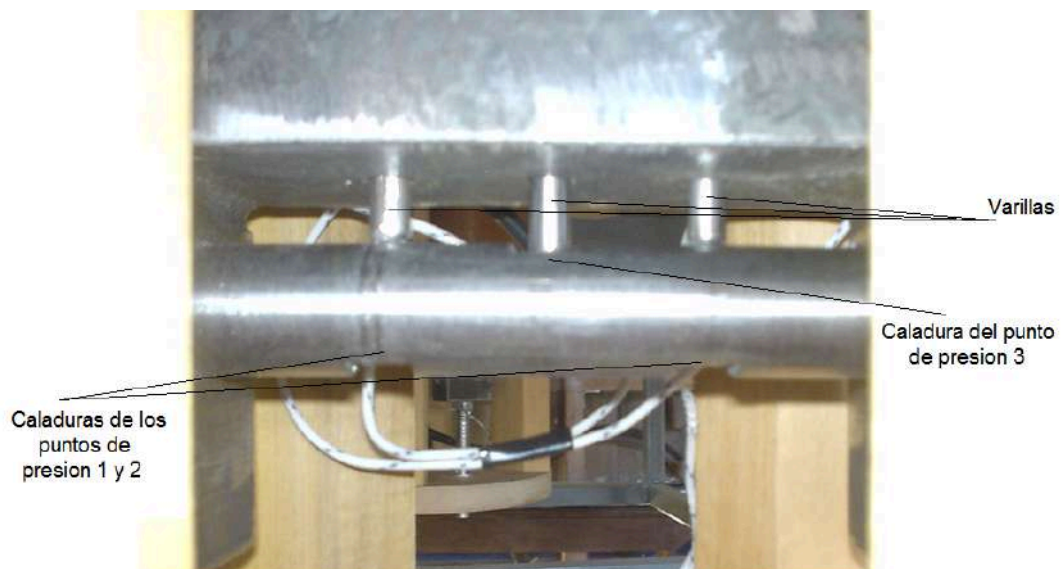
La selección de la utilización de los puntos de presión 1 y 2 o del punto de presión 3 en el yugo inferior se realiza con unas levas caladas en el eje que se puede apreciar en la fotografía de arriba. En la próxima fotografía se puede apreciar las levas caladas en el eje:



Caladuras del eje para seleccionar los puntos de presión

La fotografía de arriba se pueden apreciar las caladuras en los ejes, en este caso las varillas de los de los puntos de presión 1 y 2 están dentro de las caladura y por lo tanto no están trabajando y esta es la posición de trabajo que se denomina 1 en la que se esta usando el punto de presión 3 del yugo inferior.

En la fotografía que sigue se puede apreciar al eje en la otra posición de trabajo:



Segunda posición de trabajo del eje

En la fotografía de arriba se puede apreciar al eje en la posición de trabajo 2 donde la varilla del punto de presión 3 se introduce en la canaleta. Estas canaletas

tienen una profundidad de 2 [mm], lo que alcanza para que la varilla que no es necesaria en la etapa del trabajo que se encuentre la misma no interfiera cuando no tiene que hacerlo.

En la próxima fotografía se puede apreciar el método mediante el cual se selecciona la posición 1 o 2 de trabajo:



Selección de la posición de trabajo del yugo inferior

En la fotografía de arriba se puede ver la rueda que al girarla se puede seleccionar la posición de trabajo, siendo la 1 o 2 indicada por el número que se encuentra arriba.

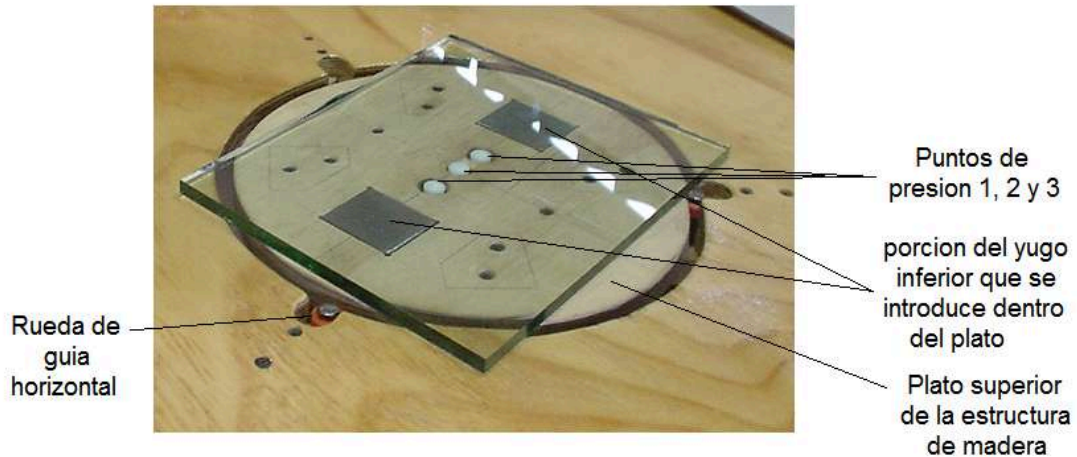
La alternación de los puntos de presión 1 y 2 por el punto de presión 3 se realiza para no tener que dar vuelta a la placa de vidrio cuando se le está realizando algún tipo de corte con forma, ya que como se explicó en la parte de los diferentes tipos de cortes, la fisura propaga hasta aproximadamente el 90% del espesor de la placa de vidrio y posteriormente hay que invertir la posición de los puntos de presión para poder terminar la fisura a traves de todo el espesor de la placa de vidrio.

En la fotografía de arriba también se puede apreciar la ubicación de la bobina dentro del yugo inferior y también se puede ver los resortes de soporte N° 72 colocados dentro de las varillas de guía de los yugos de 3/8" de diámetro por 4" de largo con una tuerca de regulación ya que la varilla posee 20 [mm] de rosca en su parte superior.

El yugo inferior se encuentra dentro de una estructura de madera, dentro de la cual tiene un solo grado de libertad en el que se puede mover en forma ascendente o descendente. Esta estructura de madera puede apreciarse en la fotografía de arriba y esta compuesta por dos platos redondos de madera uno en la parte superior y otro en la parte inferior de la estructura, estos platos de madera

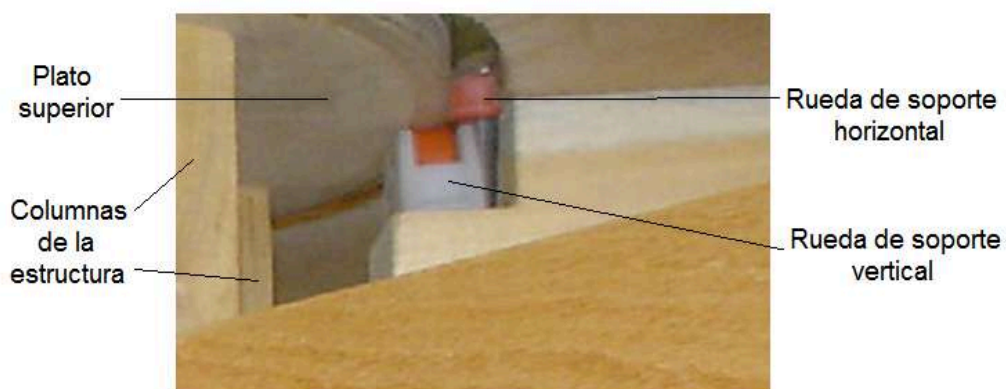
están sostenidos entre si por cuatro columnas de madera que se pueden ver claramente en la fotografía de arriba. En el plato inferior se introducen las varillas de guía que se pueden ver en la fotografía de arriba, mientras que en el plato superior se introducen las porciones del yugo que sobran por sobre las bobinas.

En la fotografía que sigue se puede ver al plato superior de la estructura y como se introduce el yugo en inferior en el mismo:



Plato superior de la estructura de soporte del yugo inferior

En la fotografía de arriba se puede ver indicada una de las ruedas de guía horizontal, en total son tres estas ruedas como puede apreciarse en la fotografía de arriba que están dispuestas a 120° una de la otra desde el centro del plato y como el plato esta torneado es posible hacerlo girar ya que además de las ruedas de guía horizontal hay tres ruedas de soporte vertical también dispuestas a 120° una de la otra desde el centro del plato como puede verse en la siguiente fotografía:



Rueda de soporte vertical de la estructura de contención del yugo inferior

Las ruedas de guía vertical están montadas dentro de portarueditas de plástico de ventanas de aluminio de la línea Herrero de Aluar de una rueda, en tanto que las ruedas de guía horizontal están montadas en bulones de $\frac{1}{4}$ " de 50 [mm]. Tanto el portarueditas como el bulon están montados sobre un taco de madera dura el cual esta montado a la mesa de trabajo mediante tornillos tipo aguja N° 2 de 2" que son los mismos con los que se armo la estructura de soporte del yugo inferior.

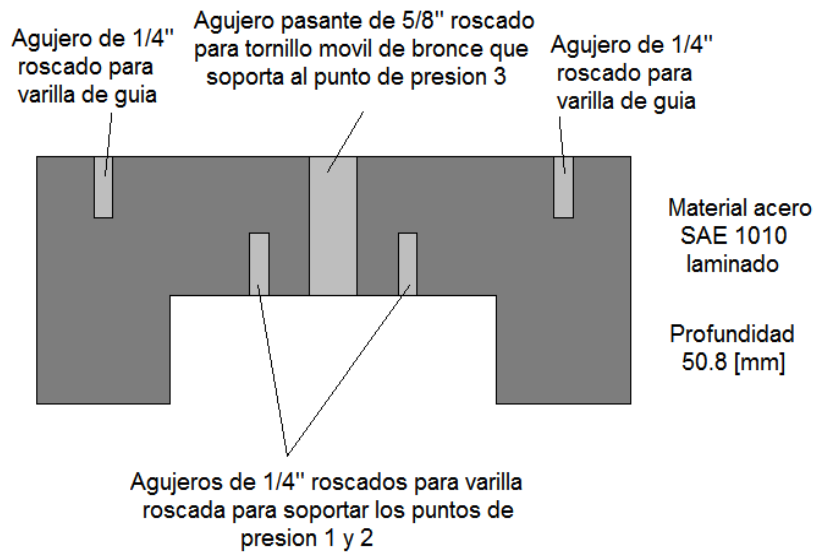
La fotografía que sigue muestra a las varillas donde están montados los puntos de presión 1, 2 y 3 y madera que auspicia de guía para las mismas unto con los agujeros pasantes que se encuentran en el yugo inferior:



Madera de guía para las varillas de los puntos de presión

En la fotografía se puede apreciar la madera de guía para las varillas que esta montado al plato superior. Tanto el eje como las varillas están construidas en acero SAE 1045 debido a que es un material de bajo costo y lo suficientemente duro como para evitar deformaciones o marcados en el momento de realizar las conmutaciones de las posiciones de trabajo y además porque para el tipo de maquinado que se le practica es más fácil trabajar con este material.

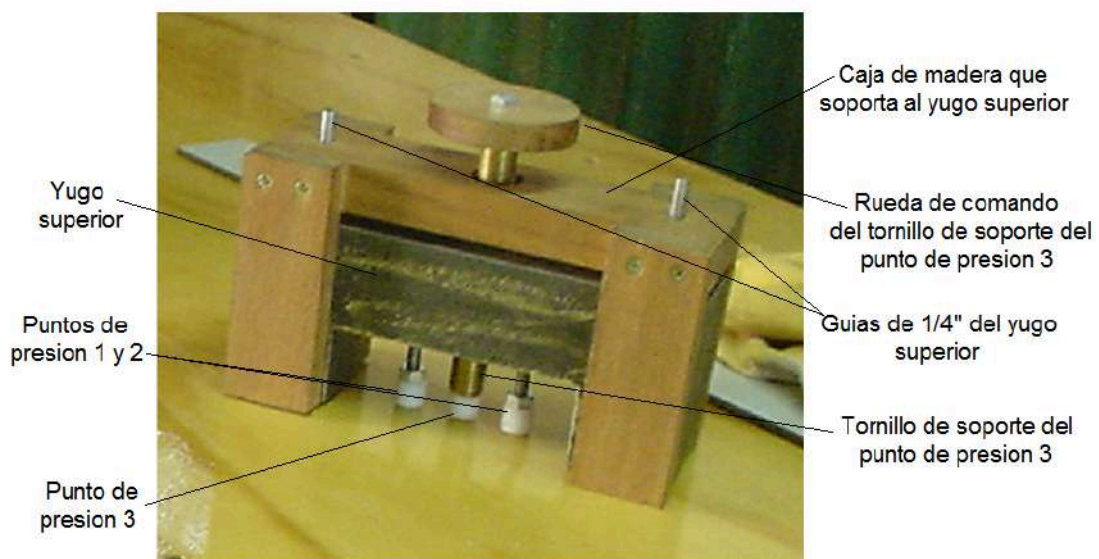
Por otra parte se construyo el yugo superior, este tiene una construcción mucho mas sencilla que la del inferior, en primer lugar deben coincidir los extremos de las U's de los yugos y en el centro del yugo superior debe quedar a suficiente distancia entre y la placa de vidrio para que permita una buena observación del estado de propagación de la fisura. La configuración geométrica del yugo superior se muestra en la siguiente figura:



Esquema del yugo superior

El yugo superior esta contenido en una caja de madera dura, dentro de la cual puede moverse y tiene dos agujeros de 1/4" para que pasen las varillas de guía y un agujero de 20 [mm] de diámetro para que pueda pasar libremente el tornillo que soporta al punto de presión tres del yugo superior.

Seguidamente se muestra una fotografía donde se puede observar al yugo superior dentro de la caja que lo soporta, con sus puntos de presión y sus varillas de guía:



Esquema de soporte del yugo superior

En la figura de arriba se puede ver al yugo superior dentro de su caja de soporte y el tornillo de comando del punto de presión 3 del yugo superior. Con el tornillo de comando se regula en primer lugar que punto de presión está trabajando, dependiendo del modo de trabajo que este en el yugo inferior, en segundo lugar el tornillo regula el estado tensional que se está aplicando a la placa de vidrio.

Cuando el yugo inferior se encuentra operando en la posición 1, el tornillo de comando del yugo superior puede regular el estado tensional que se le aplica a la placa de vidrio variando su altura, ya que cuando este tornillo se encuentra a la misma altura que los puntos de presión 1 y 2 del yugo superior no permite el tornillo que estos puntos de presión ejerzan fuerza contra la placa, a medida que se hace ascender al tornillo los puntos de presión pueden ir aplicando un esfuerzo mayor en la placa hasta llegar a su máximo debido a que se le permite deformarse elásticamente a la placa.

Cuando se hace trabajar al yugo inferior en la posición 2 trabajarán los puntos de presión 1 y 2 del yugo inferior así que cuando el tornillo está a la misma altura o superior de los puntos de presión 1 y 2 del yugo superior no se puede transmitir fuerza que genere una deformación elástica a la placa de vidrio, a medida que el tornillo comienza a descender este comienza a deformar a la placa y genere un estado tensional a la placa hasta llegar a su máximo.

Las tensiones que generan los puntos de presión sobre la placa de vidrio son las que se utilizan para hacer que se propaguen las fisuras generadas con el cortavidrios para cortar las placas de vidrio.

Para los yugos se ha utilizado acero macizo laminado SAE 1010, ya que la alimentación se realiza con corriente continua con lo que se evitan las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis. La opción de utilizar corriente continua se basa en el hecho de que la fabricación en material macizo es mucho más sencilla y económica, por otro lado la reactancia que generan las bobinas es elevada con lo que los valores de tensión necesarios para conseguir valores de corriente útiles serían excesivamente elevados y por último los resultados observados en los ensayos del prototipo mostraron que la corriente alterna provoca vibraciones que serían perjudiciales en la calidad del borde obtenido de la placa de vidrio.

La estructura de madera de soporte del yugo inferior está vinculada a una mesa de trabajo en la que puede girar libremente para alinearse con el corte del vidrio, sobre la mesa se puede ir moviendo al vidrio hasta situar a la zona marcada con el cortavidrios de la placa de vidrio en el lugar donde se necesita propagar la fisura, de esta manera se puede ir propagando la fisura por sectores en forma controlada y por tramos pudiendo realizar el corte que se desee. Seguidamente se muestra una fotografía de la mesa de trabajo:



Mesa de trabajo del Abreschnitt Master 1.0

En la fotografía de arriba se puede apreciar que hay dos estructuras de madera de soporte del yugo inferior, una estructura se encuentra en el centro de la mesa y la otra en un extremo de la mesa, esto es porque depende del trabajo que se este realizando en un momento se puede estar trabajando en un extremo de una placa de vidrio o en el centro de la misma; de tener una sola estructura podría suceder que una porción de la placa de vidrio quede fuera de la mesa al realizar la apertura del corte lo que es riesgoso para el mecánico y trae una gran probabilidad de rotura de la placa.

El cabezal superior (que es el conjunto del yugo superior con la caja de soporte y sus accesorios) puede trasladarse libremente pudiendo utilizarlo con cualquiera de las cabezales inferiores (que son el conjunto de cada yugo inferior, su estructura de soporte y sus accesorios) el central o el de la punta dependiendo de cual sea mas conveniente.

A la estructura de madera de los cabezales inferiores hay adosado un timón, el mismo es utilizado para poder alinear cómodamente al cabezal con la línea de corte trazada sobre la placa de vidrio. Dicho timón esta compuesto de cuatro maderas vinculada con varillas roscadas (fijas a las maderas) y mariposas a trabes de agujeros taladrados en las columnas de la estructura de madera de los cabezales inferiores. En la siguiente fotografía se puede ver a los timones colocados en las estructuras:

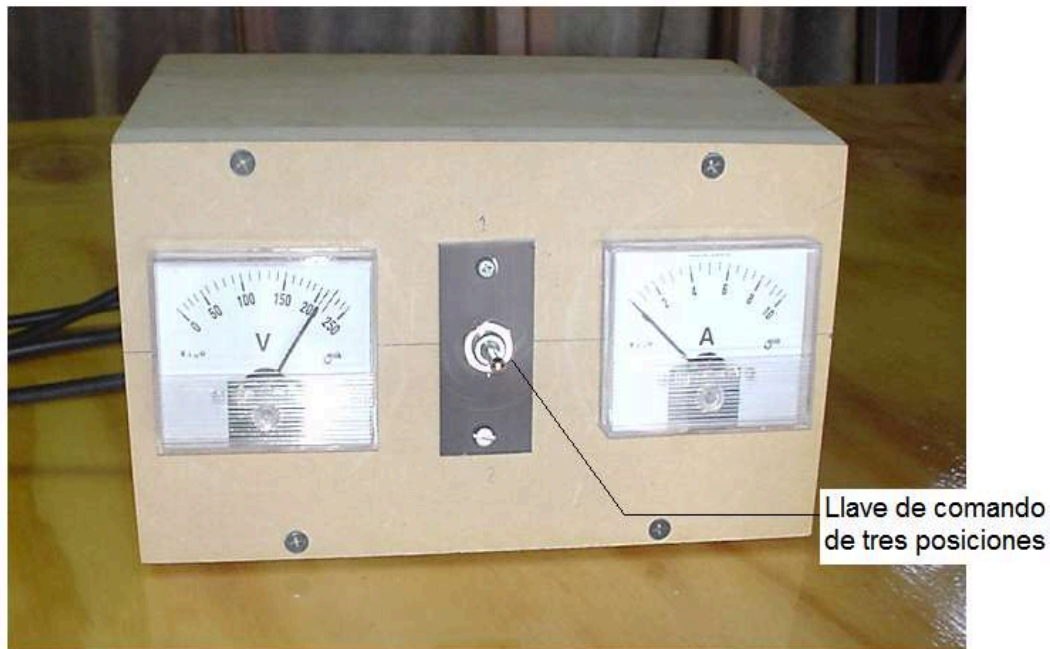


Timones de posicionamiento de los cabezales inferiores

En la fotografía de arriba se puede ver a los timones de los cabezales inferiores, los mismos están colocados a diferentes alturas de modo que uno no interfiera con el otro al girar.

La estructura de la mesa esta hecha en caño estructural 40 * 40 [mm] de 1.6 [mm] de espesor de chapa, la estructura se realizo con este material para que pueda mantener la planimetría en la parte superior, ya que para el trabajado de las placas de vidrio es fundamental que la planimetría del plano de trabajo sea lo mas perfecta posible. Sobre la estructura de tubo estructural se coloco una placa de terciado fenolico de 18 [mm] de espesor de 122 * 244 [cm] y los centros de los cabezales inferiores se encuentran uno en el centro de la placa y el otro centrado desde los bordes mas largos y a 50 [cm] de uno de los bordes mas cortos, se escogió madera terciada para la tapa ya que esta podía soportar el peso de los cabezales sin ningún problema.

En las dos fotografías de arriba se puede observar al pedal de comando, este es un pulsador Neumann que acciona sobre la caja de comando y medición la que puede observarse en la siguiente fotografía:

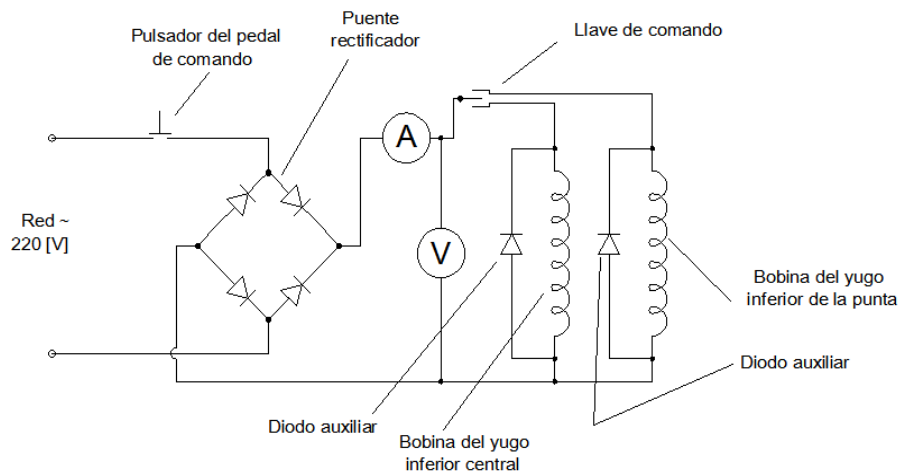


Caja de comando y medición del Abreschnitt Master 1.0

La caja de comando y medición tiene una conexión a la red de 220 [V] y corriente alterna, dentro de ella hay un puente rectificador de diodos de 6 [A] de onda completa, luego del puente se conectan a trabes de la llave de comando las bobinas de los yugos inferiores. Con la llave de comando se pueden elegir una de tres posiciones, cuando la llave de comando se encuentra en la posición central y se pulsa el pedal de comando solo se puede leer la tensión que se encuentra a la salida del puente y no circula corriente por las bobinas de los yugos inferiores, al mover la palanca de la llave de comando para arriba o abajo se escoge la bobina de un cabezal inferior o el otro.

Los instrumentos de medición son marca Escala, de hierro móvil, clase 5, clase de aislamiento de hasta 500 [V] y con alcances de 250 [V] y 10 [A] como puede verse en la fotografía de arriba.

Seguidamente se muestra un esquema circuítal de la caja y las conexiones de las bobinas:



Esquema circuital de comando eléctrico de los electroimanes

En el esquema circuital de arriba se puede ver como opera la caja de comando. Dentro de la caja se encuentran los instrumentos, el puente rectificador, la llave de comando y los diodos auxiliares. La caja de comando se conecta a la red y a la caja se conectan las bobinas de los yugos inferiores y el pedal de comando.

En el esquema eléctrico de arriba se puede observar que conectados en paralelo a las bobinas se encuentran unos diodos auxiliares, los mismos están debido a que en el momento de interrumpir el circuito, cuando por el mismo está circulando la corriente de trabajo, se produce un pico de tensión muy elevado si no se encuentran estos diodos debido a la brusca variación de corriente en el circuito. Con estos diodos auxiliares encuentra la corriente un camino auxiliar por donde circular en el momento de interrumpir el circuito y no afectan en el momento del trabajo.

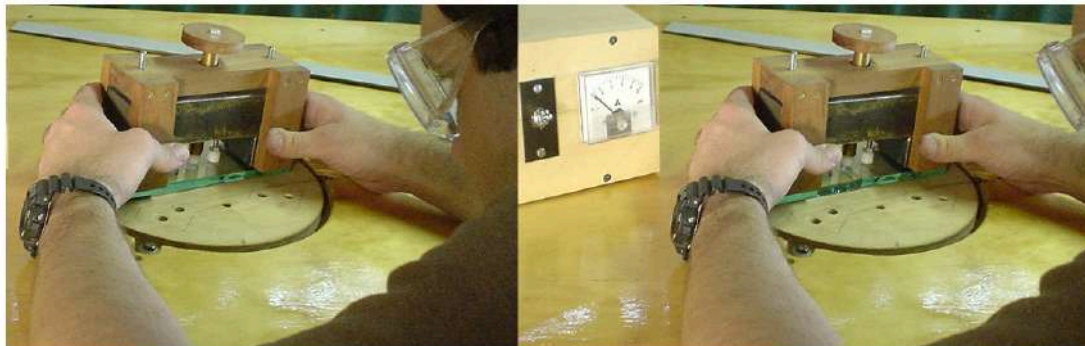
Para la construcción de las bobinas para los yugos inferiores, se construyeron adaptadores especiales de madera para bobinar en donde se adaptaron carretes 155 E de donde se utilizaron dos carretes para fabricar uno. Para la fabricación de los carretes se le cortó una de las bases a cada carrete y posteriormente se los cortó al medio para montarlos sobre el adaptador de madera y se les pegó con la gotita de poxipol un pedazo de pertinax. En la fotografía que sigue se puede ver a una bobina dentro de su adaptador de madera:



Bobina con su adaptador de madera dentro

El adaptador de madera no solo sirve para bobinar las bobinas sino que además sirve para colocar posteriormente las bobinas en los yugos inferiores.

A continuación se muestra una secuencia de fotografías donde se puede ver al Abreschnitt Master 1.0 realizando la apertura de un corte en un pedazo de vidrio de 10 [mm] de espesor:



Secuencia de apertura de un corte de un pedazo de vidrio de 10 [mm]

En la fotografía se puede apreciar a la izquierda al pedazo de vidrio aun no quebrado y a la derecha ya quebrado. Las fotografías fueron tomadas desde la misma posición un instante antes y un instante después de energizar la bobina del yugo inferior central.

Conclusiones

El equipo Abreschnitt Master 1.0 y sus posteriores evoluciones permitirán que se pueda realizar el proceso de corte en condiciones más seguras de trabajo, así como también una reducción en el costo del proceso de corte y en procesos posteriores como el de pulido, ya que logrando un corte más preciso se evitara tener que cortar en exceso la pieza con un posterior desbastado hasta llegar a la dimensión requerida de la pieza, todo esto llevara a un beneficioso ahorro de tiempo, ahorro de materia prima y a un aumento en la calidad del producto, que incluso se podrá ver reflejada en procesos como el de templado.

La experiencia adquirida en el diseño y construcción del Abreschnitt master 1.0, junto con los prototipos y sistemas construidos durante el trabajo y los datos recolectados en el trabajo servirán para el diseño y construcción de futuras maquinas para el trabajado de las placas de vidrio en diferentes procesos mecánicos como por ejemplo el de pulido donde se espera el año próximo comenzar un nuevo diseño.

Apéndice 1, normas IRAM referentes a los vidrios planos

- IRAM 12543:1990 Vidrios planos de seguridad. Método para la determinación de los apartamientos con respecto a una superficie plana.
- IRAM 12551:2003 Espejos para uso en la construcción
- IRAM 12556:2000 Vidrios planos de seguridad para la construcción.
- IRAM 12559:1989 Vidrios planos de seguridad para la construcción. Método de determinación de la resistencia al impacto.
- IRAM 12565:1994 Vidrios planos para la construcción para uso en posición vertical. Calculo del espesor conveniente de vidrio vertical sustentado en sus cuatro bordes.
- IRAM 12572:1989 Vidrios de seguridad planos, templados, para la construcción. Método de ensayo para la fragmentación.
- IRAM 12573:1989 Vidrios de seguridad planos, laminados, para la construcción. Método para la determinación de la resistencia a la temperatura y a la humedad.
- IRAM 12577:1995 Doble vidriado hermético. Ensayo de condensación.
- IRAM 12580:1995 Doble vidriado hermético. Ensayo de estanqueidad.
- IRAM 12595:2000 Vidrio plano de seguridad para la construcción. Practica recomendada de seguridad para áreas vidriadas susceptibles de impacto humano.
- IRAM 12596:1999 Vidrios para la construcción. Practica recomendada para el empleo de los vidrios de seguridad en la construcción.
- IRAM 12597:2005 Doble vidriado hermético Buenas practicas de manufactura. Recomendaciones generales.
- IRAM 12598-1:2005 Doble vidriado hermético. Parte 1: Características y requisitos.
- IRAM 12598-2:2005 Doble vidriado hermético. Parte 2: Método de ensayo.
- IRAM 12599:1994 Doble vidriado hermético. Ensayo de envejecimiento acelerado.
- IRAM 12840:1998 Vidrios para techos. Practica recomendada acerca de su uso.
- IRAM 12841:1998 Vidrios de seguridad, antibala y antiintrusion.

Normas MERCOSUR adoptadas

- IRAM-NM 293:2004 Terminología de vidrios planos y los componentes accesorios a su aplicación.
- IRAM 12574 NM 294:2004 Vidrio flotado.

Normas IRAM en estudio

- EA IRAM 12843:2004 Vidrio plano para la construcción. Vidrio templado. Requisitos y métodos de ensayo.
- EA IRAM 12844:2004 Vidrios planos para la construcción. Vidrios laminados. Requisitos y métodos de ensayo.

Apéndice 2, Instrumental eléctrico utilizado

- Tester Presicion one twenty 120
- TI: EKM 15-50/5[A]
- Amperímetro : RB clase 0,5 alcance 5[A]
- Tester digital Fluke
- Pinza amperometrica digital Kung Young
- Variac 0 – 250 [V] 50 [Hz]
- Fuente de corriente continua: RB entrada 220 [V] 50[Hz]
salida 0 – 250 [V] 0 – 15 [A] c.c.

Apéndice 3, reciclado del vidrio.

El vidrio es un material totalmente reciclable y que no afecta al medioambiente.

El vidrio puede ser usado una y otra vez, el tipo de uso depende del contenido de los óxidos que contenga en su composición química ya que el aislamiento o la falta de un óxido determinado afectará a la economía del proceso que se quiere lograr.

En la industria se denomina casco de vidrio al vidrio que se va desperdiciando por roturas o ajustes de medidas, este casco de vidrio procede de la propia fábrica de vidrio o de fuentes externas.

El casco de vidrio es molido en un polvo fino, y dependiendo del tipo de vidrio varía su granulometría, este polvo se lo introduce directamente en el horno de fusión lo que contribuye a bajar la temperatura necesaria de fusión de todo el conjunto donde entran piedra caliza molida, arena (SiO_2) y feldespato potásico principalmente.

El casco de vidrio es el elemento mediante el cual se recicla al vidrio, los porcentajes de uso del casco de vidrio son muy variados, van desde el 10% al 80% en países como Alemania o Suiza y siguen incrementándose, en teoría es posible utilizar el 100%.

En el caso de la Argentina el vidrio float (flotado) es producido con casco propio de la fábrica ya que el casco externo proveniente de las vidrierías se encuentra muy contaminado y no es cómicamente conveniente limpiarlo para reutilizarlo este casco externo se lo utiliza para la fabricación de vidrios de color y fundamentalmente botellas.

En los países del primer mundo se tiene un contenedor especial en los comercios dedicados a trabajar con vidrio para el float y los porcentajes de reutilización como casco de vidrio float son muy altos.

También en los países del primer mundo se tienen contenedores separados para los distintos colores de vidrios con lo que se logra que el casco de vidrio de cada color sea muy aprovechado.

Apéndice 4, análisis económico.

Los gastos principales para la construcción del Abreschnitt Master 1.0 se deben a los materiales de construcción, que se detallan a continuación:

- Caño estructural = 260 \$
- Electrodos = 16\$
- Pintura = 52 \$
- Acero laminado SAE 1010 = 255\$
- Alambre de cobre 0.80 = 360\$
- Carretes 155 E = 18 \$
- Pegamento para los carretes = 9\$
- Acero SAE 1045 para ejes y varillas = 22\$
- Bronce para tornillo de comando = 11\$
- Resortes N° 72 = 9\$
- Tornillos y bulones = 110\$
- Cables = 17\$
- Pulsador a pedal = 62\$
- Llave de comando = 16\$
- Instrumentos = 182\$
- Enchufes macho y hembra, diodos, cinta aisladora = 30\$
- Tabla de terciado fenolico = 89\$
- Madera para estructuras = 50\$
- Plástico delrin = 7\$
- Combustible = 50\$

TOTAL MATERIALES = 1625\$

La mano de obra no está contemplada ya que la construcción se realizó enteramente por el alumno, con ayuda de carpinteros amigos, la gente del taller de la facultad y el Ingeniero Claudio Dimenna. La mano de obra es muy calificada por lo que se estimara su costo a partir de los materiales de construcción con un factor de 1.5.

COSTO M.O. (estimado) = $1625\$ \cdot 1.5 = 2437\$$

⇒ COSTO TOTAL = 4062 \$

Con el costo total calculado se puede determinar un valor estimado de venta multiplicando al costo total por 2 con lo que se obtiene un valor de venta estimado en:

⇒ VALOR DE VENTA ESTIMADO = 8100\$

En la industria se tiene un factor de aprovechamiento del vidrio del 90%, en el caso de tratarse de cortes con forma el factor de aprovechamiento se reduce drásticamente a cerca del 70% e incluso llega a ser inferior, esto se debe a que las técnicas para cortar vidrios con forma recurren a cortar mayormente al vidrio en exceso y ir arrimando al vidrio a la medida deseada mediante cortes sucesivos además del vidrio que ya se pierde por la forma. Uno de los objetivos del Abreschnitt Master 1.0 es aumentar el aprovechamiento de las planchas de vidrio al realizarle cortes con forma en primer lugar evitando los cortes sucesivos de arrimación y en segundo que los sobrantes de los cortes puedan llegar a ser aprovechados de mejor manera.

Con el Abreschnitt Master 1.0 se puede estimar una reducción del 50% de la pérdida en los cortes con forma, con lo cual el desperdicio se reduciría del 30% al 15%.

Una plancha de vidrio de 10 [mm] de espesor tiene 9 [m²] con un costo de 50\$ más IVA por [m²], con ello es posible calcular un ahorro de 67.5\$ más IVA de ahorro por cada plancha que se corte con forma, es decir que la máquina se pagaría luego de cortar 120 planchas de vidrio, con lo que se puede considerar que en un taller con suficiente movimiento esta cifra de planchas se puede llegar a cortar dentro del plazo de un año.

Agradecimientos

La cantidad de personas que debo agradecer es muy basta, con lo cual voy citar solamente una pequeña parte, pero todos están en mi corazón.

En primer lugar quiero agradecer a mis tutores Ing. Aníbal Márquez e Ing. Mario Macri, que me han guiado en todo el trabajo y enseñado mucho, y gracias a ellos puede lograr cumplir con un sueño muy anhelado, como fue el diseñar y construir la maquina Abreschnitt Master.

También quiero agradecer especialmente al Ing. Claudio Dimenna, que me dio una gran mano en la construcción y análisis de distintas partes de la maquina Abreschnitt Master y otros prototipos.

A la gente del taller de la facultad que me torneó y agujereó los ejes, tornillo de comando y los yugos; entre otras cosas.

A mi novia Laura, por su paciencia y porque siempre que pudo me dio una mano, como también su papa David y su tío Gerardo que me dieron una gran mano para soldar y construir piezas para la maquina.

A toda mi familia

Y a mi hermano Walter que es la persona que más me apoyo, incluso antes de aprobar el ingreso a la facultad.

A todos muchas gracias

Gerardo.

Bibliografía

- Manual del vidrio plano (CAVIPLAN)
- Los vidrios (Eduardo Mari)
- Maquinas Electricas (A. E. Fitzgerald)
- Mecanica de materiales estructurales. (J. L. Otegui)
- Mecanismos (Falco y Lauria)
- Manual Casillas
- Diseño de maquinas. Robert L Norton (Pearson)
- Seminarios Bohle
- Apuntes del Museo de la ciencia. Munich Alemania.
- Ajustes y Tolerancias selección y empleo (Monografías CEAC)
- MATLAB 5 for Engineers (Adrian Biran and Moshe Breiner)
- Dynamic simulation of electrical machinery (Chee-Mun Ong)
- www.bohle.de
- Vidriería Argentina S_A2.htm
- www.norton-abrasivos.com.ar