

DATOS PERSONALES

NOMBRE Y APELLIDO: Fernando Borda

DNI: 32.097.273

FECHA DE NACIMIENTO: 27 de enero de 1986

LUGAR DE NACIMIENTO: San Nicolás de los Arroyos (Prov. Bs. As.)

DIRECCIÓN: 9 de Julio 418, San Nicolás de los Arroyos, Bs. As.

TELÉFONO: +54 0336 4456386

TELÉFONO CELULAR: +549 336 154549182

EMAIL: fernandoborda_86@yahoo.com

ÍNDICE

1. Diagnóstico, objetivo, contenido del proyecto..... 7

Cuadro del proyecto..... 8

Alcances..... 9

2. Mapa conceptual del diseño..... 10

DESARROLLO TEÓRICO

3. Fusión del material dentro del sólido..... 13

4. Selección del tipo de energía de transporte..... 18

 Requisitos..... 18

 Elección del tipo de energía..... 20

 Conclusión sobre el tipo de energía a transportar..... 20

5. Transformación de la energía de transporte en calor..... 21

 Alternativa n°1..... 21

 Alternativa n°2..... 22

 Alternativa n°3..... 23

 Selección de la mejor alternativa..... 24

 Viabilidad de la propuesta..... 25

6. Desarrollo de la propuesta..... 27

 Determinación de espesores de borde de grano. Ensayo UFT..... 27

 Densidades límites de propagación y confinamiento..... 29

 Condición estacionaria de la onda longitudinal..... 30

 Longitud de onda longitudinal..... 31

 Amplitud de onda longitudinal..... 31

 Necesidad de múltiples ondas auxiliares..... 32

 Relación entre densidad y parámetros de onda auxiliar..... 33

 Dominio del parámetro Ω_L y frecuencia f_t 37

Tiempo de confinamiento.....	40
Penetración de la onda portadora en la zona de superposición.....	42
Geometría del volumen de fusión.....	55
Elección de la frecuencia de onda auxiliar.....	57
Ciclo de calentamiento y fusión.....	57
Mecanismo de transformación de la energía. Ensayo de absorción.....	58
Energía aportada al punto caliente.....	59
Amplitud de la onda portadora.....	61
7. Transporte de energía dentro del sólido.....	62
Pérdidas por absorción.....	62
Divergencia del haz.....	63
8. Geometría del sólido a procesar.....	66
9. Características del transductor.....	67
Consideración de la distancia focal.....	69
Modos de excitación y sistema de transductores.....	70
Movimiento del punto de fusión.....	70
Características de los motores paso a paso.....	72
10. Control de convergencia.....	73
Cálculo del punto de convergencia vs control de lazo cerrado.....	73
11. Vaciado del material fundido.....	75
Propuestas para el vaciado del material líquido.....	75
Control de vaciado mediante el sistema de control de geometría.....	77
Utilización del material extraído.....	77
12. Sistemas principales y auxiliares. Cálculo de energía.....	78
Condiciones de estudio.....	78
Sistema de generación ultrasónica.....	79
Generación de onda portadora.....	79

Generación de onda auxiliar	81
Sistema de movimiento de transductores.....	83
Sistema de vaciado de material.....	84
Consumo total de energía.....	84
Aclaraciones.....	84
13. Aplicabilidad.....	85
Tratamiento térmico localizado.....	85
Soldadura.....	85
14. Estudio de costos y rentabilidad.....	86
Estimación de costos.....	86
Rentabilidad del proyecto.....	87
Procedimiento de análisis de inversión.....	89
CONCLUSIONES	
Conclusión técnica.....	91
Conclusión académica.....	91
Conclusión general.....	91
ANEXOS	
Anexo A: Algoritmo de simulación de MATLAB.....	93
Anexo B: Algoritmo de simulación de MATLAB.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	101

PROCESAMIENTO SIN CONTACTO

CAPÍTULO 1. DIAGNÓSTICO, OBJETIVO, CONTENIDO DEL PROYECTO, ALCANCES

DIAGNÓSTICO

Actualmente no existe un proceso adecuado para el procesamiento interior de piezas. La geometría y dimensiones en un mecanizado interior están limitadas por la herramienta de corte y el proceso empleado. Con los avances tecnológicos que se están desarrollando actualmente, a pasos agigantados, considero necesario el desarrollo de nuevas tecnologías para que la geometría y dimensiones en la manufactura de piezas no se vea limitada de la manera en que lo está hoy en día.

OBJETIVO

Con el fin de aportar una base para lograr un salto tecnológico en el procesamiento de materiales, desarrollaré en la presente tesis una alternativa que tendrá su aplicación tanto en la fusión y extracción de material (exterior e interior), como en tratamiento térmico y soldadura. Lo innovador en esta idea de proceso, será la posibilidad de lograr geometrías y dimensiones con mucha mayor libertad que en los procesos actuales, y sin contacto físico de herramienta alguno sobre la pieza.

CONTENIDO DEL PROYECTO

El presente proyecto es el desarrollo de una nueva tecnología. Esto implica que primero se investigará la forma de lograr el objetivo planteado, y si esto es posible, definir el proceso “madre” (desarrollar los fenómenos físicos, termodinámicos, eléctricos, etc.), los componentes principales del sistema y algunas características principales de los mismos. No pretendo desarrollar detalles constructivos del sistema minuciosamente, ya que la intención es sentar la base para un nuevo desarrollo tecnológico, y se precisarían años para llegar al diseño de una máquina para tal fin.

SOBRE EL NOMBRE DEL PROYECTO

Me costó realmente definir un nombre para este proyecto, pues ninguna técnica de proceso de material se ajusta al que se presenta aquí, que pueda tomar como referencia. Inicialmente pensé en utilizar la frase “mecanizado interno” o la palabra “fusión”, pero la primera era errada, ya que “mecanizado” se utiliza generalmente con la utilización de herramienta de corte o abrasión sobre la pieza para la extracción de material (cuando aquí no existe herramienta de contacto) y la segunda habría autolimitado la aplicación del proceso, ya que la fusión no es lo único que puede lograrse mediante el mismo. Por lo tanto decidí que unas palabras más global como “procesamiento” y “sin contacto” se ajustaban a las principales características de la idea que aquí se desarrolla.

SOBRE LOS ALCANCES DEL PRESENTE PROYECTO

Fue muy difícil para mí definir los alcances de mi tesis. Al ser un proyecto de investigación sobre una tecnología inexistente, y querer abarcar múltiples problemas que estoy seguro podría solucionar a la industria, los requisitos de investigación se me tornaron casi imposibles, no por una falta de interés o esfuerzo, sino por la necesidad de enorme búsqueda, estudios y desarrollos en un tiempo y con recursos que no dispongo. Es por ello que luego de pasar mucho tiempo tratando de abarcar TODO, me di cuenta que debía en realidad acotarme a los aspectos más básicos y encontrar los principales problemas a solucionar.

Específicamente, en un principio deseaba realizar el estudio para múltiples materiales, metales y cerámicos. Pero se trataban de materiales tan diferentes que hasta su desarrollo debía ser totalmente distinto. Esto me obligaba a considerar demasiadas alternativas que obviamente no se adaptaban a ambos casos, y más habrían correspondido a dos proyectos finales cada uno.

De la misma manera, decidí finalmente acotarme a los metales, y dentro de éstos, sólo al acero, desde totalmente ferrítico hasta el acero totalmente perlítico. El acotar considerablemente la aplicación de esta investigación (sólo para esta tesis; sin embargo al final se mencionarán otras posibles aplicaciones) me permitió acotar también los problemas principales a resolver, que fueron justamente los más importantes y los esenciales para que esta tecnología que propongo funcione (al menos teóricamente). Esto fue lo que me permitió no sólo resolver estas cuestiones esenciales, sino también identificarlas, que es el primer paso.

La elección del acero para la investigación no fue casual. Además de ser un metal ampliamente utilizado en la industria, es el metal del que mayor información se dispone, el más barato, y con una estructura simple que me brindó la posibilidad de concentrarme en el desarrollo de los fenómenos correspondiente al nuevo proceso, y no tanto en los factores o fenómenos que con otros metales pudiera pasar por alto.

CAPÍTULO 2. MAPA CONCEPTUAL DEL DISEÑO

El siguiente cuadro representa la metodología de trabajo para el desarrollo del proyecto. Los cuadros de la izquierda representan los contenidos teóricos investigados, necesarios para el desarrollo del diseño, representados por los cuadros del lado derecho del mapa conceptual. Nótese que el desarrollo comienza centrándose en la fusión del volumen de material en un punto del sólido, y a partir del cual los sistemas involucrados se vuelcan progresivamente hacia un entorno cada vez más abarcativo. De esta forma se asegura no perder el objetivo principal del proyecto, siguiendo la siguiente línea de desarrollo:

- Fusión del punto (volumen) dentro del sólido.
- Selección del tipo de energía de transporte.
- Transformación de la energía de transporte en calor.
- Transporte de energía dentro del sólido.
- Transductor e interfase *transductor-sólido*.
- Sistema de movimiento y control de convergencia.
- Sistema de vaciado de material líquido.
- Consumo energético total del sistema.
- Estudio de aplicabilidad.
- Estudio de costos.
- Conclusiones.

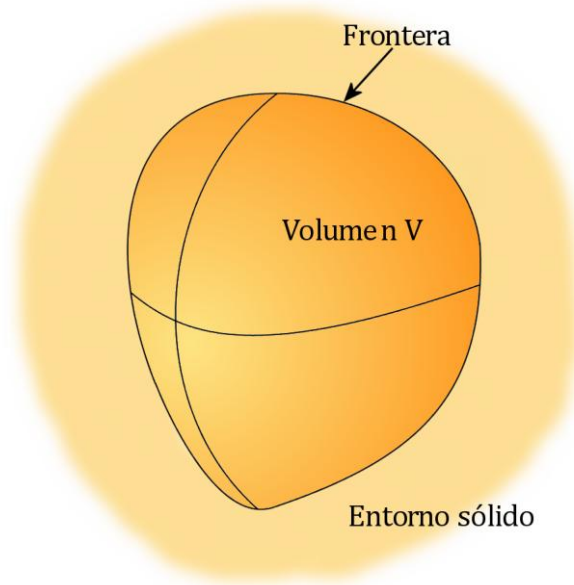
DESARROLLO TEÓRICO

CAPÍTULO 3. FUSIÓN DEL MATERIAL DENTRO DEL SÓLIDO

Aquí se desarrollará el proceso de fusión de un volumen de material.

Para el estudio se considerará el material homogéneo e isotrópico.

Consideremos un volumen V al que se le aporta energía, en mayor medida que su entorno, y es llevado desde una temperatura T_0 a una temperatura T_f , para luego cambiar de estado sólido a líquido.



La energía necesaria para llevar el volumen V de una temperatura T_0 a la temperatura de fusión T_f es

$$E_1 = \rho * V * C_p * (T_f - T_0) \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del material y C_p su capacidad calorífica. Por otra parte, la energía necesaria para lograr el cambio de estado del volumen V es

$$E_2 = \rho * V * L_f \quad (3.2)$$

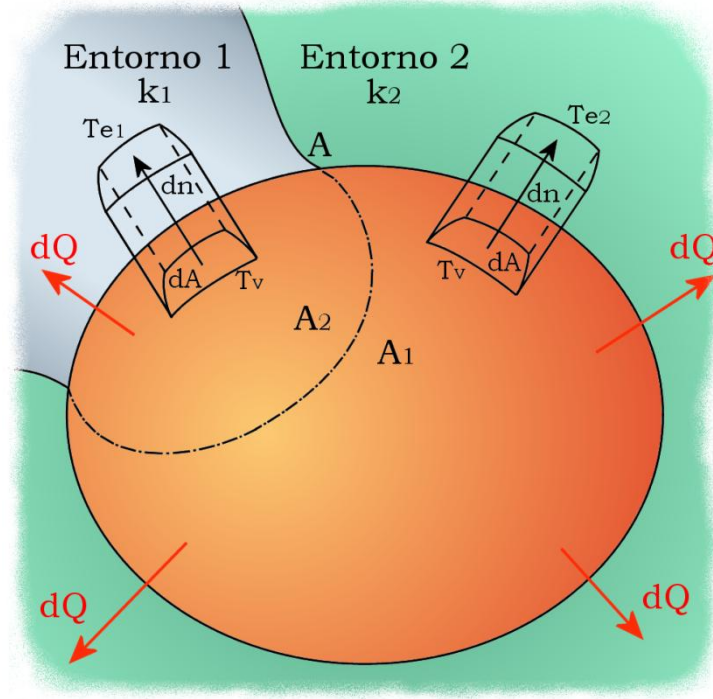
Donde L_f es el calor latente de fusión del material. Entonces, la energía necesaria para llevar el volumen V desde una temperatura T_0 al estado líquido será

$$E_f = E_1 + E_2 = \rho * V * [C_p * (T_f - T_0) + L_f] \quad (3.3)$$

Por conductividad térmica, mientras exista una diferencia de temperatura en el volumen con su entorno, habrá una transferencia de calor del primero hacia el segundo. La ley que rige esta transmisión de calor es la de Fourier:

$$\frac{dQ_n}{dt} = -\phi k * \frac{\partial T}{\partial n} * dA \quad (3.4)$$

Donde $\frac{dQ_n}{dt}$ es la potencia perdida a través de la frontera de área A, k es el coeficiente de conductividad térmica del material, y $\frac{\partial T}{\partial n}$ es el gradiente de temperatura que existe entre la frontera del volumen V y el entorno, a una distancia dn.



Para lograr la fusión del volumen de material es necesario entregarle una energía mayor de la que pierde por unidad de tiempo, hasta que la energía neta sea E_f . Esto es

$$\left(\frac{dE_e}{dt} + \frac{dQ_n}{dt}\right) * \Delta t = E_f \quad (3.5)$$

Nos interesa saber la potencia entregada P_e para lograr la fusión. Entonces, despejando

$$P_e = \frac{dE_e}{dt} = \frac{E_f}{\Delta t} - \frac{dQ_n}{dt} \quad (3.6)$$

Reemplazando (3.3) y (3.4) en (3.6) nos queda

$$P_e = \frac{\rho * V * [C_p * (T_f - T_0) + L_f]}{\Delta t} + \phi k * \frac{\partial T}{\partial n} * dA \quad (3.7)$$

Donde P_e es la potencia entregada para lograr la fusión.

De la fórmula (3.7) hay ciertas conclusiones importantes que podemos realizar. Existen variables que dependen de la naturaleza del material, las cuales no

podemos modificar, y variables que hacen a la eficiencia del proceso y la potencia necesaria. Sobre estas últimas trabajaremos para definir la calidad del mismo.

Densidad. Es una variable que depende únicamente del tipo de material. No trabajaremos, por lo tanto, sobre ella. Un material de menor densidad requerirá una menor potencia entregada.

Temperatura de fusión. También depende del material únicamente. Será menor la potencia requerida para un material de bajo punto de fusión.

Capacidad calorífica. Depende solo del material. A menor capacidad calorífica, menor potencia requerida.

Calor latente de fusión. Depende sólo del material. Cuanto menor sea este valor, menor será la potencia necesaria para fundir el material.

Coefficiente de conductividad térmica. Depende del material y de la temperatura, aunque podemos considerarla constante para nuestro desarrollo. Las pérdidas de potencia serán menores cuanto menor sea este coeficiente, y por lo tanto mayor será la eficiencia del proceso.

Volumen a fundir. Es una variable que depende de la zona afectada por la convergencia de los flujos de energía. Mientras más pequeño sea este volumen mayor será la calidad del proceso, ya que se obtendrá una mejor terminación superficial y menores tolerancias. Como contrapartida, un volumen demasiado pequeño aumentaría considerablemente el tiempo total de producción de una pieza.

Temperatura inicial de la pieza. Mientras mayor sea esta temperatura, menor será la diferencia con la temperatura de fusión, por lo que será necesaria una menor energía entregada para lograr la fusión del volumen, y menor entonces la potencia entregada (para igual cantidad de tiempo) o menor duración del proceso (a igual potencia entregada). También será menor el gradiente térmico, por lo que la pérdida de calor hacia el entorno por transmisión de calor será menor. Esto significa una mayor eficiencia del proceso.

Tiempo de fusión. Este tiempo es el que tarda el volumen en pasar al estado líquido. Si bien no es una variable que podamos controlar directamente, podría ser necesario fijarla en un valor predeterminado o modificarla si es que el proceso así lo requiere. Existen dos aspectos a considerar:

- (I) El control de esta variable podría ser útil para ajustar la producción de la máquina al resto de la planta en un proceso industrial. El valor ideal (bajo este punto de vista) sería el máximo indispensable para satisfacer la demanda de producción y a la vez evitar un consumo de potencia innecesario (a mayor potencia, mayores costos).

(II) A medida que el valor de esta variable sea mayor, mayor será la cantidad de calor cedida al entorno. Se corre el riesgo entonces de producir una fusión fuera de los límites deseados, lo que equivale a una menor calidad superficial y posiblemente a una pieza que no cumpla con los requisitos de fabricación.

Área frontera del volumen. Esta variable está sujeta a los mismos factores que el volumen a fundir. La diferencia radica en que ésta variable debe minimizarse mientras sea posible, lo que significa una menor transferencia de calor hacia el entorno (menor potencia perdida) y un aumento de la eficiencia del proceso.

Gradiente de temperatura en la frontera. Es un término difícil de cuantificar. Fijaremos dn como una distancia media infinitesimal entre la superficie frontera del volumen a fundir, a una temperatura T_v , y una superficie isotérmica del entorno a T_e , cercana a la superficie frontera. El diferencial dT es la diferencia entre T_v y la temperatura T_e . A medida que la temperatura del volumen aumenta, T_v se eleva desde el valor T_0 hasta el valor de fusión T_f . Consideraremos ahora que el calor cedido desde la frontera hacia el entorno se distribuye uniformemente sobre las áreas isotermas alrededor del volumen, las cuales son cada vez mayores a medida que la distancia con la frontera es mayor, y (suponiendo que el material es homogéneo) que cada área isoterma se encuentra a la misma distancia que la frontera en todos sus puntos. Entonces puede decirse que en cualquier capa del entorno cercana a la frontera, la temperatura T_e no aumentará en la misma proporción que T_v , ya que el calor que recibe debe distribuirse en un área mayor que en la frontera, lo que significa un aumento menor de la temperatura en la unidad de tiempo. Entonces,

$$\frac{dT_v}{dt} > \frac{dT_e}{dt}$$

De aquí puede deducirse que $dT = T_v - T_e$ es función creciente en el tiempo, y como consideramos dn una distancia fija infinitesimal, el gradiente térmico también lo es.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = f(t)$$

Sabemos entonces, que el gradiente de temperatura aumenta a medida que el volumen se calienta y se funde, con lo cual podemos decir que la pérdida de potencia por transmisión de calor hacia el entorno no es constante en el tiempo, sino que fluctúa durante el proceso, y cuyo pico máximo ocurre durante la fusión del volumen mínimo. Además, mientras mayor sea el tiempo de fusión, mayores serán las pérdidas (por ser el gradiente creciente en el tiempo). Otra observación importante que podemos realizar es que, al calentar el volumen, la frontera se calienta más rápido que su entorno.

Sobre el cálculo de las pérdidas

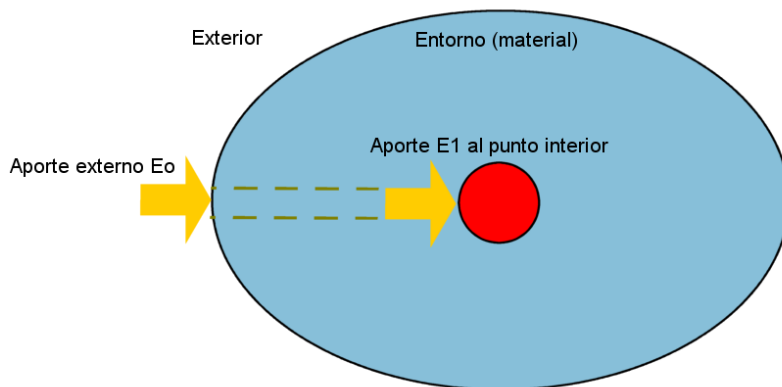
Analizar el término de las pérdidas por transferencia de calor es importante para conocer las variables intervinientes; éste podría calcularse de modo preciso mediante el método de los elementos finitos, al tratarse de un proceso transitorio de transferencia de calor en tres dimensiones. Sin embargo, un estudio de este tipo no sería práctico en este proyecto, ya que quitaría generalidad a la expresión. Esto es debido a que su valor depende de la forma y tamaño de la pieza, y ubicación del volumen a fundir dentro de la misma. Dicho de otro modo, analizar más profundamente las pérdidas al fundir un volumen en el centro de una esfera no será igual que en otra posición, o en un cubo. No obstante sería conveniente un estudio por elementos finitos cuando la pieza y el proceso ya están definidos, si es que se desea optimizar el mismo.

CAPÍTULO 4. SELECCIÓN DEL TIPO DE ENERGÍA DE TRANSPORTE

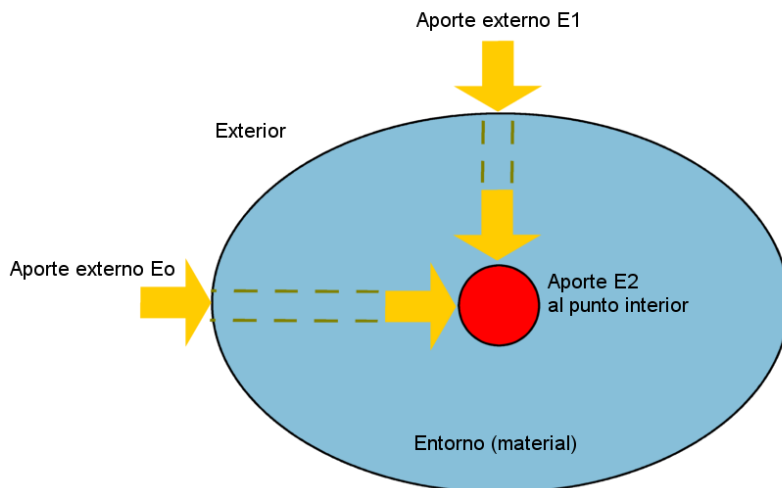
REQUISITOS

La idea principal del proceso es que éste sea capaz de aportar energía a un punto interior del material, en mayor medida que su entorno, ya sea para fundirlo o cambiar su estructura (entiéndase que lo que considero como un “punto” es un volumen muy pequeño de material). Veamos de qué manera podría lograrse esto.

Es obvio que para lograr el aporte de energía desde el exterior hacia un punto interno del material, esta energía debe atravesar el entorno que separa dicho punto de la fuente de energía. Como la energía se conserva, para lograr un mayor aporte de energía al punto de interés que a su entorno, será necesario que este aporte sea realizado desde distintas fuentes.



Como existe un único flujo de energía, es imposible que $E1 > Eo$, esto es, el punto no recibe un mayor aporte de energía que su entorno.

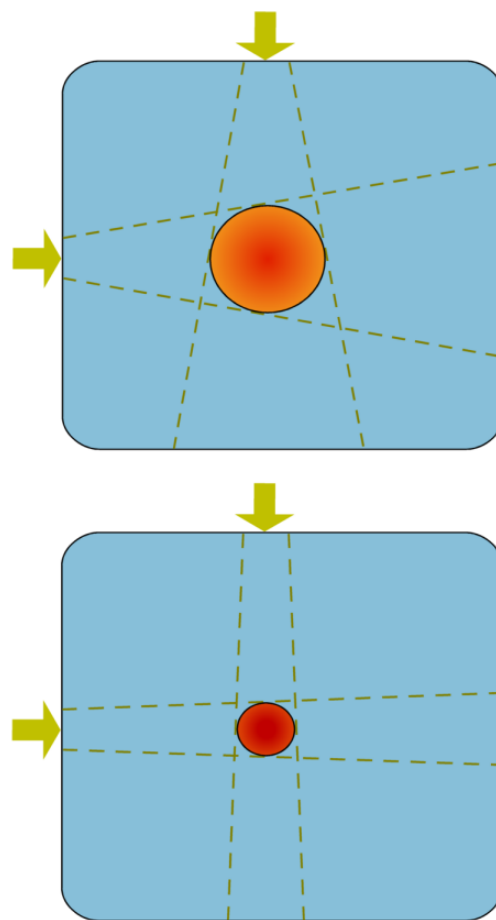


En este caso, se observa que el aporte de energía al punto interior es $E2 = Eo + E1$, el punto recibe mayor energía que su entorno.

Entonces, el primer requerimiento encontrado es que el aporte de energía debe realizarse a partir de más de una fuente.

El llamado punto interior es en realidad un volumen, que es de interés que sea lo más pequeño posible. Esto es así por dos motivos: el primero es que mientras menor sea el volumen que se pueda fundir menores serán las tolerancias que puedan obtenerse, es decir, mayor será la calidad obtenible en las piezas procesadas. El segundo motivo es que mientras mayor sea el volumen, menor será la densidad de energía dentro del mismo, y por lo tanto se requerirá una mayor potencia para lograr la fusión.

Para que este volumen sea pequeño, el aporte de energía debe ser lo más localizado posible, y consecuentemente, el transporte de esta energía debe ser en forma confinada y con la mínima dispersión posible.



Efecto de la dispersión en el transporte de energía:
 El volumen de fusión será mayor (mayores tolerancias).
 La densidad de energía será menor (se requerirá mayor potencia para la fusión).

Entonces, el segundo requerimiento encontrado es que el transporte de energía pueda realizarse de manera confinada y con la menor dispersión posible.

ELECCIÓN DEL TIPO DE ENERGÍA

Ya se han dispuestos los requerimientos para lograr el transporte de energía al punto de convergencia. Pero la cuestión a resolver ahora es de qué manera se realizará el transporte. Algunas alternativas son:

- Aporte calórico (energía térmica).
- Aporte ondulatorio: Ondas ultrasónicas.
- Aporte ondulatorio: Ondas electromagnéticas.

Energía térmica

Si bien el fin del proceso es aportar energía térmica al volumen para su fusión, no es posible utilizar este tipo de energía en el transporte, ya que no cumple con el segundo requisito: no es posible confinar el flujo de calor dentro del material hacia el punto deseado, por lo que descarto la energía térmica para el transporte.

Energía ondulatoria

Este transporte de ondas puede realizarse en forma confinada, y además posee la importante propiedad de cumplir el principio de superposición de efectos. Esto permite un mejor control del aporte energético mediante el manejo de los parámetros en las fuentes externas.

Ondas ultrasónicas vs. Ondas electromagnéticas

Las alternativas tenidas en cuenta fueron ondas ultrasónicas (elásticas) y ondas electromagnéticas. Las ondas ultrasónicas son fáciles de generar, pero son difíciles de transmitir al material, y el aspecto más negativo es la baja potencia que transmiten. Las ondas electromagnéticas en cambio, pueden transmitir potencia apreciablemente mayor que las ultrasónicas, determinante para la fusión del material. Como aspecto negativo se puede mencionar la dificultad para asegurar la convergencia de los haces hacia el punto de interés, debido a la inhomogeneidad del material, y la incapacidad de transmitirse en metales (debido al efecto pelicular).

CONCLUSIÓN SOBRE EL TIPO DE ENERGÍA A TRANSPORTAR

El tipo de energía seleccionado para continuar el desarrollo será el de ondas ultrasónicas (léase US) para nuestro estudio en materiales metálicos.

CAPÍTULO 5. TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA DE TRANSPORTE EN CALOR

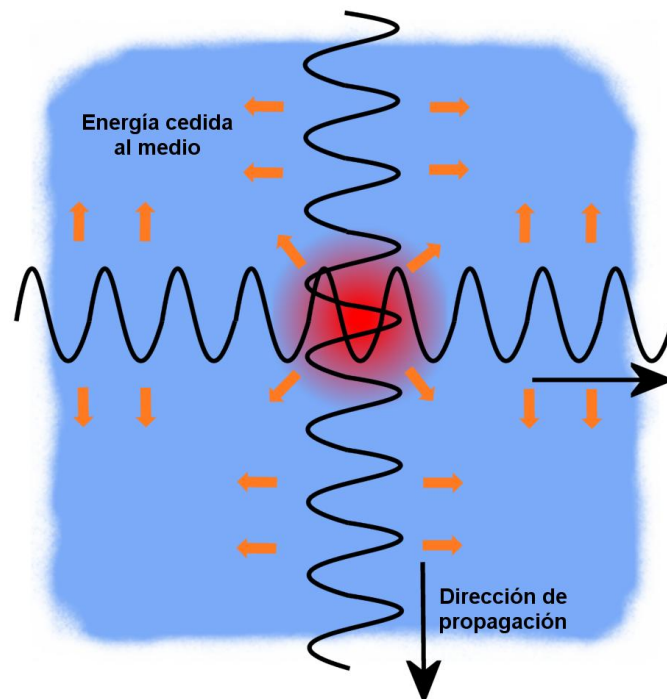
La transformación de la energía de transporte en energía térmica para la fusión del punto caliente es quizás el aspecto más importante del presente proyecto. Representa el carácter innovador de esta tecnología. Las principales cuestiones a resolver y las que presentan el mayor desafío a la creatividad son las abarcadas en éste capítulo.

Para establecer los mecanismos de transformación de la energía de la onda ultrasónica en calor necesito primero definir el tipo de ondas a transmitir y de qué manera lo harán. Para ello considero diferentes alternativas, para luego realizar un análisis comparativo y así buscar la mejor solución.

ALTERNATIVA N°1

Las ondas ultrasónicas y electromagnéticas sufren en su propagación pérdidas de energía en forma de calor. Convergiendo y superponiendo ondas desde distintas direcciones en un punto la pérdida de energía será máxima en dicho punto, esto es, habrá un mayor aporte calórico que en el resto del material.

El requerimiento para esta alternativa es converger ondas ultrasónicas en el punto deseado y buscar maximizar las pérdidas mediante los parámetros de las ondas primarias y considerando la naturaleza del medio.



ALTERNATIVA N°2

Las ondas ultrasónicas salvan discontinuidades del medio en función a las dimensiones de las mismas y a la longitud de onda. La sensibilidad de una onda ultrasónica define el tamaño mínimo de una discontinuidad a partir del cual la onda se refleja, y equivale a la mitad de la longitud de onda.¹

Utilizando esta característica y el principio de superposición podemos superponer ondas en el punto caliente, proveniente de distintas direcciones, y provocar en la zona deseada una onda resultante con alta frecuencia (baja longitud de onda) que no pueda propagarse a través de los límites de granos.

La manera de “construir” esta onda sería a través de las series de Fourier, cuyo principio asegura que puede construirse cualquier onda con una sumatoria de ondas primarias.

Las principales complicaciones de esta alternativa son dos:

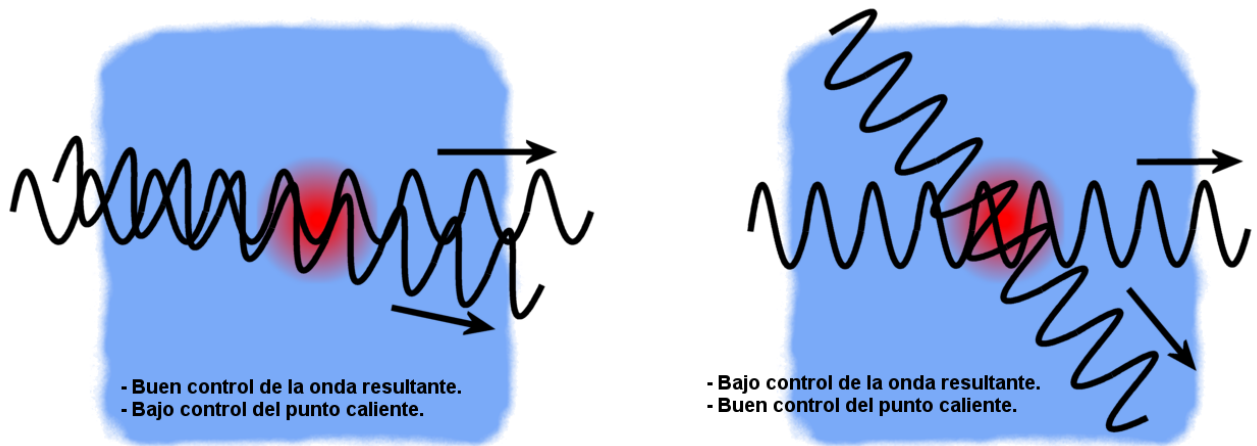
- La dificultad de obtener una onda de una frecuencia mayor a las que la componen. La serie de Fourier se expresa:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sen \frac{n\pi x}{L} \right)$$

Como se observa en los términos *cos* y *sen* de la ecuación, siendo *n* entero positivo, la onda resultante puede componerse de ondas de una frecuencia mayor. La serie de Fourier no explicita sin embargo que no pueda “construirse” una onda de alta frecuencia, pero tampoco puedo asegurar que sí sería posible obtener una onda necesaria para cada proceso en particular.

- La necesidad de inducir ondas muy próximas para que al llegar al punto caliente estén lo más paralelas y superpuestas posibles y de ese modo lograr la sumatoria deseada. Si las ondas no están correctamente superpuestas y en direcciones cuasi paralelas, no se obtendrá la onda deseada, y hará al proceso difícil de programar y predecir. El paralelismo entre las ondas garantiza el control de la frecuencia y demás parámetros de la onda resultante, pero dificulta el control de la ubicación y las dimensiones del volumen a fundir. Por el contrario, ondas superpuestas a distintos ángulos darán una onda difícil de predecir, pero habrá un buen control de la ubicación del punto caliente.

¹ Esta propiedad es la que se utiliza en la inspección por ultrasonido para definir la discontinuidad mínima que se desea detectar. Cátedra de Ensayos Especiales, Ingeniería Mecánica, UNR.



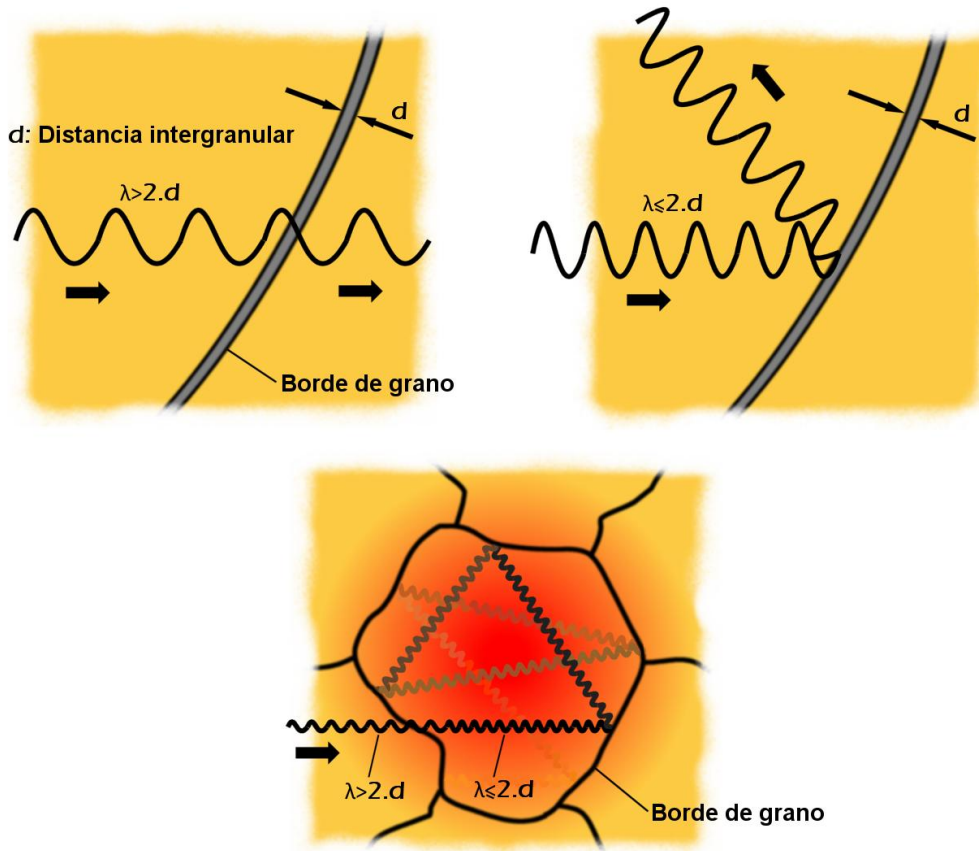
La onda resultante en el punto caliente no será la misma en ambos casos.

ALTERNATIVA Nº3

Como mencioné anteriormente, una onda ultrasónica puede propagarse en un medio y salvar discontinuidades de cierto espesor dependiendo de su longitud de onda. A mayor espesor de la discontinuidad, se necesita una mayor longitud de onda para salvarla. Por ello la onda se hace más sensible a las discontinuidades a menores longitudes de onda (mayores frecuencias). Esto provoca una reflexión de la onda. Esta propuesta se basa en cambiar la longitud de onda ultrasónica transversal en la zona caliente, hacerla sensible a los límites de granos y así provocar la reflexión dentro del grano (el grano actúa entonces como una "contención" a la onda), mientras ésta va perdiendo su energía en forma de calor. Entonces se estarían focalizando las pérdidas por calor en forma confinada dentro de los granos (ver figura siguiente).

La cuestión principal a resolver sería: ¿de qué manera podría cambiarse la longitud de onda transversal en el interior del sólido? Las ondas ultrasónicas se propagan directamente a través de las partículas del medio, por ello son mecánicas. Las ondas electromagnéticas son en cambio campos que modifican estas partículas. Esta diferencia de incidencia sobre el medio es lo que me motivó a formular esta propuesta. Imagine dos partículas cercanas del medio, ubicadas en la línea de propagación de una onda transversal ultrasónica. Suponga que están en fase, alcanzando picos al mismo tiempo. Estas partículas están a una distancia a , que corresponde a una longitud de onda. Si luego yo las someto a una fuerza de compresión que obligue a acercarse, esta distancia a sería ahora una distancia b (menor que a). Si el principio de superposición es válido y esta compresión no me afecta el movimiento en la dirección transversal, las partículas seguirían con su movimiento ondulatorio en fase, lo que ocasionaría una disminución en la longitud de la onda transversal (de a a b). Bajo este criterio, si esta fuerza de compresión fuera debido a una onda longitudinal superpuesta con la transversal, entonces en

las zonas de máxima compresión la longitud de onda transversal sería mínima, y máxima en las zonas de expansión.



Un cambio en la longitud de onda confinaría la misma dentro del grano.

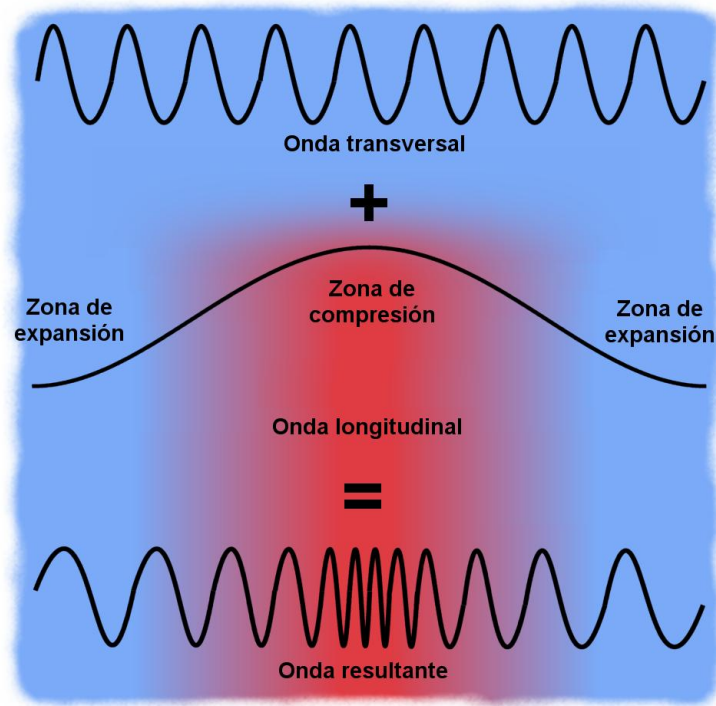
SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ALTERNATIVA Nº1	Muy fácil de aplicar y controlar.	Requiere mucha potencia ya que aprovecha sólo una mínima parte de la energía que transporta la onda. Bajo rendimiento.
ALTERNATIVA Nº2	Aprovecha la energía que transporta la onda. Alto rendimiento.	Muy difícil de aplicar y controlar. Sobre todo si se desea sumar ondas de gran longitud de onda para obtener una de baja longitud de onda. Se necesitan ondas casi superpuestas y que lo hagan realmente en el punto deseado.
ALTERNATIVA Nº3	Aprovecha la energía que transporta la onda. Alto rendimiento. Precisión en la ubicación del punto caliente.	Necesidad de una alta compresión en el punto caliente. Calentamiento intermitente.

La alternativa seleccionada es la tercera. Combina un alto rendimiento con una aplicación viable y un control aceptable del punto caliente.

VIABILIDAD DE LA PROPUESTA

Si la propuesta seleccionada es válida, podría modificarse externamente la longitud de onda transversal en el interior del medio, mediante una onda longitudinal estacionaria superpuesta. La variación de longitud de onda transversal dependería de la amplitud de la onda longitudinal, mientras que el tiempo que permanece el medio en compresión dependerá de la frecuencia de la onda longitudinal.



Ahora, para la propagación de ondas ultrasónicas, se cumple que existe una relación entre la frecuencia y la longitud de onda, dada por la velocidad de propagación en el medio.²

$$f_t * \lambda_t = C_t \tag{5.1}$$

C_t es la velocidad de propagación de la onda, y es característico del medio. Si el medio es siempre el mismo, valdría suponer que C_t es constante, por lo cual, para una frecuencia constante sería imposible variar la longitud de onda y así lograr lo que se propone en el punto caliente. Sin embargo, a diferencia de las ondas electromagnéticas (y es una razón esencial por la cual la onda ultrasónica es una mejor elección para el proceso), la velocidad de propagación de la onda en ultrasonido es función de la densidad ρ del medio:

² Esta ley y la fórmula de velocidad de una onda transversal pueden verificarse en el libro "Ultrasonics", de Benson Carlin. McGraw-Hill, así como en otras bibliografías. En algunos casos reemplazan en la segunda los términos correspondientes por el módulo de rigidez G.

$$C_t = f(E, \mu, \rho) = \sqrt{\frac{E}{2 * \rho * (1 + \mu)}} \quad (5.2)$$

Donde E es el módulo elástico del material y μ es la relación de Poisson.

Combinando con la relación anterior:

$$f_t * \lambda_t = \sqrt{\frac{E}{2 * \rho * (1 + \mu)}} \quad (5.3)$$

Entonces, si se creara una zona de compresión mediante la onda longitudinal, estaríamos aumentando la densidad y por lo tanto, a f constante, λ disminuirá.

$$\text{En zona de compresión: } \uparrow \rho \Rightarrow \downarrow C_t \Rightarrow \downarrow \lambda_t \text{ (para } f_t = cte) \quad (5.4)$$

Así se demuestra que es posible variar la longitud de la onda transversal en el interior del sólido.

CAPÍTULO 6. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

A continuación desarrollaré detalladamente la alternativa seleccionada, estudiando los mecanismos físicos actuantes, sus variables y parámetros, sus ventajas y desventajas, y destacando los aspectos y requerimientos esenciales para el funcionamiento del proceso de transformación de la energía.

Cabe escribir primeramente la ecuación más importante del proceso, y surge de introducir en la ecuación (5.3) la sensibilidad de la onda transversal:

$$f_t * d_g = \sqrt{\frac{E}{8 * \rho * (1 + \mu)}} \quad (6.1)$$

El valor d_g será la mínima discontinuidad para la reflexión de la onda.

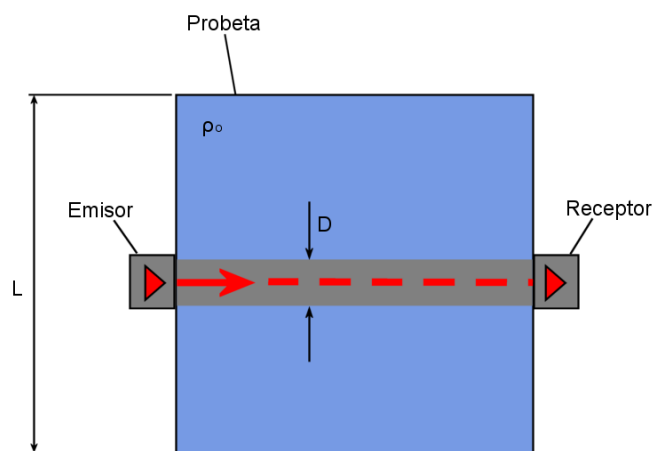
ESPEORES DE BORDE DE GRANO

Si se desea confinar el haz de la onda transversal dentro de los límites de grano del medio, se debe conocer el valor de los espesores de borde de grano, para saber cuál debe ser la sensibilidad de la onda. Estos espesores serán variables dentro del material, pero lo importante es determinar un valor representativo para los menores espesores (d_{g0}) y uno para los mayores (d_{g1}).

Determinación del espesor de borde de grano. Ensayo UFT (propuesto)

El ensayo de *Umbral de Frecuencias de Transición* es un ensayo propuesto para determinar las frecuencias f_0 donde comienzan las reflexiones de la onda transversal en el material y f_1 donde las reflexiones son totales.

Dicho ensayo se basa en hacer pasar una onda transversal por el interior de una probeta cúbica del material de interés, con un receptor en la cara opuesta. La probeta debe estar libre de esfuerzos y deformaciones.



La densidad de la probeta en las condiciones del ensayo será ρ_0 , por estar libre de esfuerzos y deformaciones, a la temperatura θ_0 de inicio del proceso.

Es necesario que el diámetro efectivo del transductor D sea apreciablemente menor que L para evitar efectos de borde.

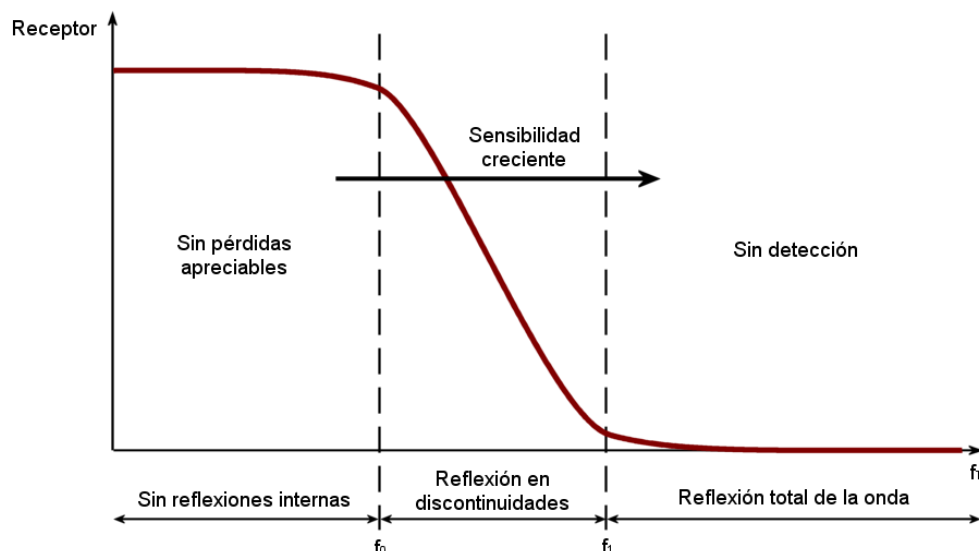
$$D \ll L$$

No tiene sentido definir aquí valores concretos pues para poder hacerlo se necesitaría un grado de investigación que excede al de este proyecto. Podría añadirse que el tamaño del transductor (por lo tanto D) debería ser el menor disponible en el mercado.

Es necesario que el material de la probeta sea el que se desea utilizar en el proceso, pues deben estar definidos con precisión los siguientes valores:

- Densidad ρ_0 .
- Velocidad de propagación de la onda transversal normal C_{T0} (puede obtenerse del ensayo).
- Módulo de Young E .
- Coeficiente de Poisson μ .

Comenzando a baja frecuencia de emisión, se registra la energía de la onda que llega al receptor. A bajas frecuencias la onda pasará casi por completo la probeta hasta el receptor, pues tendrá una alta longitud de onda que la hará insensible a las discontinuidades. Se irá aumentando la frecuencia de emisión, pasando por una zona en donde la energía que llega al receptor baja considerablemente hasta un valor casi nulo. Esto se debe a que, a C_{T0} constante, la longitud de onda disminuye lo suficiente para que la onda sea completamente sensible a las discontinuidades del medio. Se debe realizar esto en varios puntos de la probeta y en varias caras para asegurar la generalidad de los datos. Gráficamente, se obtendrá lo siguiente:



La frecuencia f_0 será aquella a partir de la cual comenzará a disminuir la energía captada por el receptor. Esto es así porque comenzarán las reflexiones de la onda transversal en las discontinuidades más grandes. La frecuencia f_1 será aquella a partir de la cual el emisor deja de detectar, esto significa que la onda se refleja en su totalidad en alguna o algunas discontinuidades en el interior de la probeta.

Los espesores de las discontinuidades que interesan para el proceso serán llamadas d_{g1} (las de mayor espesor) y d_{g0} (las de menor espesor). Al ser la sensibilidad de la onda la mitad de la longitud de onda, entonces:

$$\lambda_T = \frac{c_T}{f_T} \quad (6.2)$$

$$\frac{\lambda_0}{2} = d_{g1} \text{ cuando } f_T = f_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d_{g1} = \frac{c_{T0}}{2 * f_0} \quad (6.3)$$

Análogamente:

$$d_{g0} = \frac{c_{T0}}{2 * f_1} \quad (6.4)$$

El umbral de frecuencias (o el intervalo d_g) se da porque el espesor de borde de grano no es constante en todo el material. Al tomar datos de distintos puntos de la probeta y en distintas direcciones se asegura que estas discontinuidades se dan en todo el medio y no en casos aislados, por lo que darán validez a los parámetros utilizados para el proceso.

Particularmente los datos que servirán en el proceso serán d_{g0} y d_{g1} . Se aclara aquí, que d_{g0} no es precisamente el menor espesor de borde de grano del material, sino el máximo a partir del cual la onda se refleja completamente, esto es, el material puede tener menores espesores de borde de grano, pero estos no afectarán al funcionamiento ni puesta a punto del proceso. Como valores de referencia, estos espesores pueden estar entre 2 y 10 distancias interatómicas para el acero ferrítico, lo que equivale aproximadamente entre 0.6 y 3 nm.

DENSIDADES LÍMITES DE PROPAGACIÓN Y CONFINAMIENTO

Recordando que lo que se desea es variar la densidad dentro del material para confinar la onda, se definirán dos valores a utilizar en el presente desarrollo:

La densidad ρ_F será la necesaria para hacer a la onda transversal sensible a los menores espesores de borde de grano d_{g0} , es decir, la mínima densidad para confinarla.

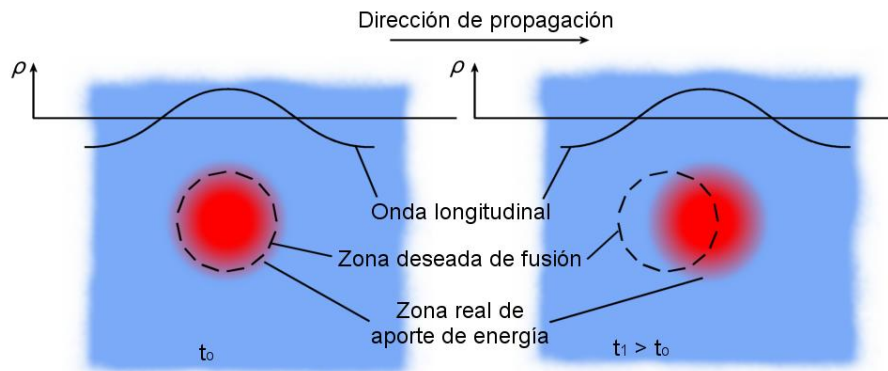
La densidad ρ_P será la necesaria para hacer a la onda transversal sensible a los mayores espesores de borde de grano d_{g1} , es decir, la máxima para una propagación total sin reflexiones internas.

Como los valores de estas densidades dependerán de la frecuencia de la onda, y el cálculo de la misma se hará más adelante, sus ecuaciones se desarrollarán luego.

LA ONDA LONGITUDINAL (ONDA AUXILIAR)

Condición estacionaria de la onda longitudinal

La onda longitudinal produce un aumento de la densidad del material en una zona de coordenadas específicas. Por ello esta es necesario que la onda longitudinal sea estacionaria para que el punto a fusionar no se desplace durante el calentamiento. De lo contrario no se focalizará el aporte de energía a las coordenadas deseadas, aumentando así la imprecisión del proceso y baja de rendimiento por calentamientos indeseados del entorno. Dado que la amplitud de la onda estacionaria será resultado de dos ondas superpuestas de dirección contraria y de media amplitud, de aquí en más me referiré como A_L a la amplitud resultante de la onda estacionaria, y no de cada onda que la compone.



Siendo A_{L0} la amplitud de cada onda L que conforman la estacionaria, la ecuación de la onda estacionaria de compresión será entonces³:

$$A_L(x, t) = A_{LM} * \text{sen}(kx) * \cos(\omega t) \tag{6.5}$$

Donde

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_L} \tag{6.6}$$

$$\omega = 2\pi f_L \tag{6.7}$$

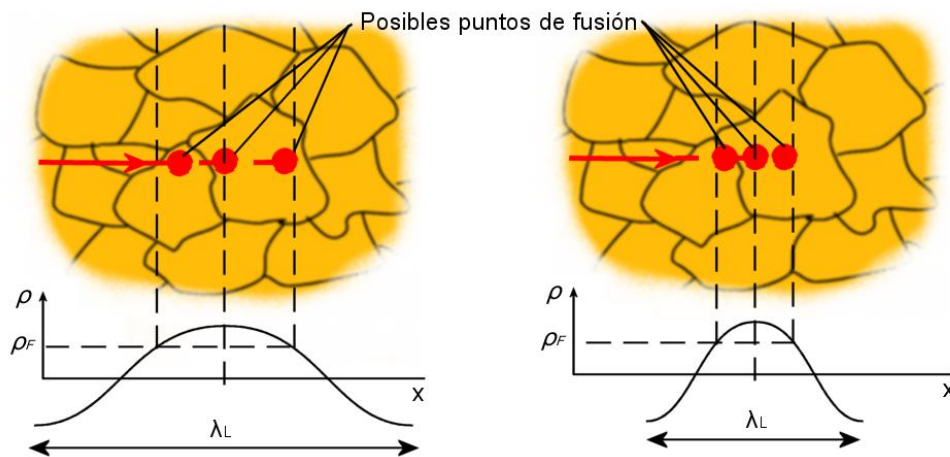
$$A_{LM} = 2 * A_{L0} \tag{6.8}$$

³ Ver "Physics of Waves", William Elmore y Mark Heald, McGraw-Hill.

Longitud de la onda longitudinal λ_L

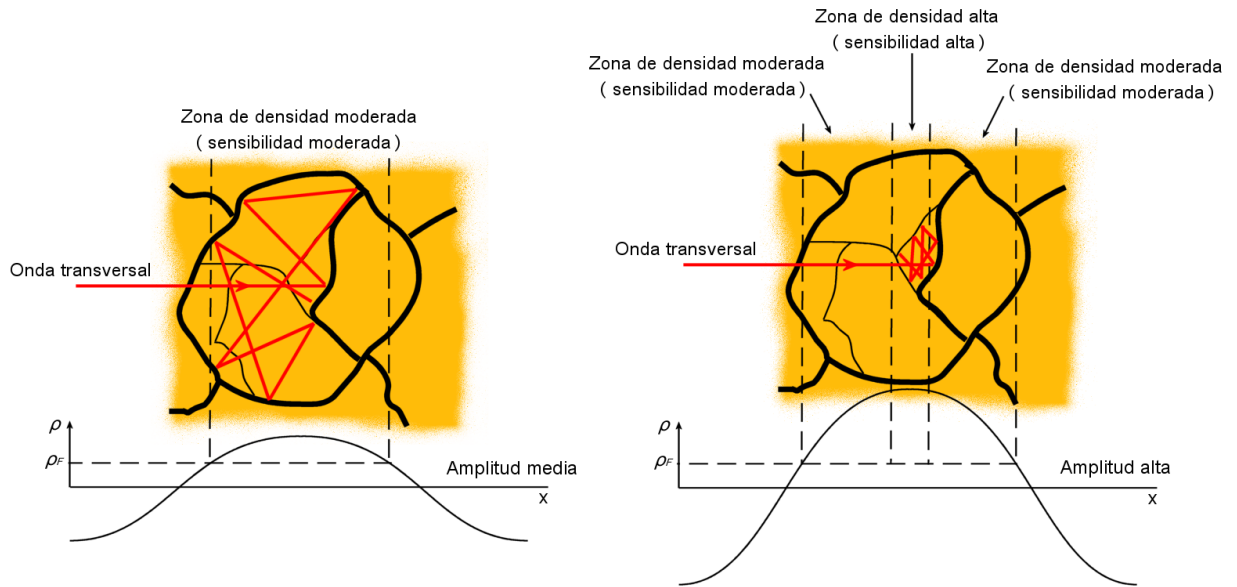
Mientras mayor sea esta longitud de onda, más amplia será la zona con densidad suficiente para producir el aporte de energía al material. Esto no significa que sea más amplia la zona de fusión, sino que se extienden los límites donde puede darse el inicio de la misma.

Consecuentemente esto disminuye la precisión. Cuanto menor sea λ_L , más confinado estará el punto caliente en las coordenadas deseadas, y por lo tanto mayor calidad tendrá el proceso.



Amplitud de la onda longitudinal

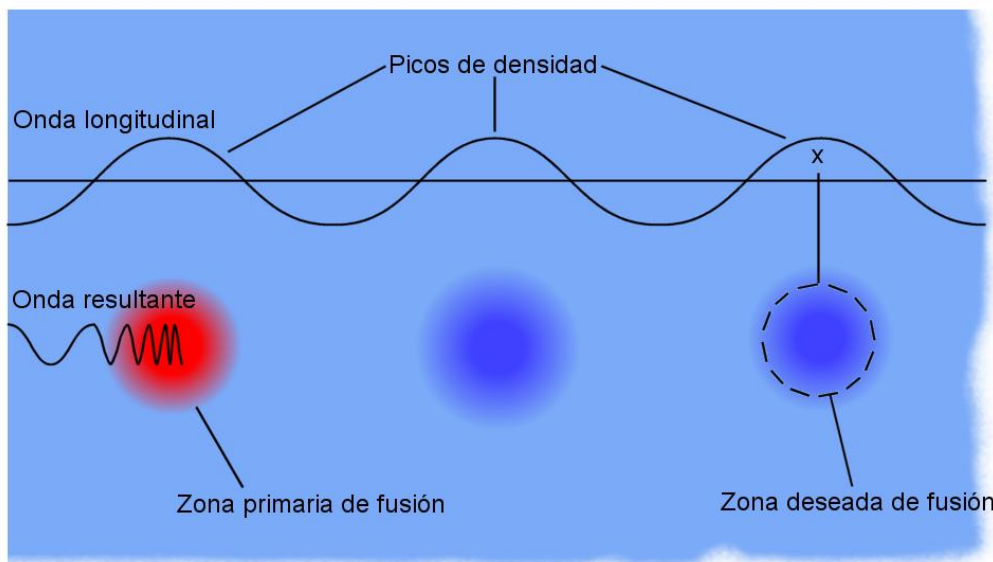
La amplitud de onda longitudinal tiene estrecha relación con el grado de compresión en el material, esto es, con el aumento de densidad. A su vez, con la longitud de la onda transversal por la implicancia (5.4), y por último con la sensibilidad de la onda ultrasónica transversal. Entonces, resumiendo, al aumentar la amplitud de la onda longitudinal, la onda transversal será más sensible a las discontinuidades, y por lo tanto, al aumentar la amplitud A_L , aparecerán nuevas reflexiones de la onda por pequeñas discontinuidades, que causarán un confinamiento mayor, y en conclusión, una mayor precisión en el proceso. Además un menor volumen de fusión a igual aporte calórico disminuye el tiempo de calentamiento y cambio de estado, con el consecuente aumento del rendimiento.



NECESIDAD DE MÚLTIPLES ONDAS AUXILIARES

Hasta aquí se sugirió utilizar una onda longitudinal para llegar a la densidad necesaria para confinar la onda transversal.

Con estas condiciones surgirá un inconveniente en el proceso: la fusión primaria ocurrirá en la primera cresta de densidad en la dirección de propagación, esto es, en el primer número de onda longitudinal.

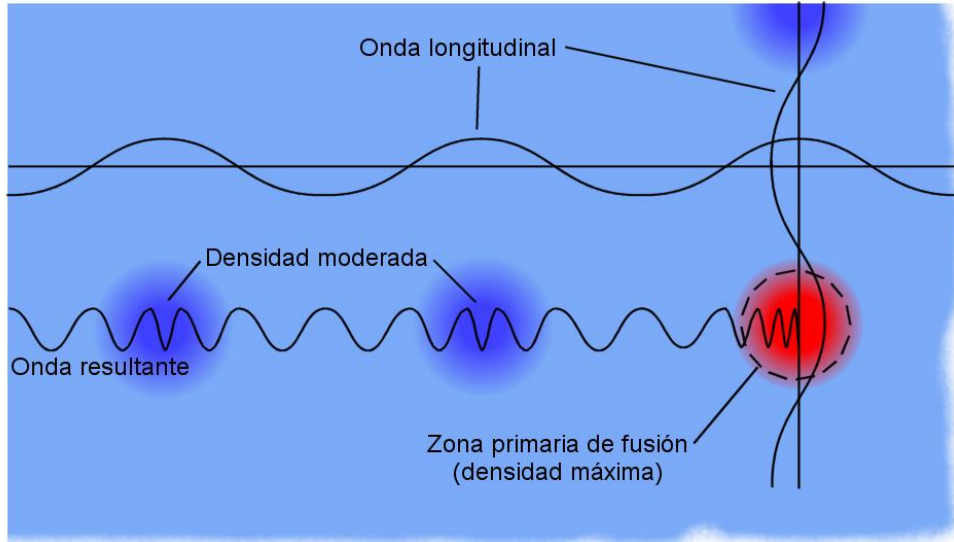


La solución a esto es bajar la amplitud de la onda A_L tal que la densidad máxima en la zona de propagación (ρ'_M) no supere ρ_F . Así entonces, converger adicionalmente al punto deseado una o más ondas longitudinales, en fase con la primera, tal que la acción conjunta de compresión provoque una densidad máxima (ρ''_M) igual o superior a la de confinamiento ρ_F .

Entonces:

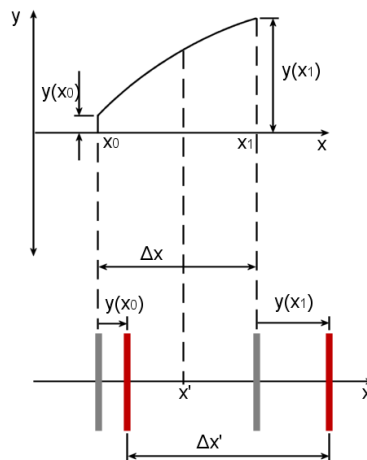
$$\rho'_{M(\text{Zona de propagación})} \leq \rho_P \quad (6.9)$$

$$\rho''_{M(\text{Zona de confinamiento})} \geq \rho_F \quad (6.10)$$



Esta o estas ondas longitudinales adicionales cumplirán la función de establecer las coordenadas del punto de fusión primaria. Para lograr un aumento de densidad considerable, sugiero la convergencia de tres ondas longitudinales ortogonales entre sí, para compensar la expansión por la relación de Poisson en cada dirección y además mantener la isotropía del material, pues se estaría comprimiendo el medio en los tres ejes cartesianos.

RELACIÓN DE LA DENSIDAD Y LOS PARÁMETROS DE LA ONDA AUXILIAR



Analizando la relación entre la amplitud y la densidad se tiene:

$$\rho_0 = m_0/\Delta x \Rightarrow \quad (6.11)$$

$$\Rightarrow m_0 = \rho_0 * \Delta x \quad (6.12)$$

$$\rho(x') = m_0/\Delta x' \quad (6.13)$$

$$\Delta x' = \Delta x + y(x_1) - y(x_0) = \Delta x + \Delta y \quad (6.14)$$

Reemplazando (6.12) y (6.14) en (6.13):

$$\rho(x') = \rho_0 * \frac{\Delta x}{\Delta x + \Delta y} = \rho_0 * \frac{1}{\frac{\Delta x + \Delta y}{\Delta x}} = \rho_0 * \frac{1}{1 + \frac{\Delta y}{\Delta x}} \quad (6.15)$$

Aplicando el límite $\Delta x \rightarrow 0$ se obtiene:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \rho(x') = \rho(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \rho_0 * \frac{1}{1 + \frac{\Delta y}{\Delta x}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho(x) = \frac{\rho_0}{1 + \frac{\partial y}{\partial x}} \quad (6.16)$$

Para una compresión triaxial, el análisis es análogo:

$$\rho(x, y, z) = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{\partial A_{Lx}}{\partial x}\right) * \left(1 + \frac{\partial A_{Ly}}{\partial y}\right) * \left(1 + \frac{\partial A_{Lz}}{\partial z}\right)} \quad (6.17)$$

Sin embargo se debe considerar que la compresión en cada sentido provoca una expansión en las restantes direcciones según el coeficiente de Poisson μ . Este fenómeno modifica la amplitud de cada onda en cada punto, es decir, las derivadas parciales deben realizarse sobre las amplitudes modificadas:

$$\rho(x, y, z) = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{\partial [A_{Lx} - \mu * (A_{Ly} + A_{Lz})]}{\partial x}\right) * \left(1 + \frac{\partial [A_{Ly} - \mu * (A_{Lx} + A_{Lz})]}{\partial y}\right) * \left(1 + \frac{\partial [A_{Lz} - \mu * (A_{Lx} + A_{Ly})]}{\partial z}\right)} \quad (6.18)$$

Ahora, como cada amplitud es independiente de la posición en las direcciones restantes, dichas derivadas parciales serán nulas, por lo que:

$$\frac{\delta(A_{Ly} + A_{Lz})}{\delta x} = \frac{\delta(A_{Lx} + A_{Lz})}{\delta y} = \frac{\delta(A_{Lx} + A_{Ly})}{\delta z} = 0 \quad (6.19)$$

Y así, la ecuación (6.17) es válida. Se observa que la expansión por Poisson no afecta la densidad final.

Las ecuaciones de cada onda estacionaria son:

$$A_{Lx}(x, t) = A_{LM} * \cos(\omega t) * \text{sen}(kx) \quad (6.20)$$

$$A_{Ly}(y, t) = A_{LM} * \cos(\omega t) * \text{sen}(ky) \quad (6.21)$$

$$A_{Lz}(z, t) = A_{LM} * \cos(\omega t) * \text{sen}(kz) \quad (6.22)$$

Y sus derivadas parciales:

$$\frac{\partial A_{Lx}}{\partial x} = A_{LM} * k * \cos(\omega t) * \cos(kx) \quad (6.23)$$

$$\frac{\partial A_{Ly}}{\partial y} = A_{LM} * k * \cos(\omega t) * \cos(ky) \quad (6.24)$$

$$\frac{\partial A_{Lz}}{\partial z} = A_{LM} * k * \cos(\omega t) * \cos(kz) \quad (6.25)$$

Reemplazando estas ecuaciones en (6.17) y desarrollando se obtiene la ecuación de la densidad en la zona de confinamiento:

$$\rho'' = \frac{\rho_0}{[1+(A_{LM}k) \cos(\omega t) \cos(kx)] * [1+(A_{LM}k) \cos(\omega t) \cos(ky)] * [1+(A_{LM}k) \cos(\omega t) \cos(kz)]} \quad (6.26)$$

También puede escribirse:

$$\rho'' = \frac{\rho_0}{C_1 * (A_{LM}k)^3 + C_2 * (A_{LM}k)^2 + C_3 * (A_{LM}k) + 1} \quad (6.27)$$

Donde

$$C_1 = \cos^3(\omega t) * \cos(kx) * \cos(ky) * \cos(kz) \quad (6.28)$$

$$C_2 = \cos^2(\omega t) * [\cos(kx) \cos(ky) + \cos(kx) \cos(kz) + \cos(ky) \cos(kz)] \quad (6.29)$$

$$C_3 = \cos(\omega t) * [\cos(kx) + \cos(ky) + \cos(kz)] \quad (6.30)$$

El factor $(A_{LM}k)$ es un factor muy importante para el proceso, que se definirá como:

$$\Omega_L = A_{LM} * k \quad (6.31)$$

Entonces, resumiendo hasta aquí, en la zona de propagación, la densidad será:

$$\rho'(x, t) = \frac{\rho_0}{1 + \Omega_L * \cos(\omega t) * \cos(kx)} \quad (6.32)$$

Y en la zona de confinamiento, la densidad será:

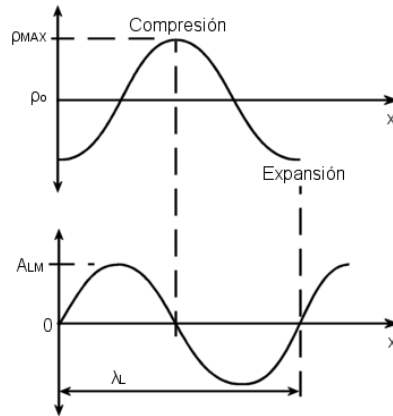
$$\rho''_{(x,y,z,t)} = \frac{\rho_0}{[1 + \Omega_L \cos(\omega t) \cos(kx)] * [1 + \Omega_L \cos(\omega t) \cos(ky)] * [1 + \Omega_L \cos(\omega t) \cos(kz)]} \quad (6.33)$$

Independientemente del tiempo, los máximos de densidad en la zona de confinamiento se dan donde

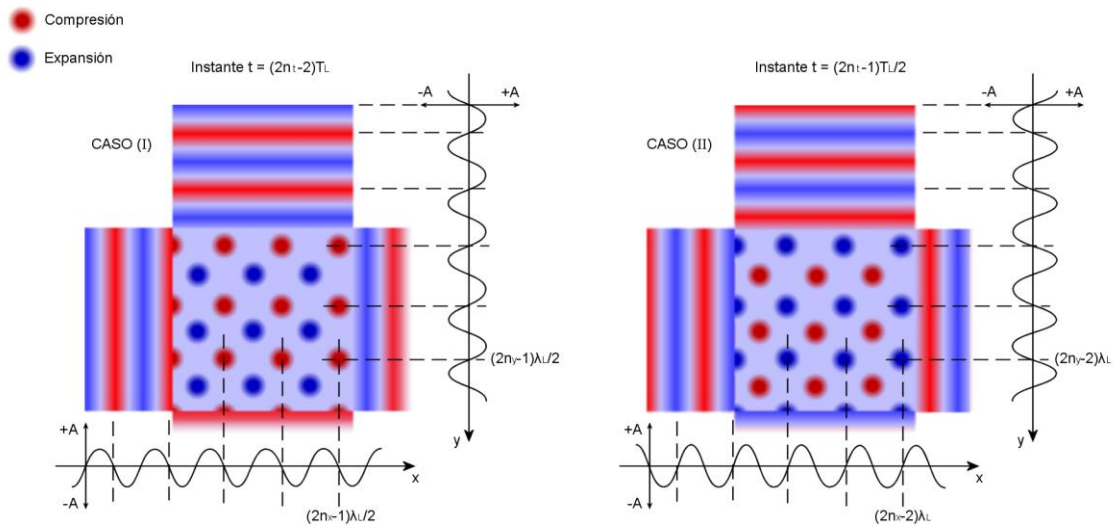
$$A_{Lx} = 0 \text{ y } \frac{\partial A_{Lx}}{\partial x} < 0 \quad (6.34)$$

$$A_{Ly} = 0 \text{ y } \frac{\partial A_{Ly}}{\partial y} < 0 \quad (6.35)$$

$$A_{Lz} = 0 \text{ y } \frac{\partial A_{Lz}}{\partial z} < 0 \quad (6.36)$$



En la figura siguiente se observan representados en el plano estos picos espaciados en una longitud de onda en cada dirección, en la superposición de los haces de ondas longitudinales, para un instante dado. No es difícil imaginar el mismo caso en el espacio tridimensional. Medio período después, los picos de expansión serán los de compresión y viceversa.



Los máximos de densidad se darán en:

$$\left. \begin{aligned} x &= (2n_x - 1) * \frac{\lambda_L}{2} \\ y &= (2n_y - 1) * \frac{\lambda_L}{2} \\ z &= (2n_z - 1) * \frac{\lambda_L}{2} \end{aligned} \right\} \forall t = 2(n_t - 1) * T_L \quad \text{(CASO I)}$$

Para n_x, n_y, n_z, n_t enteros positivos.

$$\left. \begin{aligned} x &= 2(n_x - 1) * \lambda_L \\ y &= 2(n_y - 1) * \lambda_L \\ z &= 2(n_z - 1) * \lambda_L \end{aligned} \right\} \forall t = (2n_t - 1) * \frac{T_L}{2} \quad \text{(CASO II)}$$

Para n_x, n_y, n_z, n_t enteros positivos.

Simplificando, los máximos de densidad se darán cuando:

$$\cos(\omega t) * \cos(kx) = \cos(\omega t) * \cos(ky) = \cos(\omega t) * \cos(kz) = -1 \quad (6.37)$$

Reemplazando los valores, la densidad máxima se calcula entonces:

$$\rho''_M = \frac{\rho_0}{[1 - \Omega_L]^3} \quad (6.38)$$

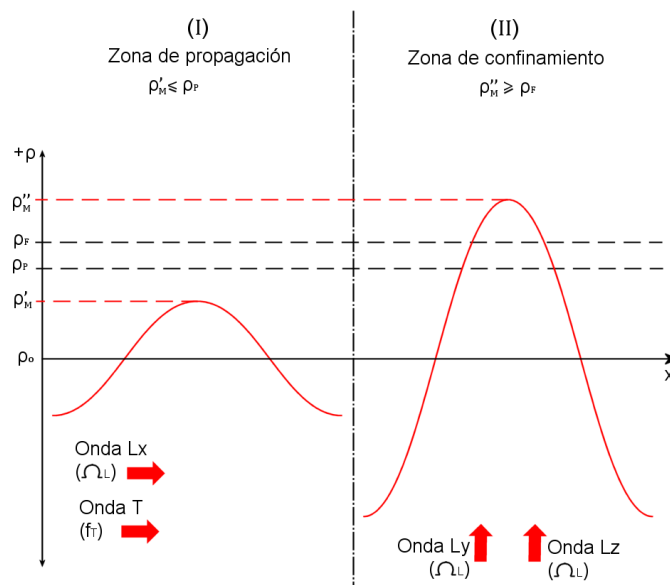
Análogamente, en la zona de propagación:

$$\rho'_M = \frac{\rho_0}{1 - \Omega_L} \quad (6.39)$$

Si se aumenta Ω_L , la densidad aumenta.

DOMINIO DEL PARÁMETRO Ω_L Y FRECUENCIA f_T

Recordando el funcionamiento básico del proceso, el haz de la onda T debe propagarse sin reflexiones hasta las coordenadas deseadas, donde allí debe confinarse con reflexión total. Se identifican entonces dos zonas, la zona (I) de propagación y la zona (II) de confinamiento. En el gráfico se observan estas zonas con las condiciones que deben cumplirse en cada una de ellas.



La ecuación de las densidades ρ_P y ρ_F , según su definición y despejando de la ecuación (6.1) será:

$$\rho_P = \frac{E}{8(1+\mu)*d_{g1}^2*f_T^2} \quad (6.40)$$

$$\rho_F = \frac{E}{8(1+\mu)*d_{g0}^2*f_T^2} \quad (6.41)$$

Ahora, para el funcionamiento del proceso, la densidad ρ'_M no debe superar ρ_P para poder la onda T propagarse sin reflexiones. Por lo tanto existirá un límite superior para el factor Ω_L , es decir un Ω_{MAX} . Del mismo modo, la densidad ρ''_M no debe decrecer de ρ_F para quedar la onda T confinada. Por lo tanto existirá un límite inferior para el factor Ω_L , es decir un Ω_{MIN} . Desarrollando:

$$\Omega_{MIN}/\rho''_M = \rho_F \quad (6.42)$$

$$\frac{\rho_0}{[1-\Omega_{MIN}]^3} = \frac{E}{8(1+\mu)*d_{g0}^2*f_T^2} \Rightarrow \quad (6.43)$$

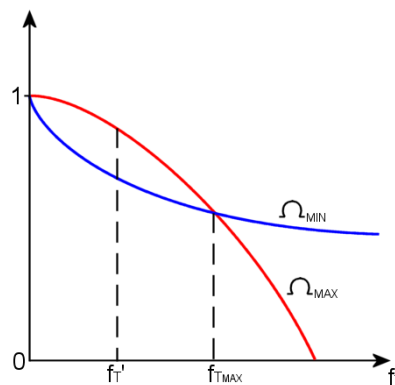
$$\Rightarrow \Omega_{MIN}(f_T) = 1 - \sqrt[3]{\frac{8(1+\mu)*\rho_0*d_{g0}^2*f_T^2}{E}} \quad (6.44)$$

$$\Omega_{MAX}/\rho'_M = \rho_P \quad (6.45)$$

$$\frac{\rho_0}{1-\Omega_{MAX}} = \frac{E}{8(1+\mu)*d_{g1}^2*f_T^2} \Rightarrow \quad (6.46)$$

$$\Rightarrow \Omega_{MAX}(f_T) = 1 - \frac{8(1+\mu)*\rho_0*d_{g1}^2*f_T^2}{E} \quad (6.47)$$

La gráfica de Ω_{MIN} y Ω_{MAX} en función de f_T es la siguiente:



Obviamente, el dominio de frecuencia de la onda transversal f_T será aquel donde

$$\Omega_{MIN}(f_T) \leq \Omega_{MAX}(f_T)$$

Para facilitar los cálculos defino:

$$\beta = \frac{8(1+\mu)*\rho_0}{E} \quad (6.48)$$

La frecuencia máxima será aquella donde

$$\begin{aligned} \Omega_{MIN}(f_{T_{MAX}}) &= \Omega_{MAX}(f_{T_{MAX}}) \Rightarrow \\ \Rightarrow 1 - \sqrt[3]{\beta * d_{g0}^2 * f_{T_{MAX}}^2} &= 1 - \beta * d_{g1}^2 * f_{T_{MAX}}^2 \Rightarrow \dots \Rightarrow \\ f_{T_{MAX}} &= \sqrt{\frac{E*d_{g0}}{8(1+\mu)*\rho_0*d_{g1}^3}} \end{aligned} \quad (6.49)$$

La frecuencia óptima del proceso será aquella para la cual la diferencia entre Ω_{MIN} y Ω_{MAX} es máxima, ya que implica que la densidad en la zona de confinamiento será superior a la mínima necesaria, tanto como sea posible en el proceso. Esto inducirá la mayor sensibilidad posible de la onda T, y por lo tanto la máxima focalización en el aporte de la energía.

Entonces derivando la diferencia e igualando a cero puede calcularse la frecuencia óptima:

$$\begin{aligned} \frac{d}{df_T} * (\Omega_{MAX} - \Omega_{MIN}) &= 0 \Rightarrow \frac{d}{df_T} * \left[(1 - \beta * d_{g1}^2 * f_T'^2) - \left(1 - \sqrt[3]{\beta * d_{g0}^2 * f_T'^2} \right) \right] \\ &= \dots = \sqrt[3]{\frac{\beta * d_{g0}^2}{27 * f_T'}} - \beta * d_{g1}^2 * f_T' = 0 \Rightarrow \dots \Rightarrow \\ \Rightarrow f_T' &= 0.1551 * \sqrt{\frac{E*d_{g0}}{(1+\mu)*\rho_0*d_{g1}^3}} \end{aligned} \quad (6.50)$$

De aquí entonces, f_T' es la frecuencia óptima de la onda transversal, y el factor Ω_L óptimo será:

$$\Omega_L = \Omega_{MAX}(f_T') \quad (6.51)$$

La densidad en cada punto y a cada instante podrá entonces calcularse con este factor y las ecuaciones (6.32) y (6.33).

Las densidades límites de confinamiento y propagación pueden calcularse con esta frecuencia y las ecuaciones (6.40) y (6.41).

El factor Ω_F será definido como:

$$\Omega_F = \Omega_{MIN}(f_T') \quad (6.52)$$

Este factor será de utilidad para el desarrollo siguiente, y cumple:

$$\rho_F = \frac{\rho_0}{(1-\Omega_F)^3} \quad (6.53)$$

TIEMPO DE CONFINAMIENTO

El proceso hasta aquí se basa en tres ondas longitudinales y una onda transversal.

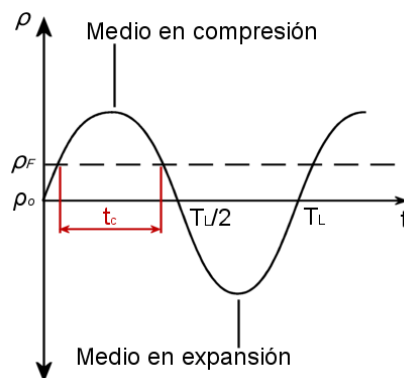
Las longitudinales se encargan de establecer las condiciones necesarias para el aporte de calor en el punto deseado. No obstante estas ondas no son quienes aportan la energía térmica al medio, por lo que son llamadas ondas “auxiliares”. Como tal, la energía de estas ondas será un gasto necesario del proceso, y a mayor potencia necesaria, menor será la eficiencia del mismo.

La onda transversal se encarga de aportar la energía térmica necesaria para la fusión. Por ello esta onda es llamada onda “portadora” Mientras mejor sea el aprovechamiento de esta energía, mejor será la eficiencia del proceso.

El aporte de energía de la onda portadora hacia el medio está íntimamente relacionado con el período de la onda auxiliar. Haciendo un análisis en el punto de fusión primaria, el medio estará en compresión sólo medio período de tiempo T_L , y menos tiempo todavía en compresión suficiente para el confinamiento de la onda portadora, por lo que las condiciones para el aporte de energía se darán en un tiempo t_c tal que

$$t_c < T_L/2 \tag{6.54}$$

Entonces, el aporte de energía se realizará intermitentemente por cada semiciclo de compresión. Esto significa que sólo podrá aprovecharse menos del 50% de la energía de la onda portadora en dicha coordenada, por período. Este es uno de los aspectos negativos de esta propuesta. Se debe destacar, sin embargo, que medio período después, el aporte de energía se realizará a media longitud de onda de distancia, cuando dicha zona se encuentre en compresión. Entonces no significa que se desaproveche el 50% de la energía globalmente.



El tiempo t_c define entonces la eficiencia de la transformación de energía y la precisión dimensional. Al aumentar este valor, ocurren dos fenómenos que aumentan la focalización por partida doble:

- Habrá mayor tiempo de aporte de energía en cada pico de compresión por ciclo por lo que se calentará más rápidamente y fusionará antes que el entorno.
- Habrá menor tiempo entre picos de densidad, por lo que el haz que logra pasar el primer pico tendrá menor tiempo de propagación antes de alcanzar otro pico, y esto implica una menor profundidad de penetración más allá del primer pico.

Cálculo de t_c

El tiempo t_c es el máximo de confinamiento de la onda portadora en un pico de densidad, es decir en el que $\rho \geq \rho_F$. Tomando una coordenada x, y, z donde se produzca un pico de densidad, esto es, que cumpla con las condiciones del caso I o caso II (cualquier múltiplo de $\lambda_L/2$). Tomamos $x = y = z = \lambda_L/2$.

$$\cos(kx) = \cos(ky) = \cos(kz) = -1$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (6.33):

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \frac{\rho_0}{[1 - \Omega_L \cos(\omega t)] * [1 - \Omega_L \cos(\omega t)] * [1 - \Omega_L \cos(\omega t)]} \\ &= \frac{\rho_0}{[1 - \Omega_L \cos(\omega t)]^3} \Rightarrow \\ \Rightarrow t &= \frac{1}{\omega} * \cos^{-1} \left[\frac{1}{\Omega_L} * \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\rho(t)}} \right) \right] \end{aligned} \tag{6.55}$$

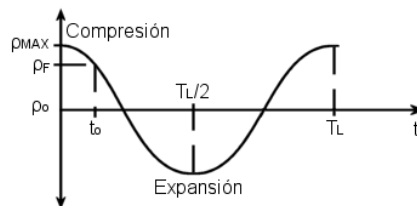
Para $\rho(t) = \rho_F$,

$$t_0 = \frac{1}{\omega} * \cos^{-1} \left[\frac{1}{\Omega_L} * \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\rho_F}} \right) \right] \tag{6.56}$$

Despejando de (6.53) el factor Ω_F y reemplazando:

$$t_0 = \frac{1}{\omega} * \cos^{-1} \left[\frac{\Omega_F}{\Omega_L} \right] \tag{6.57}$$

Para este caso, al tiempo $t=0$ corresponde máxima compresión, y la máxima expansión corresponde para un tiempo $t=T_L/2$.



Ahora,

$$t_c = 2 * t_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t_c = \frac{T_L}{\pi} * \cos^{-1} \left[\frac{\Omega_F}{\Omega_L} \right] \Rightarrow \quad (6.58)$$

$$\Rightarrow \frac{t_c}{T_L} = \frac{1}{\pi} * \cos^{-1} \left[\frac{\Omega_F}{\Omega_L} \right] \quad (6.59)$$

Se observa que la relación t_c/T_L aumenta mientras menor sea la relación Ω_F/Ω_L . A la vez, esta relación será mínima para la frecuencia óptima f'_T .

$$\downarrow \frac{\Omega_F}{\Omega_L} \Rightarrow \uparrow \frac{t_c}{T_L} \Rightarrow \uparrow \text{Eficiencia en el aporte de calor y focalización.}$$

$$A f'_T \Rightarrow \text{Mínimo } \frac{\Omega_F}{\Omega_L} \Rightarrow \text{Máximo } \frac{t_c}{T_L} \Rightarrow \text{Máxima eficiencia y focalización.}$$

PENETRACIÓN DE LA ONDA PORTADORA EN LA ZONA DE SUPERPOSICIÓN

La onda portadora tendrá una penetración en la zona de superposición de las ondas auxiliares, que depende de la densidad producto de la influencia de las mismas, en la dirección de propagación. Por ello, para realizar un análisis de la onda T en su propagación por la dirección x, se fijarán las coordenadas (y, z) donde se den los máximos de densidad correspondientes a las ondas L de éstas direcciones. Esto es,

$$\cos(ky) = \cos(kz) = -1$$

Entonces, la ecuación de densidad en la dirección x será:

$$\rho(x, t) = \frac{\rho_0}{[1 + \Omega_L \cos(\omega t) \cos(kx)] * [1 - \Omega_L \cos(\omega t)]^2} \quad (6.60)$$

Es de interés calcular la distancia de penetración de la onda T (d_p) antes de su total confinamiento. Para ello es importante distinguir dos casos:

- Que en el momento de máxima densidad, la mínima densidad iguale o supere ρ_F .
- Que en el momento de máxima densidad, la mínima densidad no alcance ρ_F .

El mínimo de densidad (espacialmente hablando) y al momento de máxima densidad (temporalmente hablando) se da:

$$\rho_m = \frac{\rho_0}{[1 + \Omega_L] * [1 - \Omega_L]^2} \quad (6.61)$$

Analizando la relación ρ_m/ρ_F , se dará el primer caso si es mayor a 1, y si es menor, se dará el segundo caso:

$$\frac{\rho_m}{\rho_F} = \frac{(1-\Omega_F)^3}{[1+\Omega_L][1-\Omega_L]^2} \quad (6.62)$$

Utilizando los valores anteriormente calculados de f_T , Ω_F y Ω_L :

$$\Omega_F = 1 - \sqrt[3]{\frac{8(1+\mu)*\rho_0*d_{g0}^2*f_T'^2}{E}} = 1 - \sqrt[3]{\gamma * d_{g0}^2} \quad (6.63)$$

$$\Omega_L = 1 - \frac{8(1+\mu)*\rho_0*d_{g1}^2*f_T'^2}{E} = 1 - \gamma * d_{g1}^2 \quad (6.64)$$

Siendo

$$\gamma = \frac{8(1+\mu)*\rho_0*f_T'^2}{E} = \frac{0.192(1+\mu)*\rho_0*E*d_{g0}}{E*(1+\mu)*\rho_0*d_{g1}^3} = 0.192 * \frac{d_{g0}}{d_{g1}^3} \quad (6.65)$$

Reemplazando en (6.62):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_m}{\rho_F} &= \frac{\left[1 - \left(1 - \sqrt[3]{\gamma*d_{g0}^2}\right)\right]^3}{[1+(1-\gamma*d_{g1}^2)][1-(1-\gamma*d_{g1}^2)]^2} = \frac{\gamma*d_{g0}^2}{(2-\gamma*d_{g1}^2)*(\gamma*d_{g1}^2)^2} = \dots \\ \dots &= \frac{\gamma*d_{g0}^2}{(2-\gamma*d_{g1}^2)*(\gamma^2*d_{g1}^4)} = \frac{d_{g0}^2}{2*\gamma*d_{g1}^4 - \gamma^2*d_{g1}^6} = \frac{d_{g0}^2}{2*0.192*\frac{d_{g0}}{d_{g1}^3}*d_{g1}^4 - \left(0.192*\frac{d_{g0}}{d_{g1}^3}\right)^2*d_{g1}^6} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\rho_m}{\rho_F} &= \frac{1}{0.385*\frac{d_{g1}}{d_{g0}} - 0.037} \quad (6.66) \end{aligned}$$

Entonces:

$$Si \frac{d_{g1}}{d_{g0}} \leq 2.6935 \Rightarrow \frac{\rho_m}{\rho_F} \geq 1 \quad (6.67)$$

$$Si \frac{d_{g1}}{d_{g0}} > 2.6935 \Rightarrow \frac{\rho_m}{\rho_F} < 1 \quad (6.68)$$

Diferenciar estos dos casos es importante, pues en el primero el cálculo de la distancia de penetración es más simple: cada un período de la onda auxiliar todo el espacio tendrá densidad suficiente para el confinamiento, por lo que la totalidad de la onda portadora quedará confinada. Entonces la distancia puede considerarse la recorrida por el frente de onda en un período. En el segundo caso, aunque la densidad llegue a su máximo en algunos puntos, en otros seguirá con densidad de propagación. Entonces los picos de densidad que queden detrás del frente de la onda portadora “cortarán” la misma, generando un tren de onda T, que seguirá penetrando hasta que otras zonas de alta densidad lo intercepten completamente. Este tiempo de penetración podría ser de varios períodos de onda auxiliar.

La ecuación de la densidad en función de x y t es la (6.60). La velocidad de propagación de la onda transversal será entonces:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{2*(1+\mu)*\rho(x,t)}} = \sqrt{\frac{E*\rho_0}{2*(1+\mu)*[1+\Omega_L \cos(\omega t)\cos(kx)]*[1-\Omega_L \cos(\omega t)]^2}} \quad (6.69)$$

Caso dg1/dg0 ≤ 2.6935

Si se cumple (6.67), la distancia de penetración d_p será:

$$d_p = \int_0^{T_L} C_{T(x,t)} dt = \int_0^{T_L} \sqrt{\frac{E*\rho_0}{2*(1+\mu)*[1+\Omega_L \cos(\omega t)\cos(kx)]*[1-\Omega_L \cos(\omega t)]^2}} dt \quad (6.70)$$

Dada la complejidad de la integral, puede emplearse un método iterativo mediante software para calcular la distancia de penetración d_p, definiendo una variación de tiempo Δt << T_L y haciendo:

$$\begin{aligned} t_1 &= 0 \\ x_1 &= 0 \\ &\downarrow \\ \rho_1 &= \rho(x_1, t_1) \\ &\downarrow \\ C_{T_1} &= C_T(\rho_1) \\ &\downarrow \\ \Delta x_1 &= C_{T_1} * \Delta t \\ &\downarrow \\ t_2 &= t_1 + \Delta t \\ x_2 &= x_1 + \Delta x_1 \\ &\downarrow \\ \rho_2 &= \rho(x_2, t_2) \\ &\downarrow \\ &\dots \\ &\text{Iterar hasta } t_n = T_L \\ d_p &= x_n \end{aligned}$$

La fórmula de la densidad a utilizar será la (6.60).

El anexo A es un algoritmo desarrollado en lenguaje de Matlab⁴ que utiliza las fórmulas desarrolladas hasta aquí para el cálculo de d_p , permitiendo seleccionar la frecuencia de la onda auxiliar (en consecuencia, T_L). A continuación se observan capturas del programa, con los valores de entrada y los de salida, para una frecuencia f_L de 500 MHz, y a valores más pequeños de Δt (precisión del método creciente).

```

CÁLCULO DE LA DISTANCIA DE PENETRACIÓN  $d_p$  DE LA ONDA PORTADORA
-----

MATERIAL: ACERO SAE 1010
-----
Densidad normal [Kg/m3]
    7860

Módulo de Young [N/m2]
    2.1e+011

Coeficiente de Poisson
    0.27

Espesor mínimo de borde de grano [nm]
    1.5

Espesor máximo de borde de grano [nm]
    3

Se cumple la relación (6.67)

Frecuencia de la onda transversal (óptima) [MHz]
    1.6768e+005

Factor ( $\Delta k$ ) utilizado (óptimo)
    0.90378

Ingrese la frecuencia de la onda longitudinal [MHz]: 500

Período de la onda auxiliar [ns]
    2

Longitud de onda auxiliar [micrones]
    11.78

Confirmar frecuencia de la onda auxiliar (s/n): s

Ingrese cantidad de divisiones de TL para cálculo (aumentar para mayor precisión): 1000

DISTANCIA DE PENETRACIÓN [MICRONES]
    6.4918

fx >>

```

⁴ MATLAB es un software de programación de análisis matemático que procesa matrices y datos discretos para su funcionamiento. Desarrollado por MathWorks (www.mathworks.com).

```

CÁLCULO DE LA DISTANCIA DE PENETRACIÓN dp DE LA ONDA PORTADORA
-----
MATERIAL: ACERO SAE 1010
-----
Densidad normal [Kg/m3]
      7860

Módulo de Young [N/m2]
      2.1e+011

Coeficiente de Poisson
      0.27

Espesor mínimo de borde de grano [nm]
      1.5

Espesor máximo de borde de grano [nm]
      3

Se cumple la relación (6.67)

Frecuencia de la onda transversal (óptima) [MHz]
      1.6768e+005

Factor (Δk) utilizado (óptimo)
      0.90378

Ingrese la frecuencia de la onda longitudinal [MHz]: 500

Período de la onda auxiliar [ns]
      2

Longitud de onda auxiliar [micrones]
      11.78

Confirmar frecuencia de la onda auxiliar (s/n): s

Ingrese cantidad de divisiones de TL para cálculo (aumentar para mayor precisión): 1000000

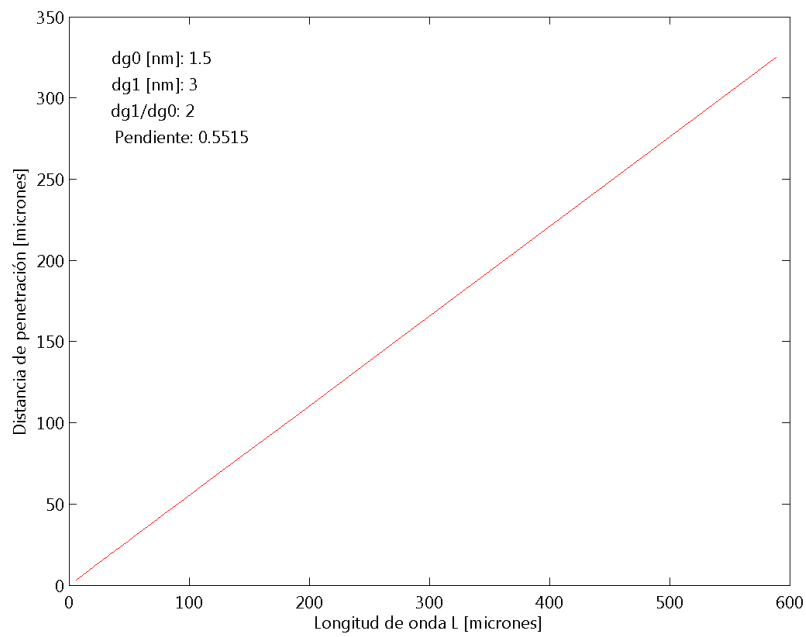
DISTANCIA DE PENETRACIÓN [MICRONES]
      6.4967

fx >>

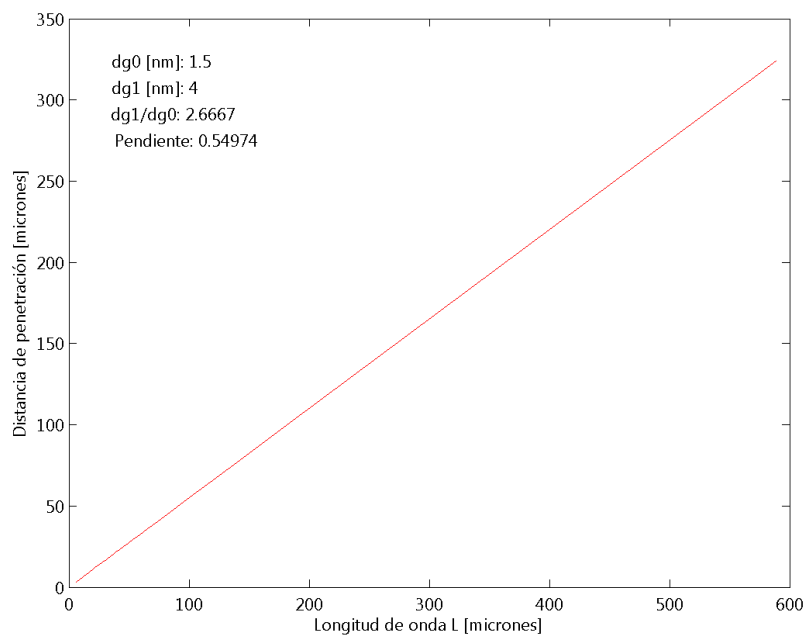
```

Se observa que el método tiene una precisión aproximada del 99.9% a 1000 divisiones del período T_L (para 1 millón de divisiones o más ya no se registran diferencias apreciables, pero el programa necesita más recursos de memoria).

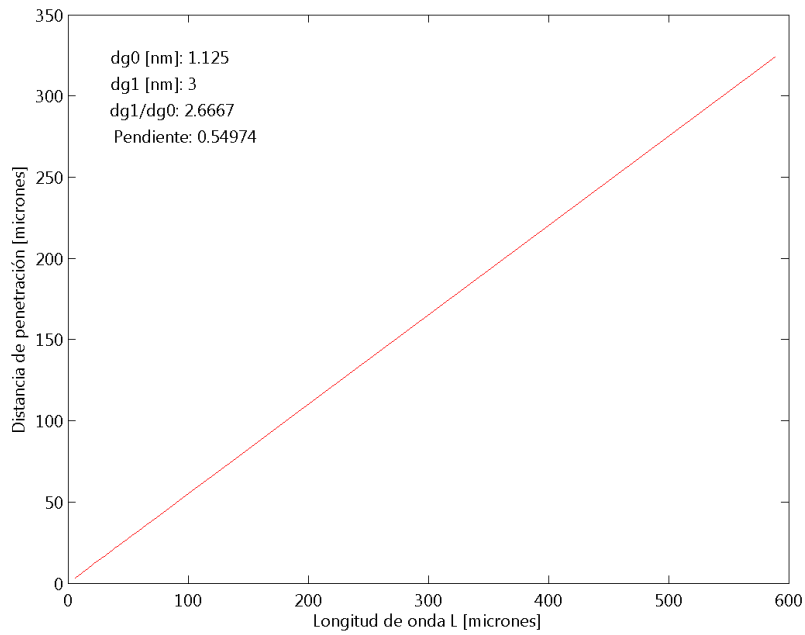
Variando la frecuencia f_L (por consiguiente la longitud de onda auxiliar) y registrando la distancia de penetración, a 100000 divisiones (precisión mayor al 99.999%), se observa una relación lineal entre la longitud de onda L y la distancia de penetración d_p :



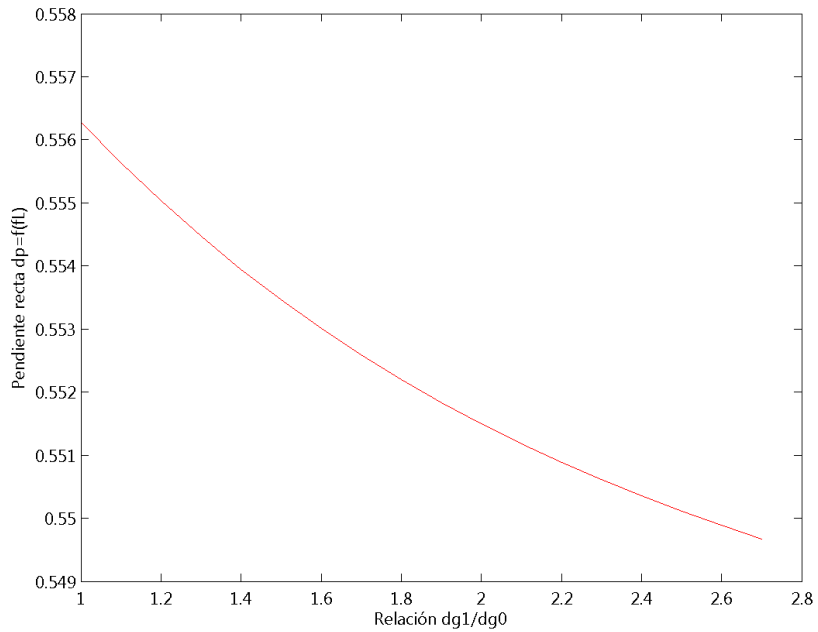
Si la relación d_{g1}/d_{g0} cambiase, cumpliendo aún con la condición (6.67), la pendiente experimentará una cierta variación:



Se puede observar que la pendiente depende de la relación d_{g1}/d_{g0} y no de sus valores, pues cambiando los mismos pero manteniendo la relación se obtiene la misma pendiente:



La gráfica de esta pendiente en función de la relación d_{g1}/d_{g0} es:



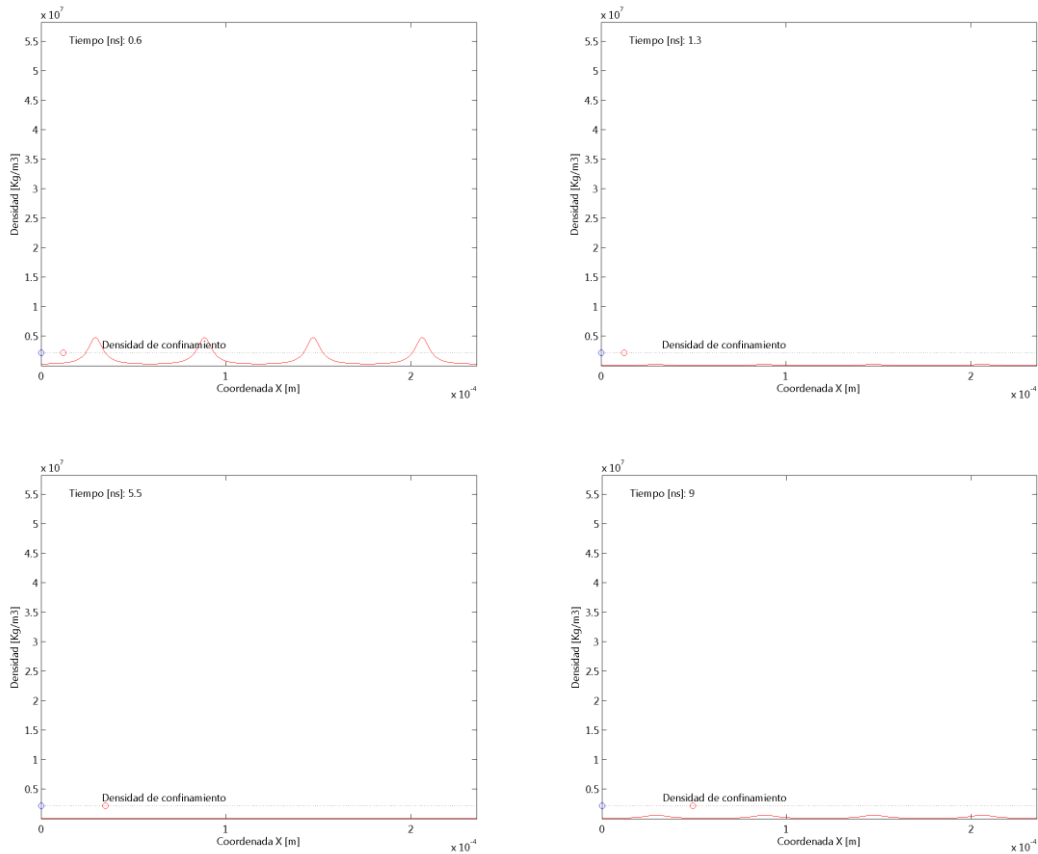
Concluyendo, cuando se cumple la relación de espesores de borde de grano (6.67), existe la ventaja de controlar fácilmente la penetración de la onda portadora antes de su confinamiento total con la frecuencia de la onda auxiliar, pues existe una relación lineal con la longitud de onda auxiliar, que depende de la antes mencionada.

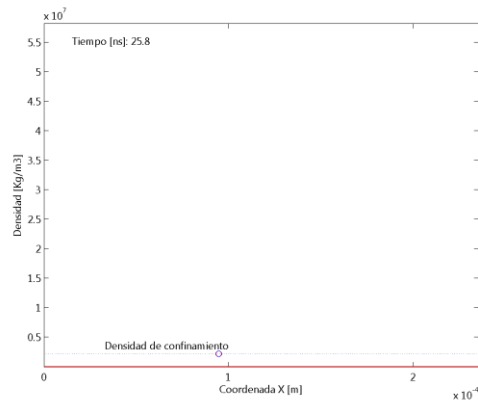
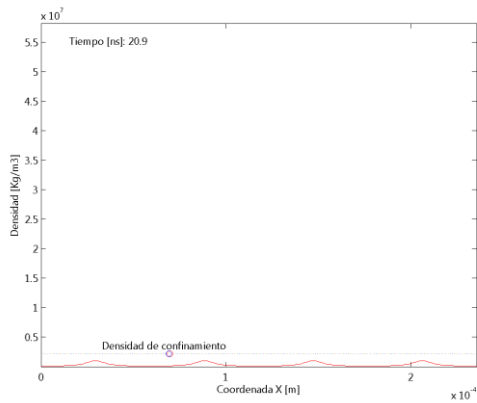
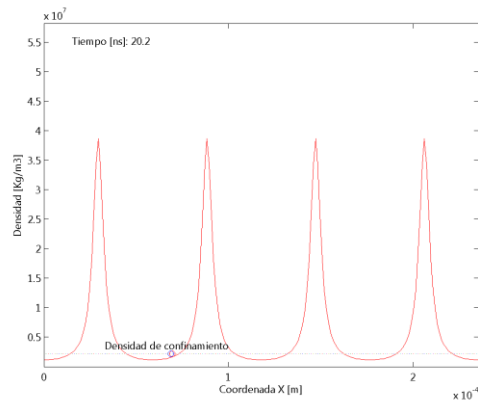
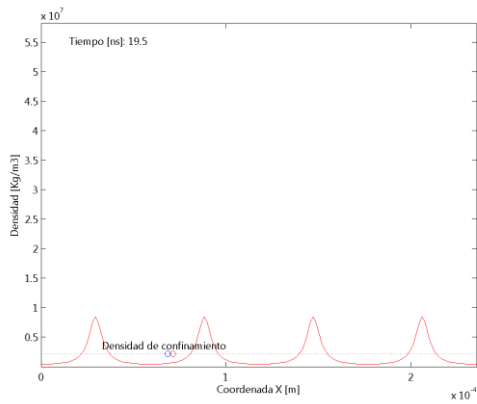
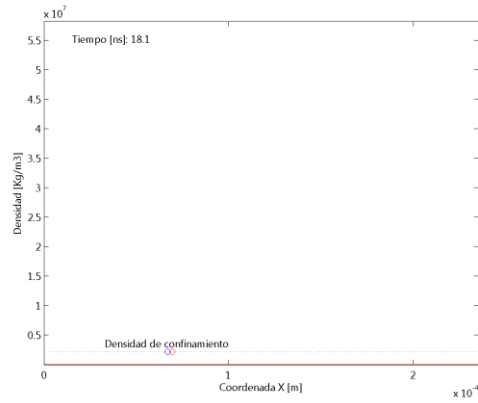
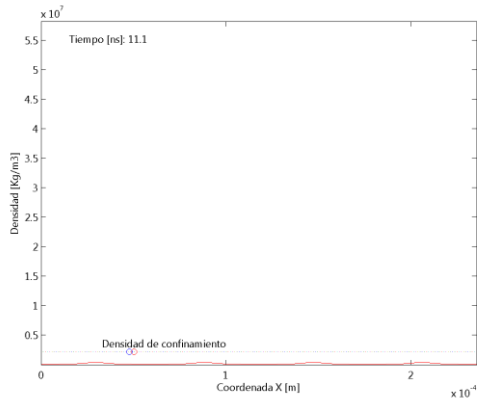
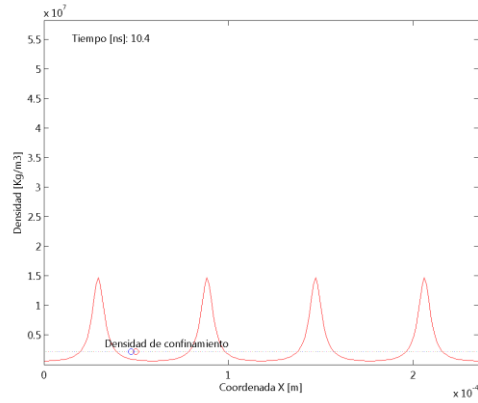
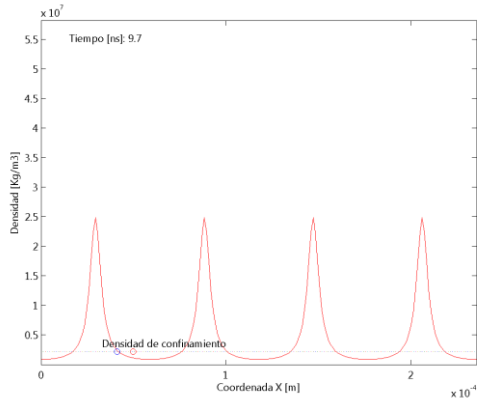
Caso dg1/dg0 > 2.6935

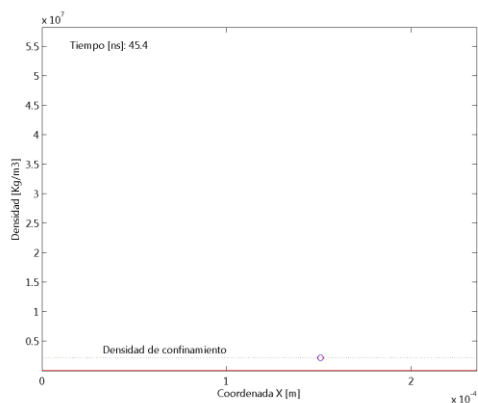
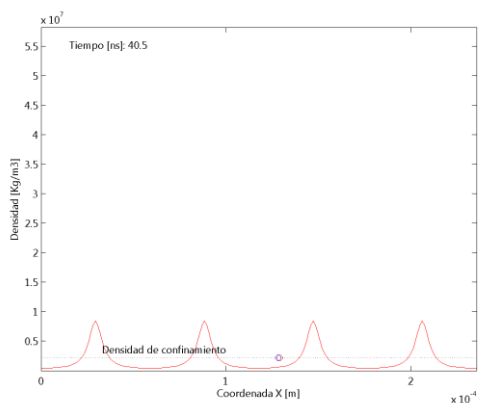
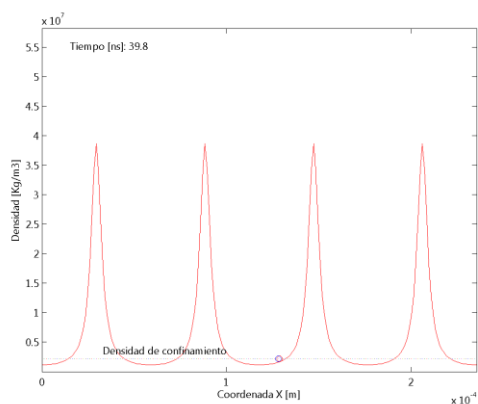
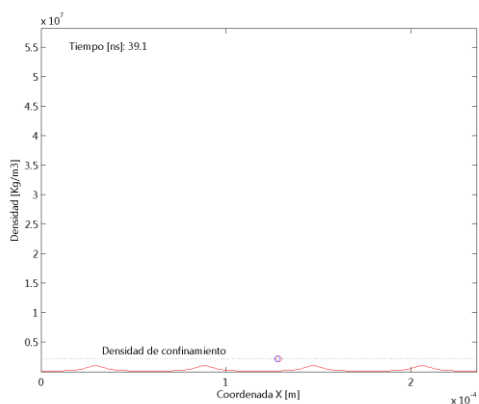
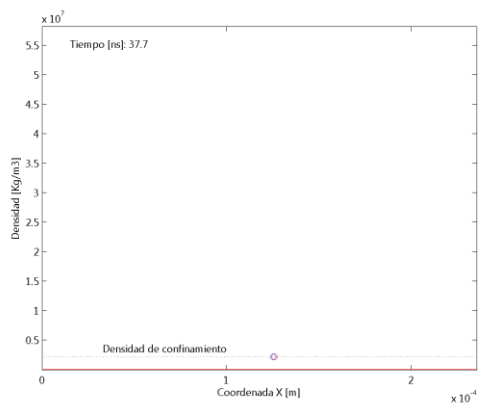
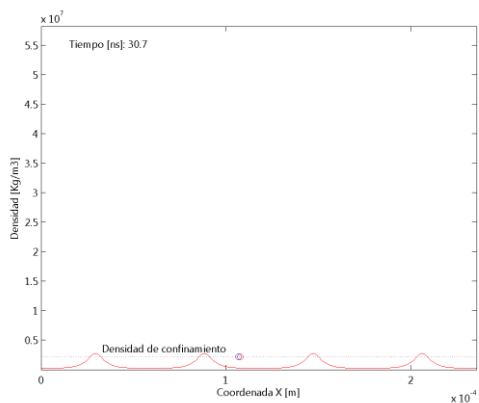
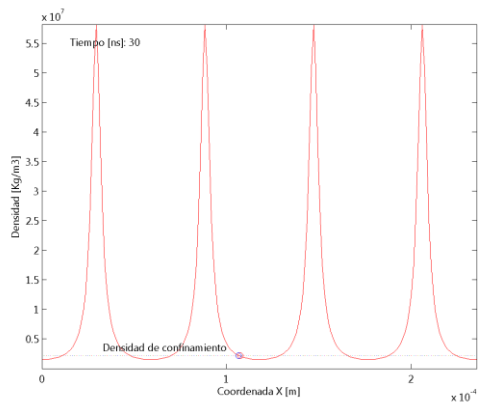
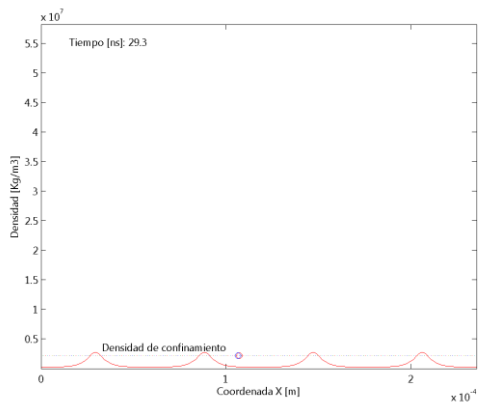
Si se cumple (6.68), la distancia de penetración d_p dependerá de la posición del frente de onda portadora y de las zonas de densidad igual o superior a la de confinamiento en cada instante.

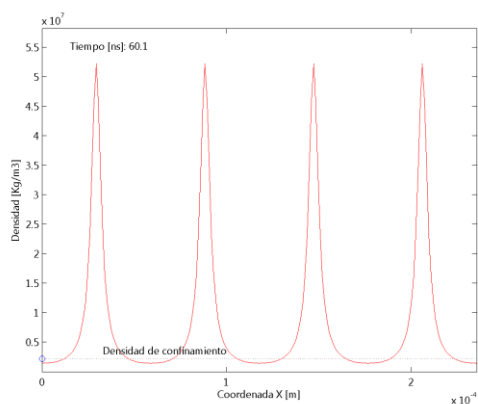
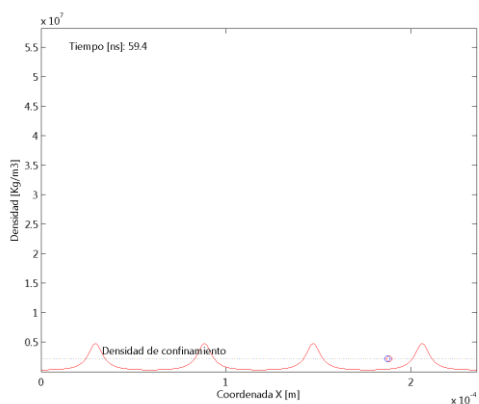
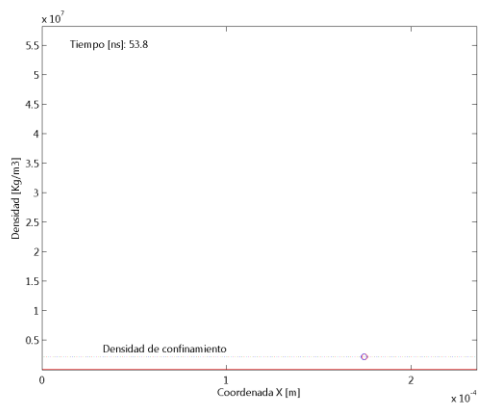
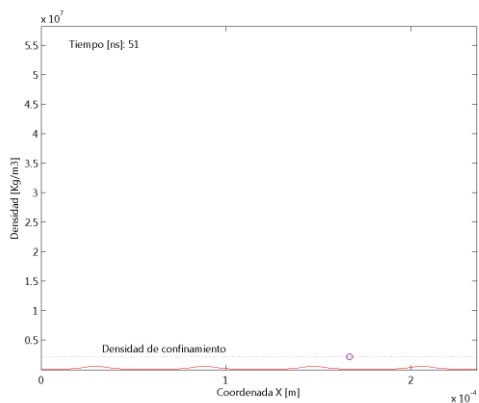
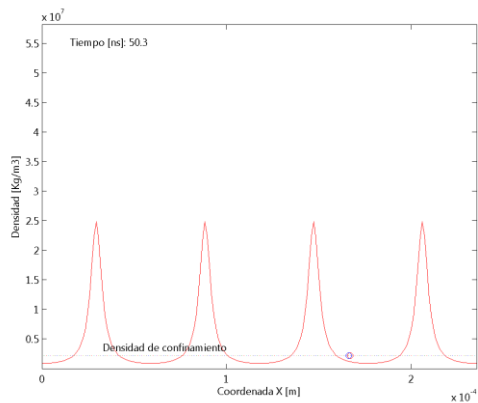
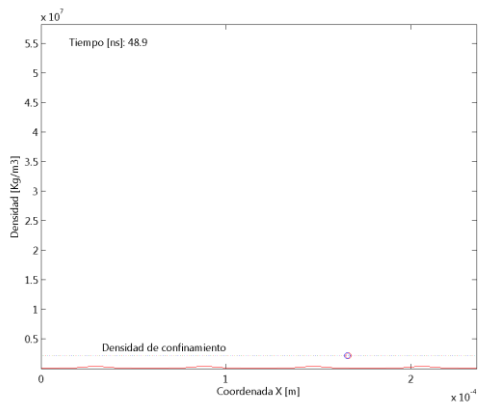
Para analizar esta distancia, desarrollé un algoritmo en Matlab que modeliza la densidad del medio en el espacio de confinamiento, y calcula la posición del frente de onda T en cada instante, hasta su reflexión total (es decir, aportando energía al material). Dicho algoritmo se encuentra en el anexo B.

La secuencia siguiente es una captura del programa en ejecución. Los datos ingresados y la distancia de penetración se observan luego. El punto rojo representa el frente de onda portadora, mientras que el punto azul representa el fin del tren de onda que se genera cuando se corta la misma.









```

MATERIAL: ACERO SAE 1010
-----
Densidad normal [Kg/m3]
    7860

Módulo de Young [N/m2]
    2.1e+011

Coeficiente de Poisson
    0.27

Espesor mínimo de borde de grano [nm]
    0.8

Espesor máximo de borde de grano [nm]
    3

Frecuencia operativa máxima de la onda transversal [MHz]
    2.7914e+005

Frecuencia de la onda transversal (óptima) [MHz]
    1.2245e+005

Factor (Ak) mínimo para confinamiento
    0.84604

Factor (Ak) utilizado (óptimo)
    0.94868

Relación tc/TL (óptima)
    0.14944

Frecuencia de la onda longitudinal recomendada [MHz]
    612.27

Ingrese la frecuencia de la onda longitudinal [MHz]: 100

Período de la onda L [ns]
    10

Longitud de onda L [micrones]
    58.9

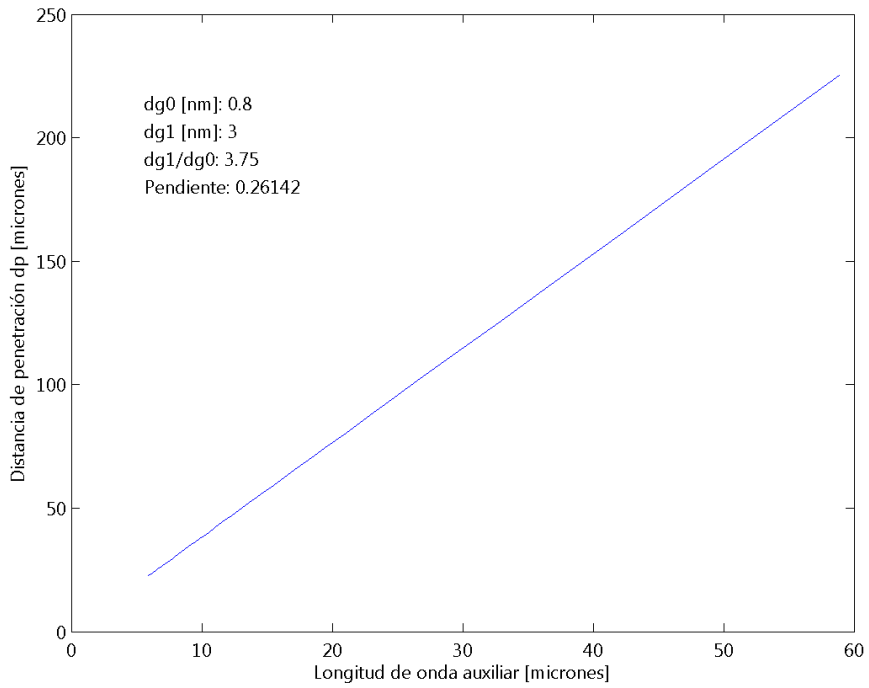
Tiempo de confinamiento por periodo TL en cada pico de densidad [ns]
    1.4944

Amplitud de la onda longitudinal [micrones]
    8.8931

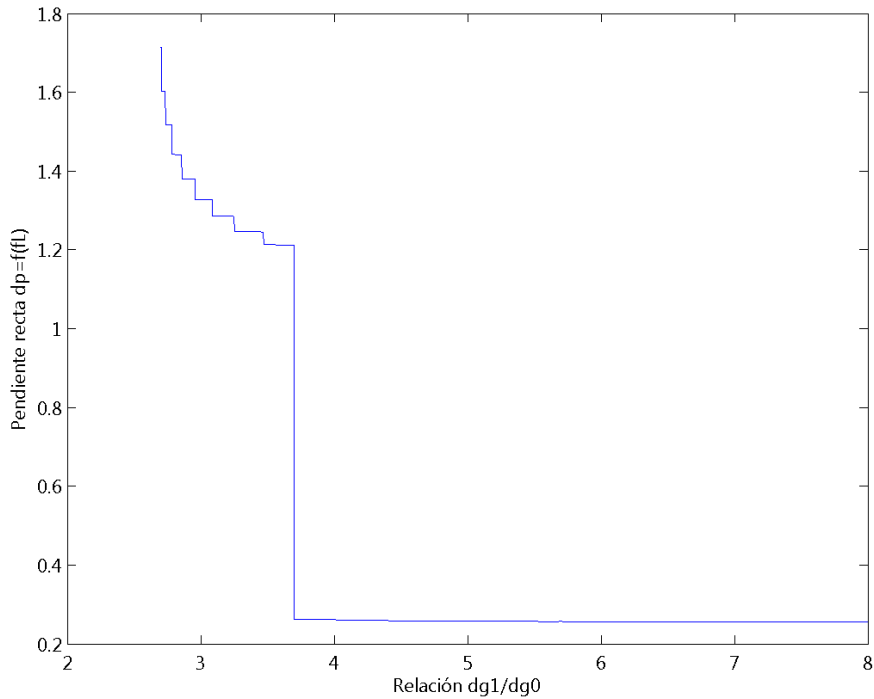
Distancia de penetración [micrones]
    188.44
    
```

Se observa que la distancia de penetración es de varias longitudes de onda auxiliar a una baja frecuencia (100 MHz).

Analizando la distancia d_p para varias frecuencias (esto con una ligera modificación del algoritmo que no se incluye en el anexo), se obtiene la siguiente gráfica en función de la longitud de onda λ_L :



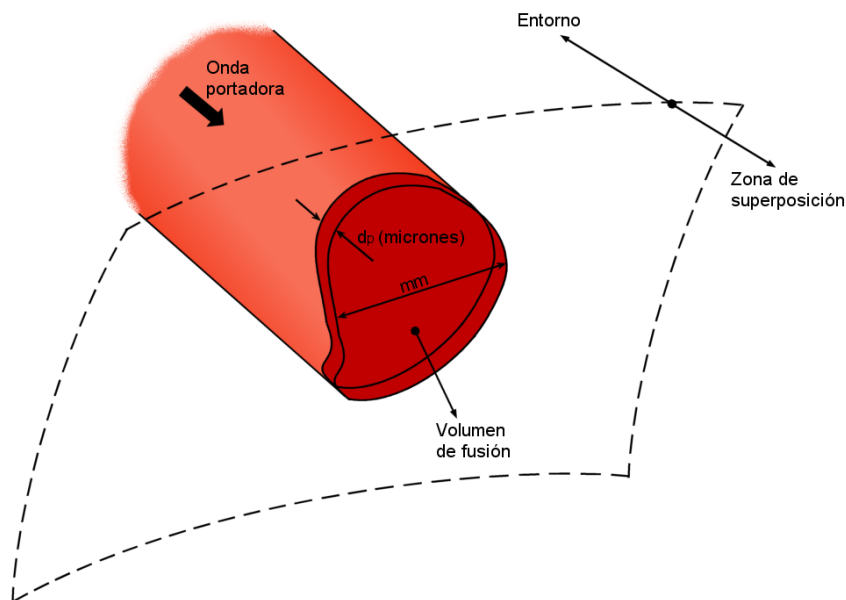
Al igual que el caso anterior, aquí también existe una relación lineal entre la longitud de la onda auxiliar y la distancia de penetración, cuya pendiente es función de la relación d_{g1}/d_{g0} . Para este caso, dicha función es al parecer un tanto arbitraria, esto es porque depende de muchos factores.



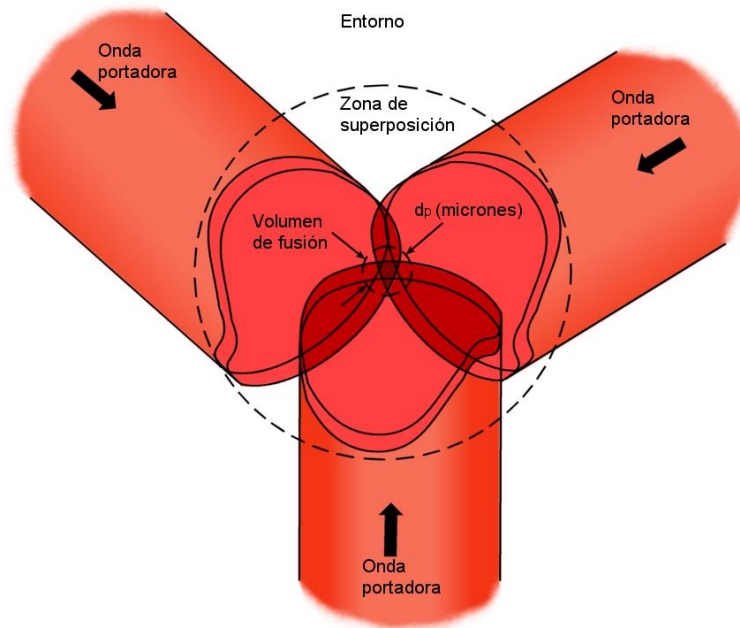
El aspecto escalonado de la función no se debe a una baja discretización del dominio, sino a un comportamiento efectivamente escalonado. La pendiente para una relación de espesores de 3.700 es la misma que para una relación de 3.7015. A partir de una relación de 3.702 hasta 10 inclusive (hasta donde se realizó el análisis) la pendiente toma el valor 0.26143.

GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DE FUSIÓN

La onda portadora tendrá una distancia de penetración d_p en función de la frecuencia de la onda auxiliar. Ahora, el frente de onda será de una dimensión acorde a la sección del transductor utilizado, por lo que será del orden del milímetro. El volumen resultante de la penetración en unos micrones, del haz de onda portadora de sección de milímetros cuadrados, en la zona de superposición de las ondas auxiliares, será grosero y demasiado grande para los requerimientos tecnológicos. Este volumen debería ser del orden de los micrones y de geometría uniforme.



La solución a esto es utilizar un haz de onda portadora por cada onda auxiliar, en los tres ejes cartesianos. De esta manera, la primera zona a fundir será la superposición de las tres, que resultará en un volumen no mayor a la distancia de penetración en todas sus direcciones.



El volumen de superposición de las ondas portadoras será ciertamente un volumen bastante irregular y complejo, ya que resulta de la superposición de tres haces de sección circular (esto es, tres cilindros). Sin embargo, se dijo que el aporte de calor es intermitente en cada período, y además el punto de confinamiento cambia alternadamente de posición dentro de este volumen. Esto da tiempo a que el aporte de calor sea bastante uniforme, y por ello, pueda considerar que aunque el volumen de superposición sea irregular, el volumen de fusión sea una esfera de diámetro d_p . Es verdad que esto no será del todo cierto, pero un estudio exhaustivo sobrepasaría enormemente los alcances de este proyecto final de carrera. Para el presente, se simplificará entonces, a un volumen esférico de diámetro d_p .

Deberá tenerse cuidado de no sobrepasar el tiempo de aporte de calor ya que comenzarán a fundirse las zonas de confinamiento restantes, y el volumen de fusión será grosero.

Entonces se utilizarán tres ondas auxiliares estacionarias en el sistema y tres ondas portadoras, una de cada una por cada eje.

Resumiendo, el volumen de fusión aproximado será:

$$V_F = \frac{1}{6} * \pi * d_p^3 \tag{6.71}$$

Y el área del mismo:

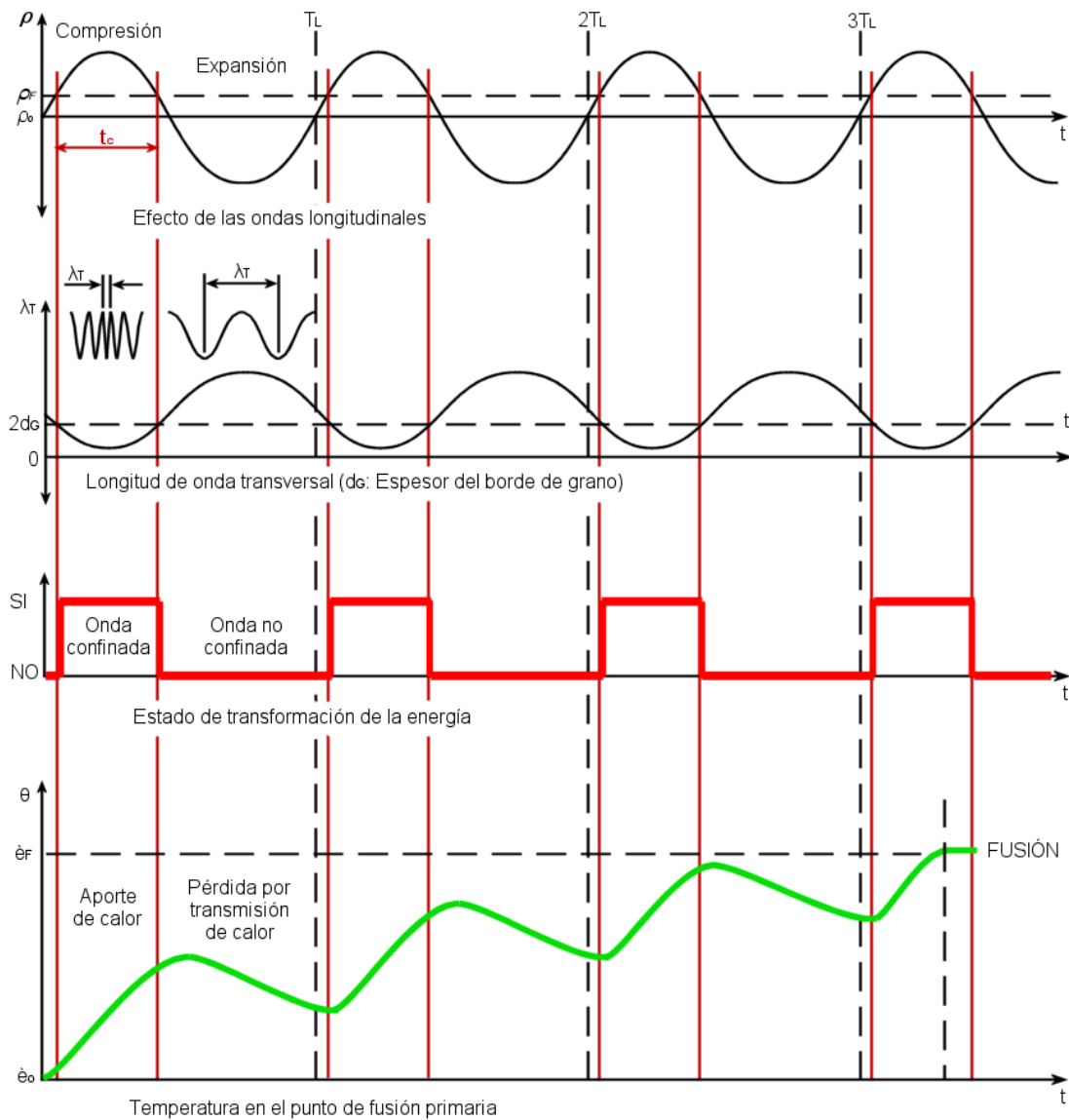
$$A_F = \pi * d_p^2 \tag{6.72}$$

ELECCIÓN DE LA FRECUENCIA DE ONDA AUXILIAR

Como se observó, la frecuencia de las ondas auxiliares está íntimamente ligada con el volumen a fundir. Por ello, se debe hacer una correcta elección de la misma para tener un volumen de fusión acorde a las necesidades del proceso. Pudiendo variar la frecuencia, es posible obtener un mayor o menor volumen de fusión, lo que cambia la geometría obtenida al extraer el material.

CICLO DE CALENTAMIENTO Y FUSIÓN

Resumiendo lo desarrollado hasta aquí, el ciclo de calentamiento y fusión de un volumen unitario de material quedaría representado de según los siguientes gráficos.



Si bien se observa un enfriamiento en ciertos momentos en el último gráfico, podría darse el caso que este enfriamiento no ocurra ya que mientras dicho punto pierde energía por transmisión de calor hacia el entorno, esta pérdida queda compensada por el calentamiento en puntos cercanos, que ceden su energía.

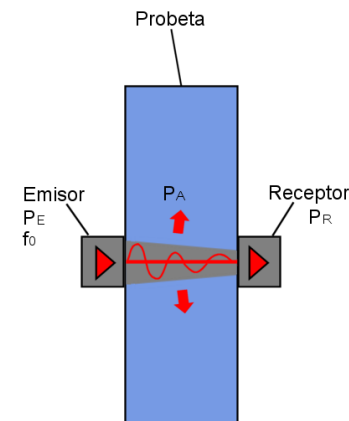
MECANISMO DE TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA

Se debe dejar claro que este mecanismo de confinamiento de la onda no modifica el modo en que la energía se transmite al material. Esta transmisión se debe a las pérdidas por absorción de la onda portadora durante su propagación. No se maximizan tampoco estas pérdidas en el punto caliente, pero al confinarse la onda, las mismas se concentran en el punto deseado. Es por ello que se aprovecha esta energía. Si la onda quedara confinada hasta su disipación completa, entonces se estaría utilizando toda la energía de la misma para la fusión. Esto no sucede porque, como se explicó anteriormente, sólo puede aprovecharse en un tiempo t_c por cada período T_L de la onda auxiliar.

Ensayo de absorción (propuesto)

Lamentablemente existe poca información teórica sobre la absorción de energía de una onda mecánica por parte del medio. Es por ello que se sugiere el presente ensayo para obtener datos experimentales, que dicho sea de paso, podrían brindar mejores resultados que una fórmula basada en desarrollos matemáticos y teorías físicas.

Para la validación de estos datos se deben intentar recrear lo mejor posible las características del material en el interior del grano, pues en el proceso, la onda estará confinada dentro del mismo. Para ello, si el material a procesar es un acero SAE 1010 por ejemplo, la probeta deberá ser del mismo material, pero de muy bajo espesor y con el mayor tamaño de grano posible. Esto es así para que la onda atraviese la menor cantidad de bordes de grano posibles, de lo contrario se disipará mucha energía en los mismos y el ensayo podría arrojar datos erróneos.



El ensayo se realizará a diferentes frecuencias. Se medirá la potencia en el receptor P_R . Se considerará entonces un factor k_d de potencia disipada, tal que:

$$k_d = \frac{P_E - P_R}{P_E} \Rightarrow \quad (6.73)$$

$$\Rightarrow P_A = P_E - P_R = k_d * P_E \quad (6.74)$$

P_A es la potencia absorbida por el medio, será la utilizada para calentar el material.

Energía aportada al punto caliente

En el volumen de fusión, habrá un aporte de energía E_A , y una pérdida por transmisión de calor hacia el entorno E_P . El aporte E_A sucede en sólo en el tiempo t_c por cada tiempo T_L , mientras que la pérdida E_P sucede en todo el período T_L . Entonces, en cada período T_L se cumple:

$$E_A = P_A * t_c \quad (6.75)$$

$$E_P = P_P * T_L \quad (6.76)$$

$$E_{N_{ciclo}} = E_A - E_P = P_A * t_c - P_P * T_L \quad (6.77)$$

Reemplazando (6.74) en (6.77):

$$E_{N_{ciclo}} = k_d * P_E * t_c - P_P * T_L \quad (6.78)$$

Esta energía $E_{N_{ciclo}}$ es la neta entregada al volumen de fusión por cada período T_L . Por lo tanto la potencia entregada al mismo es:

$$P_N = \frac{E_{N_{ciclo}}}{T_L} = \frac{k_d * P_E * t_c}{T_L} - P_P \quad (6.79)$$

Reescribiendo la fórmula (3.3), la energía necesaria para la fusión del volumen es:

$$E_f = \rho_F * V_F * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f] \quad (6.80)$$

Para lograr esto se cumple:

$$E_f = P_N * \Delta t \quad (6.81)$$

Siendo Δt el tiempo total de fusión de un volumen de material. Combinando las ecuaciones:

$$\rho_F * V_F * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f] = \left[\frac{k_d * P_E * t_c}{T_L} - P_P \right] * \Delta t \quad (6.82)$$

De aquí se despeja la potencia necesaria de la onda portadora P_E :

$$P_E = \frac{T_L}{k_d * t_c} * \left\{ \frac{\rho_F * V_F * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f]}{\Delta t} + P_P \right\} \quad (6.83)$$

Esta potencia será una fracción de la entregada por los transductores de onda portadora, ya que solo una porción del área del frente del haz es la que llega a la zona de fusión deseada. Esta fracción será para cada transductor de sección redonda y diámetro efectivo d_T :

$$\frac{\pi/4 * d_p^2}{\pi/4 * d_T^2} = \frac{d_p}{d_T} \quad (6.84)$$

De aquí, para tres transductores:

$$P_E = 3 * P_T * \frac{d_p}{d_T} \quad (6.85)$$

Siendo P_T la potencia de cada onda portadora que debe llegar al punto de fusión. Reemplazando esta ecuación en el lado derecho de (6.83) y el volumen de fusión del lado izquierdo por la ecuación (6.71), se obtiene:

$$P_T = \frac{d_T * T_L}{3 * k_d * d_p * t_c} * \left\{ \frac{\rho_F * \pi * d_p^3 * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f]}{6 * \Delta t} + P_p \right\} \quad (6.86)$$

T_L es el período de las ondas auxiliares (longitudinales).

t_c es el tiempo de aporte de energía por período de onda auxiliar (6.58).

k_d es el factor de potencia absorbida por el volumen de fusión (Ensayo de absorción).

ρ_F es la densidad mínima para el confinamiento de la onda (6.41).

d_T es el diámetro efectivo del transductor de sección redonda de las ondas auxiliares.

d_p es el diámetro del volumen de fusión (depende de los parámetros de las ondas y puede obtenerse por el algoritmo).

C_p es la capacidad calorífica del material.

θ_f es la temperatura de fusión del material.

θ_0 es la temperatura del material al inicio del proceso.

L_f es el calor latente de fusión.

Δt es el tiempo de total de calentamiento y fusión del volumen.

P_p es la potencia perdida por transmisión de calor hacia el entorno (no se desarrolla en este proyecto por la extensión del mismo, pero debe tenerse en cuenta).

Amplitud de la onda portadora

Hasta aquí, la amplitud de la onda transversal ha sido el único parámetro sin definir de las ondas ultrasónicas. Definida la potencia necesaria de las ondas portadoras (la necesaria para fundir el volumen de material), sus frecuencias y la velocidad de propagación, la amplitud será función de estas variables. La función de potencia de una onda⁵ es:

$$P_{T0} = \frac{1}{2} * m * \omega_T^2 * A_T^2 = \frac{1}{2} * \rho_{acero} * C_T * \left(\pi * \frac{d_T^2}{4} \right) * (2 * \pi * f_T)^2 * A_T^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{T0} = \frac{\pi^3}{2} * \rho_{acero} * C_T * d_T^2 * f_T^2 * A_T^2 \quad (6.87)$$

Despejando, la amplitud correspondiente es:

$$A_T = \frac{1}{d_T * f_T} * \sqrt{\frac{2 * P_{T0}}{\pi^3 * \rho_{acero} * C_T}} \quad (6.88)$$

Se diferencia la potencia P_{T0} de P_T pues la primera corresponde a la entregada por cada transductor transversal, mientras que P_T es la sumatoria de todos los transductores (necesaria para fundir el material).

Ya que la frecuencia de la onda transversal se determina en base a los espesores de borde de grano, la amplitud determina la potencia de la onda y con ello el tiempo de fusión. A mayor amplitud, menor tiempo del proceso.

⁵ Ver bibliografía: "Physics of Waves", William Elmore y Mark Heald, McGraw-Hill.

CAPÍTULO 7. TRANSPORTE DE ENERGÍA DENTRO DEL SÓLIDO

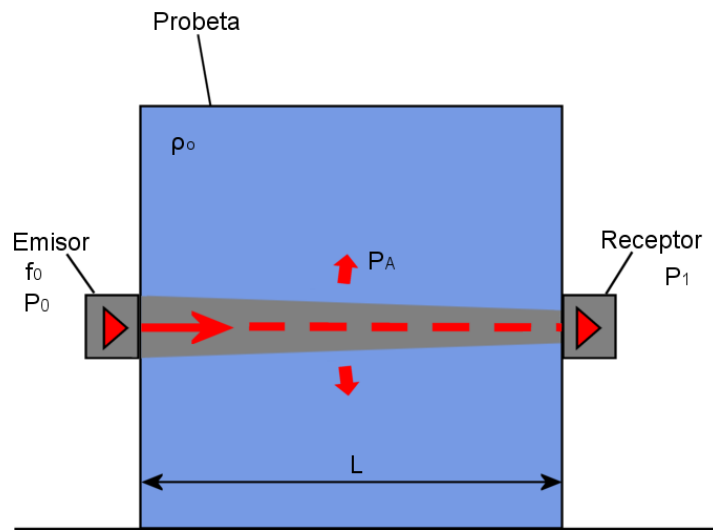
Ya que el transporte de energía se ha tenido en cuenta para el desarrollo de los capítulos anteriores, aquí sólo mencionaré algunos aspectos importantes a tener en cuenta en este transporte desde la frontera del sólido hasta el punto deseado de fusión.

Los aspectos más importantes serán la disipación de la energía por absorción del medio y la divergencia del haz.

PÉRDIDAS POR ABSORCIÓN

La pérdida de potencia de la onda portadora será función de las características del medio, la frecuencia y la distancia entre el transductor y el punto a fundir.

Estas pérdidas podrían estimarse mediante un procedimiento similar al ensayo propuesto de absorción, solo que en vez de utilizar un material de tamaño de grano grande, éste deberá ser de las mismas características del que se utilizará en el proceso. La probeta deberá además tener un espesor considerable para tener un valor de pérdida de energía por unidad de longitud recorrida que sea representativo.



Este valor, en función de la distancia a recorrer y considerando la velocidad media de propagación de la onda portadora, puede traducirse en la pérdida de potencia durante el transporte de energía. Esta pérdida de potencia deberá ser considerada y compensada aumentando la potencia de salida del transductor.

$$\frac{P_A}{L} = \frac{\Delta P_a}{\Delta l} \tag{7.1}$$

Multiplicando este factor por la distancia que recorrerá el haz hasta el punto a fundir, se tiene la potencia que se debe aumentar:

$$P_{abs_x} = \frac{\Delta P_a}{\Delta l} * x \quad (7.2)$$

Hay que tener en cuenta que esta potencia a compensar se da en cada dirección, y que las distancias a recorrer no serán las mismas en todas las direcciones, ya que dependen de las coordenadas del punto a fundir. Por lo tanto así deberían realizarse tres reajustes de potencia, el dado en la dirección x (7.2) y en las demás direcciones:

$$P_{abs_y} = \frac{\Delta P_a}{\Delta l} * y \quad (7.3)$$

$$P_{abs_z} = \frac{\Delta P_a}{\Delta l} * z \quad (7.4)$$

Esto implicaría una potencia de salida diferente para cada transductor. Pero es posible balancear estas potencias para que la potencia neta de compensación sea la necesaria para suplir las pérdidas totales en las tres direcciones. De este modo la salida de potencia será la misma para cada transductor. Entonces:

$$P_{abs} = P_{abs_x} + P_{abs_y} + P_{abs_z} = \frac{\Delta P_a}{\Delta l} * (x + y + z) \quad (7.5)$$

Sumando en la fórmula (6.86) esta potencia a compensar debido a las pérdidas en las tres direcciones:

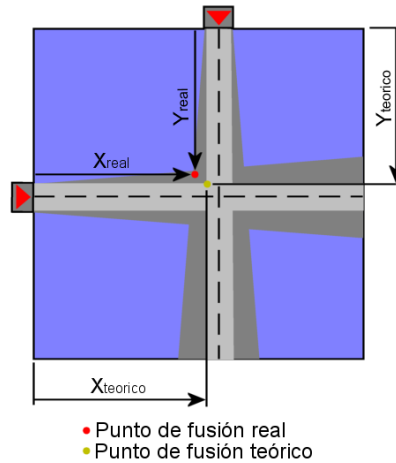
$$P_T = \frac{d_T * T_L}{3 * k_d * d_p * t_c} * \left\{ \frac{\rho_F * \pi * d_p^3 * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f]}{6 * \Delta t} + P_{abs} + P_P \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_T = \frac{d_T * T_L}{3 * k_d * d_p * t_c} * \left\{ \frac{\rho_F * \pi * d_p^3 * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f]}{6 * \Delta t} + \frac{\Delta P_a}{\Delta l} * (x + y + z) + P_P \right\} \quad (7.6)$$

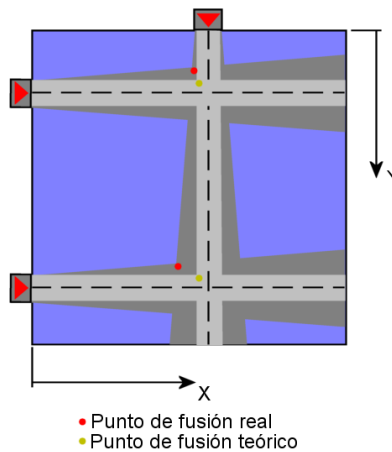
Hay que tener en cuenta que estas distancias con los transductores x, y, z pueden ser efectivamente las coordenadas si se establece un sistema de coordenadas apropiado tal que el origen en cada dirección se encuentra en la interfase con los transductores.

DIVERGENCIA DEL HAZ

Todos los haces de ondas del proceso sufrirán una divergencia que influirá principalmente en las coordenadas reales del punto a fundir. El punto sufrirá un desplazamiento en sus coordenadas reales en dirección a los transductores de onda transversal. El valor del desplazamiento será función de la divergencia de cada haz en dicha coordenada. Como se observa en la figura siguiente, a mayor divergencia, mayor desplazamiento.



De la misma manera, mientras más cerca se encuentren las coordenadas teóricas a los transductores, menor será este corrimiento.



Puede observarse que a mayor coordenada Y, por la divergencia del haz, habrá un desplazamiento en la coordenada real X del punto de fusión.

Ahora, la zona de fusión se sitúa en la zona de los haces de onda estacionaria longitudinal. Siendo estacionarias, se generan con un transductor de cada lado, por lo que la divergencia máxima se dará a media distancia entre transductores. Teniendo entonces el ángulo de divergencia de los transductores y las dimensiones del material base, es posible estimar el desplazamiento máximo.

El ángulo de divergencia depende de la naturaleza del transductor, su geometría y su longitud de onda. Por ejemplo, para un transductor de cuarzo de sección circular, el semiángulo de divergencia⁶ es:

$$\text{sen}(\alpha) = 1.2 * \frac{\lambda}{d_T} \quad (7.7)$$

⁶ Esta fórmula se indica en el libro "Ultrasonics", de Benson Carlin. Remarcando que este libro es del año 1949, esta fórmula podría no ser aplicable a los transductores actuales.

La longitud de onda será la de la onda portadora, ya que será la de menor divergencia y estará dentro de los haces de onda auxiliar. Por tanto para dicho transductor, el desplazamiento del punto de fusión en la dirección x de su posición ideal, será:

$$\delta x = 1.2 * \frac{\lambda_t}{d_T} * y \quad (7.8)$$

Y la posición real en x estará desplazada en dirección al transductor, es decir:

$$x_{real} = x_{ideal} - \delta x = x_{ideal} - 1.2 * \frac{\lambda_t}{d_T} * y \quad (7.9)$$

No tiene mucho sentido seguir el desarrollo de estas ecuaciones ya que dependerá como se dijo, de la naturaleza y geometría de los transductores, y un estudio exhaustivo de la divergencia en función de cada tipo, y la búsqueda de las características ideales, excede los alcances de este proyecto como tesis final de grado.

Sí es mi intención en este capítulo dejar en claro estos factores que influyen en la posición real del punto a fundir. Con un estudio riguroso pueden aplicarse factores de corrección en la posición de los transductores para compensar estos desplazamientos. Con un sistema de control adecuado estas correcciones podrían realizarse automáticamente y en tiempo real.

Como observación final, es necesario aclarar que las dimensiones de los transductores más pequeños son de unos pocos milímetros de diámetro. Teniendo en cuenta que la frecuencia de la onda portadora es del orden de GHz, la divergencia podría ser prácticamente despreciable.

CAPÍTULO 8. GEOMETRÍA DEL SÓLIDO A PROCESAR

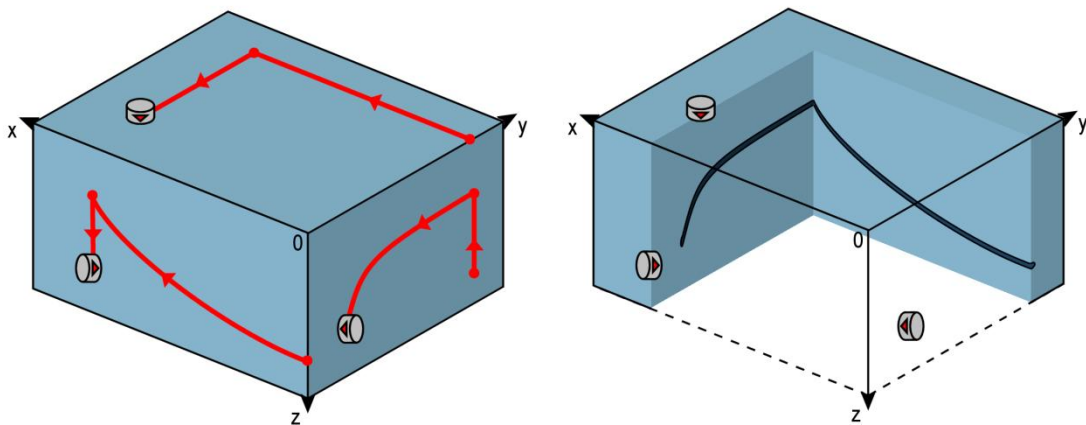
En este capítulo definiré un requerimiento para el proceso, que facilitará enormemente el control de la posición del punto de fusión, a la vez mejorará los tiempos de proceso y los requerimientos constructivos de los transductores.

El nuevo requerimiento es que al procesar un material, la geometría inicial exterior sea un prisma, con una gran terminación superficial, y buena perpendicularidad entre sus caras.

El propósito es facilitar en el proceso lo siguiente:

- Una superficie plana y geometría prismática para que los transductores puedan moverse con libertad sobre las caras y así los haces puedan converger a cualquier punto dentro del sólido.
- Una buena terminación superficial para lograr un buen acople entre el transductor y el sólido. Esto garantiza un buen control de las ondas dentro del mismo.
- La superficie plana permite el uso de transductores de construcción simple.

Todas estas características harán que el proceso sea flexible a la hora de lograr geometrías interiores complejas. El procesamiento de la geometría exterior podría obtenerse por mecanizado, pero debería realizarse posteriormente al interior, pues de lo contrario esta geometría interferiría con el movimiento libre de los transductores sobre la superficie del material. En la figura se observa un ejemplo del movimiento de los transductores sobre los planos durante el proceso, fundiendo el material en el punto de convergencia de los haces ultrasónicos (este punto será móvil en el espacio dentro del sólido). A la derecha se esquematiza un corte con el conducto interno final. Obviamente siempre deberá comenzarse la fusión en un punto de la superficie, para poder extraer el material fundido. Una buena aplicación para este proceso sería la fabricación de cuerpos de válvulas hidráulicas y neumáticas, y bloques de válvulas.



CAPÍTULO 9. CARACTERÍSTICAS DEL TRANSDUCTOR

Para lograr un control preciso de las propiedades de las ondas dentro del medio, es necesario que el acoplamiento entre el transductor y el sólido sea el mejor posible, pues es con los parámetros del transductor que se controlarán estas propiedades.

Actualmente los transductores de menores dimensiones poseen un diámetro efectivo de unos pocos milímetros, y los de mayores frecuencias son del orden de los 5 GHz. Por lo tanto para la viabilidad de este proceso será necesario el desarrollo de transductores de mayor frecuencia.

Con respecto al acople, el poseer una superficie plana y con alta terminación superficial permitirá un acople adecuado. Sin embargo actualmente se están desarrollando nuevos transductores sin contacto (tecnología EMAT para ensayos no destructivos, por ejemplo).⁷

Estos transductores sin contacto emplean principios físicos de electromagnetismo y de acústica que generan a su vez la onda ultrasónica en el material. Sus grandes ventajas son su capacidad de generar diferentes tipos de ondas, y no depender del estado y temperatura de la superficie. Además se pueden emplear con el cuerpo en movimiento, y obviamente se elimina la necesidad del gel acoplante.

En caso de desarrollarse y optar por transductores sin contacto, quizás sea posible eliminar la restricción de la terminación de superficie y forma inicial del sólido a procesar, pero en tal caso habría que asegurar mediante alguna especie de controlador la dirección y demás parámetros de los haces ultrasónicos de forma precisa y rápida. Dado que la potencia de la onda portadora es la que se transmitirá al sólido para su fusión, es necesario minimizar la pérdida de potencia entre el transductor y el material.

Actualmente existe un método de generación de ondas ultrasónicas por láser.⁸ Mediante la incidencia de un láser de alta energía en forma de pulsos, se vaporiza una pequeña capa de material en la superficie, creando un rompimiento dieléctrico entre el material y la pieza, generando ondas de ultrasonido por el método de plasma. Según publicaciones técnicas, este método de generación de energía es muy eficiente, aunque produce el daño en la superficie del material. Otras ventajas es que no existen problemas de acoplamiento o forma del material, se puede utilizar en materiales a alta temperatura y generan ondas de alta frecuencia. Actualmente el costo de esta tecnología es muy alto.

⁷ Ver artículo técnico "NON-CONTACT ULTRASOUND (NCU)", de ULTRAN. www.ultrangroup.com

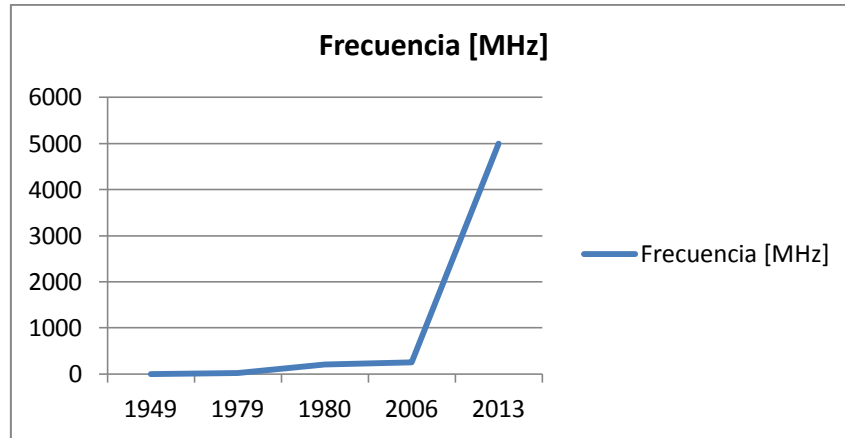
⁸ Ver sitio web: www.tecnar.com/index.php/products/laser-ut

GENERACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Transductores piezoeléctricos	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo costo. -Distintos modos de vibración. -Sencillez y eficacia en el control de los parámetros. -Baja pérdida de potencia en la interfase. 	<ul style="list-style-type: none"> -Debe darse importancia al acople. -Posibles problemas de acoplamiento durante el movimiento del transductor. -Posibles problemas a altas temperaturas. -Limitaciones constructivas para el espesor del haz. -Limitaciones en la frecuencia. -Se necesita buena terminación superficial.
EMAT (Electromagnetic & Acoustic Transducers) (TECNOLOGÍA NUEVA Y EN DESARROLLO)	<ul style="list-style-type: none"> -Distintos modos de vibración. -No se necesita gel acoplante. -Pueden trabajar a altas temperaturas del material. -Puede darse movimiento al transductor. -Sin restricciones en la superficie y forma del material. 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja potencia de emisión. -Complejidad a la hora de controlar los parámetros del haz.
Generación por Láser (TECNOLOGÍA NUEVA Y EN DESARROLLO)	<ul style="list-style-type: none"> -No se necesita gel acoplante. -Altas potencias y frecuencias. -Pueden trabajar a altas temperaturas del material. -Sin restricciones en la superficie y forma del material. -Puede darse movimiento al transductor. -Bajas pérdidas de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> -Daño de la superficie del material. -Alto costo. -Limitación en los modos de vibración. -Complejidad a la hora de controlar los parámetros del haz.

Por lo anterior, se podría concluir que las ventajas de los transductores sin contacto obligan a considerarlos como los idóneos para este proceso (ya sea tecnología EMAT o láser). Sin embargo especificar un tipo de transductor en especial, sería contraproducente, ya que sería mejor analizar las alternativas de los diseños existentes que se vayan desarrollando. Sí es necesario especificar, como ya se ha hecho, que las frecuencias de excitación deberán ser del orden de los GHz para los transductores de onda transversal (ondas portadoras), y del orden de los MHz para los de onda longitudinal (auxiliares). A continuación se presenta un gráfico sobre la evolución de las frecuencias máximas utilizadas.⁹

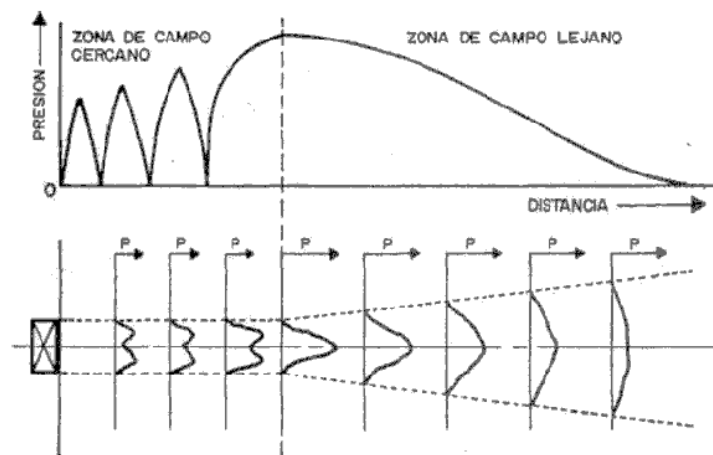
Año	Frecuencia
1949	0.5 MHz
1979	25 MHz
1980	200 MHz
2006	250 MHz
2013	5 GHz
?	100 GHz

⁹ Según datos extraídos de catálogo de transductores standard ULTRAN, del libro “Ultrasonics”, de Benson Carlin, año 1949 y Wikipedia (ver bibliografía).



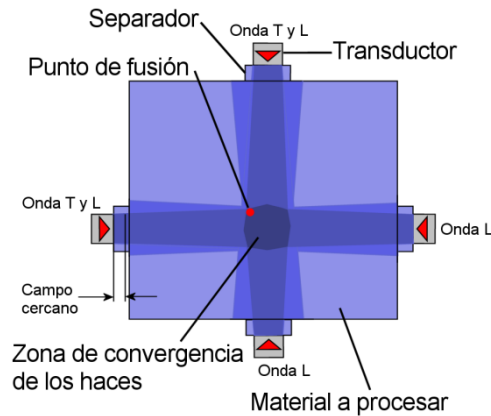
CONSIDERACIÓN DE LA DISTANCIA FOCAL

Los transductores ultrasónicos poseen una distancia focal dentro de la cual la onda se “conforma”, llamada *campo cercano*, donde la presión acústica llega a su pico. A partir de esta distancia (*campo lejano*), los parámetros de la onda son los deseados y el transductor es efectivo.¹⁰



Por ello, el punto de fusión no debería situarse dentro del campo cercano de ninguno de los transductores. Para solucionar este inconveniente, colocando un separador de espesor igual o mayor al campo cercano entre los transductores y la pieza, se podrá fundir material en la superficie del sólido, próximo a los transductores. Como desventajas de esta alternativa se puede mencionar que habrá más interfases entre el transductor y el material, lo que implica mayores pérdidas y necesidad de mayores cuidados con el acople. Además si el separador no es de sección suficiente podrían existir rebotes de los haces con la superficie externa que ocasionará distorsiones en el haz principal, cambiando las características del mismo. El control de los parámetros de la onda podría tornarse más complejo.

¹⁰ Extraído de cátedra de Ensayos Especiales, Ingeniería Mecánica, UNR.



Este inconveniente no surgirá en el caso de utilizar transductores sin contacto, lo que es una ventaja más para este tipo de tecnología aún en desarrollo.

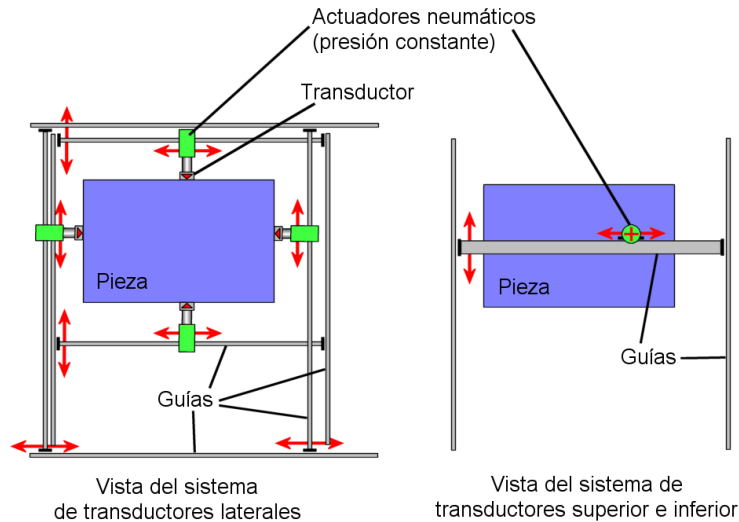
MODOS DE EXCITACIÓN Y SISTEMA DE TRANSDUCTORES

Recordando la necesidad de ondas estacionarias para las ondas auxiliares y ondas viajeras para las portadoras, serán necesarios tres transductores con ambos modos de excitación (uno para cada eje x, y, z) y tres transductores de excitación longitudinal, que serán colocados opuestos a los primeros, para producir las ondas auxiliares estacionarias.

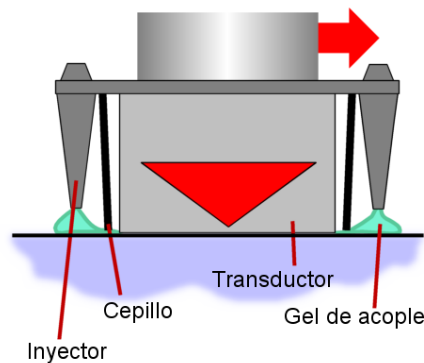
El diseño del sistema de transductores debe lograr una excitación longitudinal y transversal simultánea, a las frecuencias correspondientes. Posiblemente deba desarrollarse una configuración específica para esta aplicación, ya sea mediante transductores piezoeléctricos acoplados, o un sistema análogo a la tecnología EMAT o láser, con este modo de excitación transversal y longitudinal combinados.

MOVIMIENTO DEL PUNTO DE FUSIÓN

Para lograr el movimiento del punto de fusión, en caso de utilizar transductores de contacto es necesario que éstos se desplacen sobre la superficie de la pieza. Mediante un sistema neumático puede asegurarse el acople adecuado entre transductores y el material, con una presión controlada. Un sistema de guías y motores paso a paso completarían el sistema de movimiento de los transductores. Un esquema puede observarse en la figura siguiente.

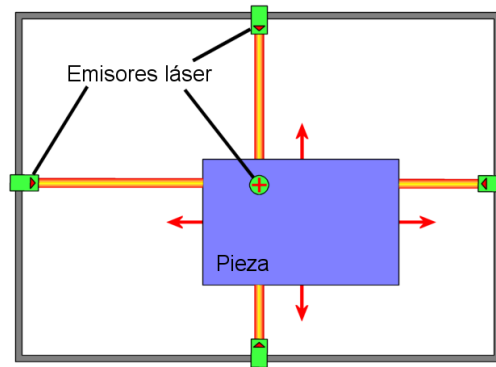


Como estos transductores necesitan un gel de acople, podría adicionarse un sistema auxiliar con inyectores acoplados alrededor de cada transductor, que provean el gel necesario a medida que el transductor se mueve sobre la superficie, y algún elemento simple (como un cepillo entre inyector y transductor) que distribuya el gel antes del paso del mismo.



En caso de utilizar transductores sin contacto análogos a los EMAT, el sistema deberá ser similar, sólo que deberá controlarse la distancia entre el transductor y la superficie de la pieza en vez de la presión de contacto, y se prescinde del sistema de inyección de gel de acople.

Si se utilizara láser para generar las ondas ultrasónicas, entonces los disparadores de cada haz láser pueden ubicarse a distancia de la superficie. Gracias a esto, estos emisores pueden quedar inmóviles (con la convergencia del haz calibrada y fijada previamente), siendo la pieza la que se mueva.



Características de los motores paso a paso

La resolución de los motores paso a paso deberá ser muy alta, que permita el control de desplazamientos del orden de unos pocos micrones. Por ello deberán además soportar altas velocidades de giro (para desplazamientos largos en poco tiempo). La potencia necesaria para mover las guías será función del peso de los elementos a desplazar m_d , la velocidad deseada v_d y del coeficiente de rozamiento μ_d . La potencia de cada motor paso a paso puede calcularse considerando un factor de rendimiento η_m .

$$P_m = \frac{g \cdot m_d \cdot \mu_d \cdot v_d}{\eta_m} \quad (9.1)$$

CAPÍTULO 10. CONTROL DE LA CONVERGENCIA

Para lograr la fusión de un volumen de material es necesario asegurar la convergencia de los haces ultrasónicos, además se requiere un control preciso de las coordenadas de dicho punto. Por lo tanto es imprescindible un sistema que cumpla estas dos funciones.

Cálculo del punto de convergencia vs Control de lazo cerrado

Para el control espacial de la convergencia (punto de fusión) existen dos alternativas.

La primera es establecer la dirección y ubicación de los transductores según cálculos matemáticos. Pero para ello se debería conocer datos precisos como ángulo de refracción de los haces a través del medio, y no podría verificarse con precisión la convergencia, ni las coordenadas de la misma. Cualquier imperfección del medio no previsto o cálculo erróneo podría significar la no convergencia de los haces ultrasónicos o un desfasaje en la posición del punto a fundir.

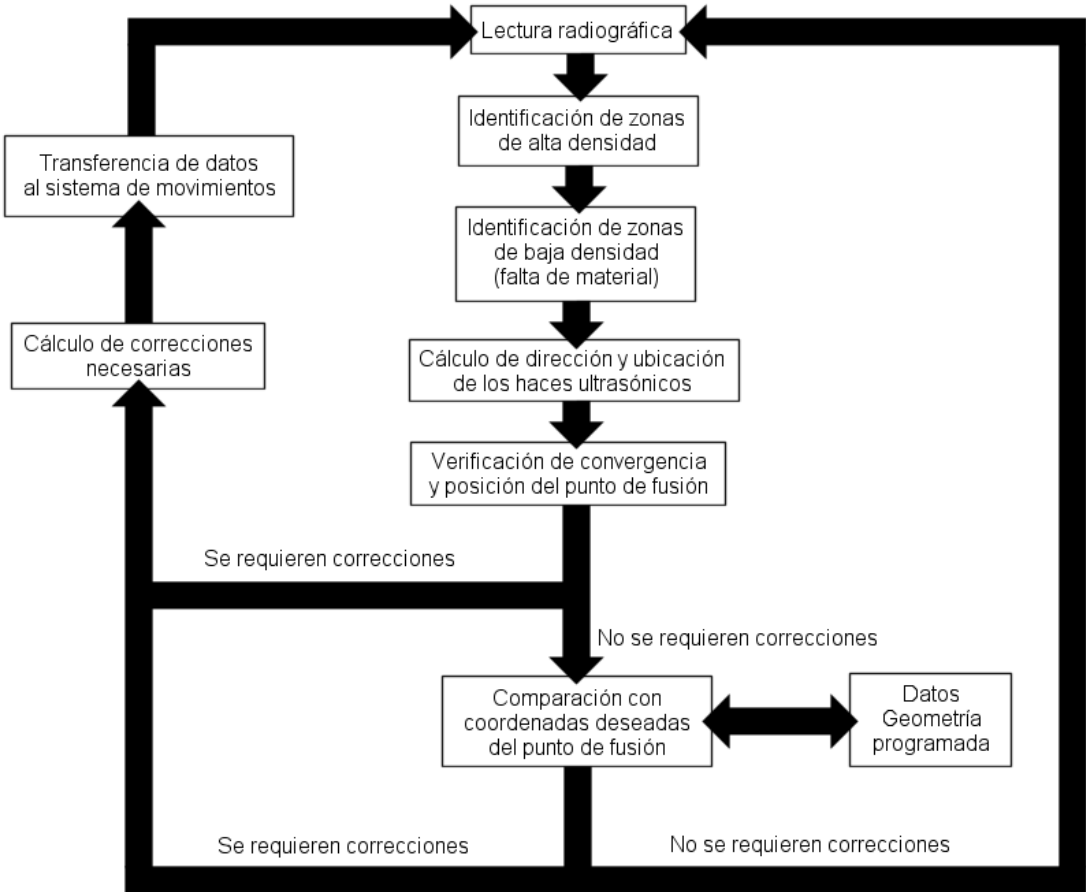
La segunda (y mejor alternativa) es más simple y efectiva aunque más costosa. Consta en utilizar un equipo de Rayos X con medición permanente sobre toda la pieza. Los haces ultrasónicos auxiliares provocan un aumento considerable de densidad que será detectado por el equipo. La zona de convergencia será aún más identificable por su alta densidad. Gracias a ello, mediante un software informático combinado con el sistema de movimiento de los transductores será posible localizar el punto a fundir, y realizar correcciones y movimientos en tiempo real. También se detectará la fusión del material cuando se detecte la disminución repentina de densidad (extracción de material), lo que permitirá no excederse en el tiempo de fusión. Para este sistema se requerirá:

- Una alta resolución y velocidad de radiografiado.
- Alta tasa de refresco.
- Alta frecuencia de lectura y procesamiento de la información.
- Rapidez de transferencia de datos al sistema de movimiento.
- Sistema de movimiento de alta velocidad y precisión.

Nikon comercializa equipos para inspección metrológica de geometría interna y externa, que utilizan una combinación de rayos X y tomografía computarizada de alta precisión que podrían adecuarse para este proceso.¹¹

El diagrama siguiente muestra el proceso de lazo cerrado para el control de la convergencia y posición del punto de fusión.

¹¹ Ver como referencia el equipo de inspección por radiografía y tomografía computarizada de Nikon modelo MCT225 HA – www.nikonmetrology.com



CAPÍTULO 11. VACIADO DEL MATERIAL FUNDIDO

Hasta aquí he desarrollado el proceso de fusión del material y movimiento del punto caliente. En este capítulo propondré una alternativa para lograr la extracción del material fundido.

Obviamente el proceso deberá comenzar fundiendo material desde la superficie de la pieza hacia el interior. Si bien es posible fundir un volumen de material directamente en el corazón de la pieza, si no hay forma de extraer el material líquido, éste volverá a solidificar en el mismo volumen, aunque con una estructura diferente al del resto del material (por ejemplo, si es un acero de alto carbono y la pieza no fue precalentada, seguramente el material que solidifique presentará una estructura martensítica). Esta es la razón por la cual se precisa que la fusión de material comience desde la superficie.

La geometría de fusión tiene esta única limitación (deberá tener al menos una salida a la superficie). Puede tener curvas, estrangulaciones, cavidades, diversas terminaciones superficiales, y cualquier complejidad que requiera el producto final. La extracción del material líquido deberá ser efectiva ya que cualquier solidificación durante el vaciado provocará una geometría indeseada.

PROPUESTAS PARA EL VACIADO DEL MATERIAL LÍQUIDO

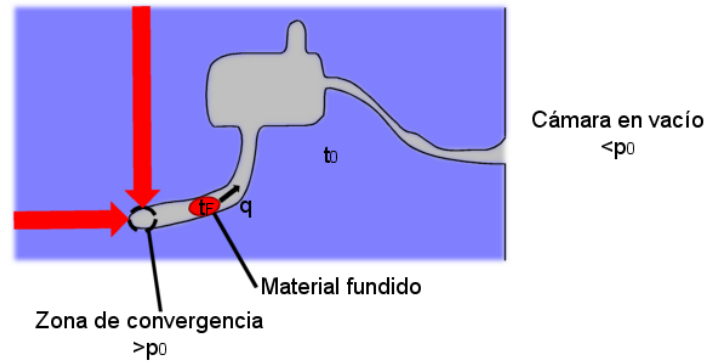
Extracción por gravedad

Girando la pieza a medida que se procesa sería posible lograr que el material líquido “caiga” hacia el exterior. Sin embargo esto sería ineficaz, pues en geometrías complejas se necesitaría tiempo y demasiados movimientos para lograr una extracción completa. Además este tiempo prolongado puede ocasionar la solidificación del material dentro de la pieza. Por lo mencionado no recomiendo este método.

Extracción por vacío

El volumen de material que se funde tendrá un estado de alta presión. Mediante la utilización de bombas de vacío en la cámara de proceso se puede provocar una diferencia de presión suficiente para que el líquido fluya hacia el exterior de la pieza. La presión de vacío dependerá de la temperatura de fusión, la temperatura del resto de la pieza y la distancia máxima que debe recorrer el líquido dentro de la pieza hasta su completa extracción.

La diferencia de presión entre el interior y el exterior de la pieza, y la viscosidad del material líquido definen la velocidad del flujo del mismo. Así mismo, el caudal necesario dependerá de la temperatura del fluido y de la pieza, ya que si ésta se encuentra demasiado fría habrá mayor probabilidad de que el material vuelva a solidificar antes de ser extraído.



Siendo la distancia máxima a recorrer d_e , el volumen de fusión a extraer v_e , la presión de la cámara de vacío p_e , el tiempo de extracción t_e , la temperatura del líquido t_F y la de la pieza t_0 .

El tiempo máximo de extracción t_e será aquel para el cual el volumen de líquido baja su temperatura hasta la de cambio de estado. Este tiempo será menor cuanto menor sea t_0 , ya que a menor temperatura de la pieza más rápido será el enfriamiento del fluido. A su vez, mientras mayor sea el sobrecalentamiento del líquido durante la fusión mayor será este tiempo t_e .

El volumen a extraer será el volumen de fusión que resulta de la convergencia de los haces ultrasónicos y la distancia de penetración de la onda portadora (visto en el capítulo 6).

Ya determinado t_e , el volumen de fusión a extraer v_e , y la distancia máxima a recorrer d_e , el caudal de extracción q será:

$$q = v_e * \frac{d_e}{t_e} \quad (10.1)$$

Este caudal es función de la diferencia de presiones entre el interior de la pieza y el entorno, de la temperatura del líquido, y de su viscosidad. A menor presión de la cámara de vacío (a mayor depresión), mayor será el caudal de extracción.

Temperatura de precalentamiento

Una temperatura inicial elevada de la pieza no solo minimiza las pérdidas en el proceso por transmisión de calor, sino también permite un mayor tiempo de extracción del sobrante, ya que este se enfriará más lentamente durante su salida hacia la cámara.

Procesamiento inverso final

Como he mencionado, es requerimiento del proceso comenzar por la fusión de la geometría desde la superficie, hacia adentro. Para un correcto vaciado del material líquido, propongo realizar al final del procesamiento de la pieza, una nueva

“pasada” pero esta vez de adentro hacia afuera. Esto eliminará cualquier porción de material que haya solidificado indeseadamente dentro de la pieza.

CONTROL DE VACIADO MEDIANTE EL SISTEMA DE CONTROL DE GEOMETRÍA

En el capítulo anterior propuse un sistema mediante rayos X para el control de la convergencia y posición de la misma. Este sistema actúa a su vez como control de la geometría dentro del material, ya que es en sí un radiografiado permanente de alta resolución de toda la pieza. Mediante este sistema, es posible controlar el correcto vaciado del material, ya que cualquier solidificación indeseada será detectada y comparada con la geometría programada. Un sistema inteligente realizaría como paso final del proceso una corrección de estos defectos, uno a uno, y desde el interior hacia el exterior de la pieza.

UTILIZACIÓN DEL MATERIAL EXTRAÍDO

Será necesario colocar en la parte inferior de la cámara de proceso un recipiente que reciba el material extraído que caerá de la pieza por peso propio. Este puede estar aún en estado líquido, o sólido si se dan las condiciones adecuadas. Sería deseable que este material conserve buenas propiedades y pueda ser reciclado, por lo que el proceso no debería contaminarlo de ninguna manera (partículas extrañas que puedan quedar en el interior al solidificar, por ejemplo).

Si el material llegara líquido al recipiente, este último deberá ser de un material de mayor temperatura de fusión que el primero y no deberá modificar las condiciones del líquido, ni viceversa. Una superficie con muy buena terminación y naturaleza del material deben brindar la posibilidad de extraer el material sobrante ya solidificado, con facilidad y sin problemas.

Una segunda opción es la de dar condiciones para que el sobrante llegue ya solidificado al fondo de la cámara. La mejor técnica para lograr esto es dar tiempo suficiente durante la caída para su solidificación. Cualquier otro método que pueda emplearse, debe considerar que la cámara debe permanecer con una presión de vacío dentro de ciertos límites. De la misma manera debe cuidarse que la temperatura de la cámara se mantenga para no cambiar las condiciones del proceso.

CAPÍTULO 12. SISTEMAS PRINCIPALES Y AUXILIARES. CÁLCULO DE ENERGÍA

Ya se ha definido en capítulos anteriores los sistemas principales y auxiliares que se requieren para el funcionamiento del proceso. En este capítulo realizaré un resumen de dichos sistemas con el cálculo de consumo de energía en función de la cantidad de material a extraer (en volumen, no en peso). El valor de referencia V_d será de 1mm^3 . Para el caso del acero al carbono:

$$m_f = 1 * 10^{-9} \text{ m}^3 * 7860 \text{ Kg/m}^3 = 7.86 * 10^{-6} \text{ Kg} \quad (12.1)$$

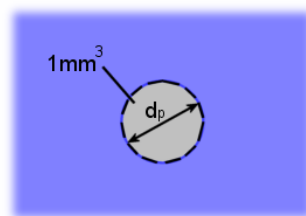
Entonces, este consumo será el correspondiente para la fusión de 7.86 miligramos de acero al carbono. Dejamos el consumo referenciado al volumen en vez de la masa, pues lo que interesa en la aplicación de este proceso es la obtención de geometrías complejas, independientemente del peso específico del material.

No obstante, cabe recordar que este proyecto se enfoca en la aplicación en aceros al carbono. Por ello el estudio del consumo se basará en este material. Dado que cualquier otro material tendrá diferentes propiedades, el consumo de energía para fundir 1mm^3 también será diferente.

Condiciones de estudio

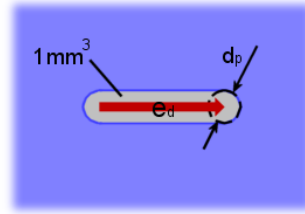
En el capítulo 7 se definió el volumen de fusión en función del valor d_p (distancia de penetración de las ondas portadoras). Este volumen es entonces variable, y depende de la frecuencia de las ondas auxiliares. Entonces existen dos formas de fundir un milímetro cúbico de material.

El primer caso sería utilizar un d_p tal que el volumen sea de 1mm^3 . Esto significa analizar un único ciclo de calentamiento para el cálculo de consumo de energía. El punto de fusión entonces no necesitará desplazamiento y no existirá consumo en el sistema de movimiento de los transductores. El estudio correspondería a la generación de una cavidad esférica de 1mm^3 .



El segundo caso sería utilizar un d_p pequeño (de algunos micrones). Para fundir se requerirán varios ciclos de calentamiento, donde los transductores se desplazarán (por lo tanto así lo hará el punto de fusión). Un ejemplo de estudio sería entonces la generación de una geometría como la figura siguiente, un conducto de sección de

diámetro d_p , con un desplazamiento en una dirección. El volumen fundido total sería 1mm^3 .



Las condiciones de estudio de consumo de energía serán las de la segunda alternativa. Este caso será el más representativo para el proceso, y además permite analizar el consumo de energía de otros sistemas como ser el de movimiento de los transductores. En este caso el valor de referencia d_p será de $100\mu\text{m}$. El desplazamiento necesario e_d para cubrir un volumen V_d de 1mm^3 será entonces:

$$V_d = \pi * d_p^3 + \pi * \frac{d_p^2}{4} * e_d \Rightarrow \quad (12.2)$$

$$\Rightarrow \pi * \left[(0.1 \text{ mm})^3 + \frac{e_d}{4} * (0.1 \text{ mm})^2 \right] = 1 \text{ mm}^3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow e_d \cong 127 \text{ mm} \quad (12.3)$$

Un último parámetro de referencia a establecer es el tiempo de fusión de V_d . Definiré este tiempo t_d con un valor de 1 ms.

1. SISTEMA DE GENERACIÓN ULTRASÓNICA

1.1. GENERACIÓN DE ONDA PORTADORA

La potencia de los transductores de onda portadora quedó definida en la fórmula (7.6):

$$P_T = \frac{d_T * T_L}{3 * k_d * d_p * t_c} * \left\{ \frac{\rho_F * \pi * d_p^3 * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f]}{6 * \Delta t} + \frac{\Delta P_a}{\Delta t} * (x + y + z) + P_P \right\} \quad (12.4)$$

Esta potencia es la correspondiente para fundir el volumen $(\pi * d_p^3)$ en un tiempo Δt (correspondiente a un ciclo de calentamiento). Multiplicando esta potencia por Δt se obtiene la energía consumida para fundir dicho volumen. Recordando que el volumen de referencia V_d fundirá en el tiempo de referencia t_d , entonces:

$$\Delta t = \frac{t_d}{V_d} * (\pi * d_p^3) \quad (12.5)$$

Un estudio de las pérdidas de potencia se dejará para investigaciones futuras. En este proyecto acotaré estas pérdidas en un 20% de la potencia total. Considerando esto y la fórmula (12.5), la potencia de los transductores de onda portadora será:

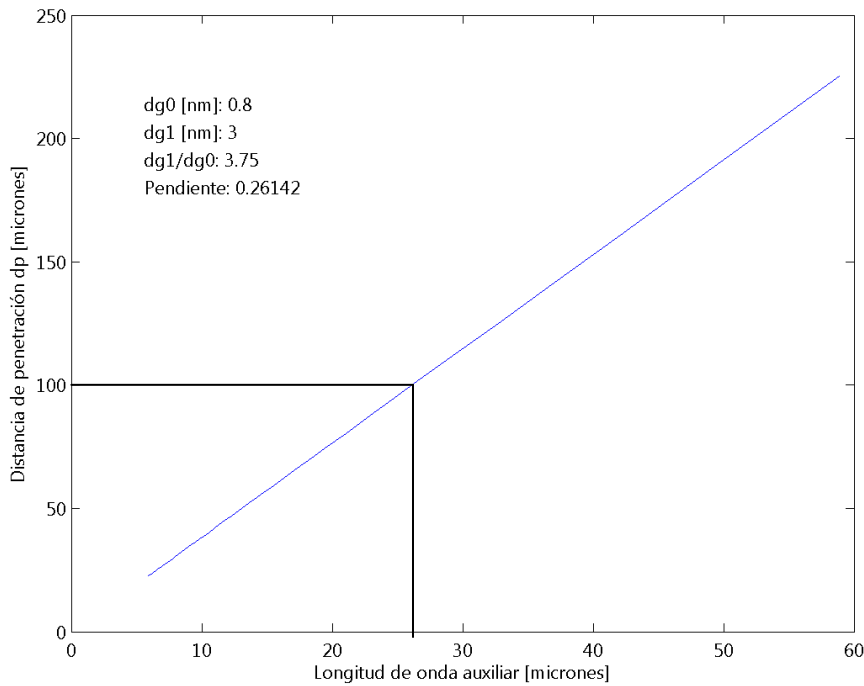
$$P_T = \frac{1.2*d_T*T_L}{3*k_d*d_p*t_c} * \left\{ \frac{\rho_F*\pi*d_p^3*[C_p*(\theta_f-\theta_0)+L_f]}{6*\frac{t_d}{V_d}*(\pi*d_p^3)} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_T = \frac{0.067*d_T*T_L}{k_d*d_p*t_c} * \left\{ \frac{\rho_F*[C_p*(\theta_f-\theta_0)+L_f]}{\frac{t_d}{V_d}} \right\} \quad (12.6)$$

La energía consumida resultará de multiplicar esta ecuación por t_d , por lo que la ecuación se simplificará:

$$E_{CT} = \frac{0.067*d_T*T_L*V_d*\rho_F*[C_p*(\theta_f-\theta_0)+L_f]}{k_d*d_p*t_c} \quad (12.7)$$

El valor de referencia d_p será quien fije la longitud de onda auxiliar, y por lo tanto el valor T_L . Para $d_p = 100\mu\text{m}$, corresponde una longitud de onda $\lambda_L = 26\mu\text{m}$



$$T_L = \frac{\lambda_L}{C_L} = \frac{26*10^{-6} \text{ m}}{5890 \text{ m/s}} = 4 * 10^{-9} \text{ s}$$

Realizando el cálculo correspondiente:

$$t_c \cong 6 * 10^{-10} \text{ s}$$

Para el valor d_T , se tomará como referencia 3mm, algo menor que las dimensiones de los transductores actuales más pequeños.

Con respecto al valor k_d , que surge del ensayo de absorción, se considerará un valor de 5% (0.05). Se recuerda que este es el factor que determina la transformación de energía ultrasónica en térmica, y más eficiente será el proceso mientras más alto sea.

El valor de temperatura inicial de referencia θ_0 será de 20°C (temperatura ambiente).

El resto de los valores corresponden a la naturaleza del material y son los siguientes:

$$\theta_f = 1350^\circ C$$

$$\rho_F = 7860 \text{ Kg}/m^3$$

$$L_f = 205 \text{ KJ}/Kg$$

$$C_p = 0.11 \text{ KJ}/Kg^\circ C$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (12.7) se obtiene la energía consumida para la fusión de 1mm³ de acero al carbono.

$$E_{CT} = \frac{0.067 * d_T * T_L * V_d * \rho_F * [C_p * (\theta_f - \theta_0) + L_f]}{k_d * d_p * t_c} =$$

$$\frac{0.067 * (0.003 \text{ m}) * (4 * 10^{-9} \text{ s}) * (1 * 10^{-9} \text{ m}^3) * (7860 \text{ Kg}/m^3) * [(0.11 \text{ KJ}/Kg^\circ C) * (1350^\circ C - 20^\circ C) + (205 \text{ KJ}/Kg)]}{0.05 * (1 * 10^{-4} \text{ m}) * (6 * 10^{-10} \text{ s})}$$

$$E_{CT} = 0.74 \text{ KJ} = 2.056 * 10^{-4} \text{ KWh} \quad (12.8)$$

Este es el consumo del sistema ultrasónico de onda transversal.

1.2. GENERACIÓN DE ONDA AUXILIAR

Para este caso en estudio, la frecuencia de la onda longitudinal (auxiliar) es de:

$$f_L = \frac{1}{T_L} = 250 \text{ MHz}$$

El proceso fija además el valor requerido del factor Ω_L , siendo en este caso:

$$\Omega_L = 0.94868 = A_{LM} * k_L = A_{LM} * \frac{2 * \pi}{\lambda_L} \Rightarrow \quad (12.9)$$

$$\Rightarrow A_{LM} = \frac{\Omega_L * \lambda_L}{2 * \pi} = 3.926 \text{ } \mu\text{m} \quad (12.10)$$

Recordando que esta onda es estacionaria, la amplitud A_{L0} de cada onda que la compone es la mitad.

$$A_{L0} = \frac{A_{LM}}{2} \approx 2 \mu m$$

La potencia de cada transductor de onda auxiliar será:

$$P_L = \frac{\frac{1}{2} * m * \omega_L^2 * A_{L0}^2}{t} = \frac{\frac{1}{2} * m * (2 * \pi * f_L)^2 * A_{L0}^2}{t} \quad (12.11)$$

La masa bajo la acción del haz ultrasónico dependerá del volumen de material que atraviesa el mismo. Siendo d_c la distancia entre caras de la pieza:

$$m = \frac{\rho_{acero} * d_c * \left(\pi * \frac{d_T^2}{4} \right)}{t} \quad (12.12)$$

Ahora,

$$\frac{d_c}{t} = C_L = 5890 \text{ m/s}$$

Reemplazando estas ecuaciones en (12.11):

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{1}{2} * \rho_{acero} * C_L * \left(\pi * \frac{d_T^2}{4} \right) * (2 * \pi * f_L)^2 * A_{L0}^2 = \\ &= \frac{\pi^3}{2} * \rho_{acero} * C_L * d_T^2 * f_L^2 * A_{L0}^2 \\ &= \frac{\pi^3}{2} * 7860 \frac{Kg}{m^3} * 5890 \frac{m}{s} * 9 * 10^{-6} m^2 * 6.25 * 10^{16} \frac{1}{s} * 4 * 10^{-12} m^2 = \\ P_L &\cong 514.03 MW \end{aligned} \quad (12.13)$$

Durante el tiempo de referencia t_d de 1ms, la energía consumida será de:

$$E_{CL0} = P_L * t_d = 514.03 KJ = 142.79 KWh \quad (12.14)$$

Multiplicando por la cantidad de transductores y estableciendo un factor de 1.2 por pérdidas:

$$E_{CL} = 1028.09 KWh \quad (12.15)$$

Esta gran diferencia de consumo con respecto a los transductores de ondas transversales se debe a que las ondas portadoras sólo cumplen la función de ceder energía al material para su fusión. Para un volumen de material de $1mm^3$, esta energía no es excesivamente grande. Sin embargo las ondas longitudinales (auxiliares) cumplen una función que requiere mucho más trabajo: la de comprimir las partículas del medio en gran medida para que esta transferencia de

energía sea posible. En cierto modo, el sistema de generación ultrasónico auxiliar realiza el “trabajo pesado” del proceso.

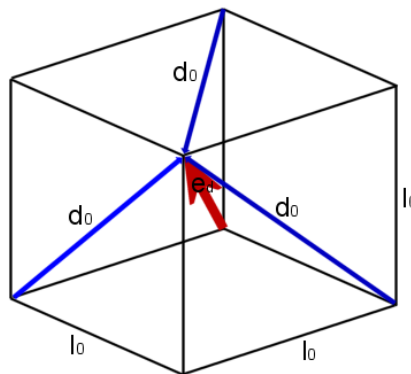
El consumo total de energía del sistema de generación ultrasónica será entonces:

$$E_{CU} \approx 1028 \text{ KWh} \quad (12.16)$$

2. SISTEMA DE MOVIMIENTO DE LOS TRANSDUCTORES

En lo que se refiere al desplazamiento del punto de fusión dentro del volumen de la pieza, se requieren movimientos precisos y suaves, que no necesitan de grandes esfuerzos, ya que la manipulación de los transductores debe ser muy delicada. Si se utilizan transductores de contacto no se debe perder la calidad de acoplamiento con la superficie de la pieza. Para el buen funcionamiento del sistema, esta superficie debe ser de gran terminación superficial.

Para el caso en estudio se considerará que el movimiento del punto de fusión se realiza en dirección de la diagonal espacial de la pieza, de modo que todos los transductores se encuentran en movimiento (máximo consumo).



Con ello, el desplazamiento combinado de cada transductor será:

$$d_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} * e_d \cong 104 \text{ mm}$$

Con un desplazamiento en cada dirección de:

$$l_0 \cong 73 \text{ mm}$$

La fórmula de potencia necesaria de cada motor paso a paso es la dada en (9.1):

$$P_m = \frac{g * m_d * \mu_d * v_d}{\eta_m} \quad (12.17)$$

Ahora,

$$v_d = l_0 / t_d \quad (12.18)$$

Estimando una masa a desplazar (transductor, soporte y otros elementos) máxima de 10Kg, un rendimiento de 95% (alto rendimiento por ser actuadores eléctricos), y un coeficiente de rozamiento de las guías de 0.001 (por ejemplo de bolas recirculantes)¹²:

$$P_m = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * 10 Kg * 0.001 * 0.073 m}{0.95 * 0.001 s} = 7.538 W$$

La energía consumida para fundir el volumen de referencia (de los 6 motores) es:

$$E_{CM} = N_m * P_m * t_d = 6 * 7.538 W * 2.77 * 10^{-7} h \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{CM} = 1.256 * 10^{-8} kWh \quad (12.19)$$

Es claro que el consumo total de todos los motores es despreciable comparado al del sistema de generación ultrasónica.

3. SISTEMA DE VACIADO DEL MATERIAL

Este sistema involucra la bomba de alto vacío principalmente. La potencia de esta bomba es función de la presión de vacío y el caudal de aire desplazado. Las bombas de vacío comerciales actuales generan una presión de vacío de alrededor de 1×10^{-3} torr, con una potencia del motor de 550 W. Considerando para esto un rendimiento global del sistema del 80%, estimo un consumo energético E_{CV} :

$$E_{CV} = \frac{P_{motor} * t_d}{\eta_v} = \frac{550 W * 0.001 s}{0.8} = 0.688 Ws \approx 2 * 10^{-7} kWh \quad (12.20)$$

CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA

Considerando los valores estimados el consumo total energético será:

$$E_c = 1028 kWh \quad \text{por } mm^3 \text{ de material fundido} \quad (12.21)$$

Esta fórmula se aplica para una velocidad de fusión de $1 mm^3/ms$.

Aclaraciones

Esta estimación de consumo energético tiene como único objetivo dar una idea del orden de los valores, ya que el proceso permite distintas velocidades de fusión. Además el cálculo aproximado fue realizado con datos de equipos comerciales actuales.

¹² Ver a modo de referencia: Catálogo de guías lineales de recirculación de bolas. SAIN. www.sainsl.com

CAPÍTULO 13. APLICABILIDAD

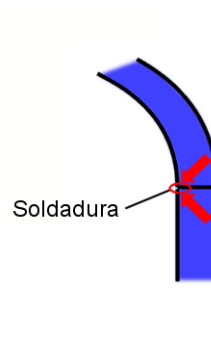
En este capítulo se mencionan otras aplicaciones potenciales para la tecnología que se presenta en este proyecto final.

TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO

Se basa en provocar un cambio estructural de forma localizada en el material, dependiendo de los requerimientos de la pieza, sin limitaciones en la ubicación de la zona que se desea tratar.

SOLDADURA

Con este método sería posible soldar componentes en lugares inaccesibles. Una aplicación práctica y muy interesante sería la soldadura de recipientes a presión, en su parte interna.



CAPÍTULO 14. ESTUDIO DE COSTOS Y RENTABILIDAD

ESTIMACIÓN DE COSTOS

Los costos son estimados en base a productos comerciales actuales.¹³ Debe recordarse que se trata de una tecnología inexistente y con posibilidades de desarrollo. Por lo tanto sería imposible definir específicamente los componentes que conformarían el sistema.

COSTO ESTIMADO DEL EQUIPO					
ITEM N°	ITEM	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO [US\$]	PRECIO TOTAL [US\$]	TOTAL ACUMULADO [US\$]
1	EQUIPO DE RAYOS X - TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA	1	250000	250000	250000
1.1	MÓDULO DE ENLACE	1	30000	30000	280000
2	SISTEMA DE GENERACIÓN ULTRASÓNICA				
2.1	MÓDULO DE CONTROL	1	60000	60000	340000
2.2	TRANSDUCTOR TRANSVERSAL	3	150	450	340450
2.3	TRANSDUCTOR LONGITUDINAL	6	150	900	341350
3	SISTEMA DE MOVIMIENTO				
3.1	MÓDULO DE CONTROL	1	30000	30000	371350
3.2	CONJUNTO DE GUÍA LINEAL	18	300	5400	376750
3.3	MOTOR PASO A PASO	18	250	4500	381250
4	SISTEMA DE VACIADO				
4.1	MÓDULO DE CONTROL	1	10000	10000	391250
4.2	BOMBA DE ALTO VACÍO	1	2500	2500	393750
4.3	CUBA DE DESCARGA	1	30	30	393780
5	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS				
5.1	MÓDULO DE CONTROL	1	15000	15000	408780
5.2	EQUIPO DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA	2	1500	3000	411780
5.3	EQUIPO DE MEDICIÓN DE PRESIÓN	1	1000	1000	412780
6	SISTEMA PRINCIPAL DE CONTROL GLOBAL	1	100000	100000	512780
7	SISTEMA DE ACOUPLE*				
7.1	MÓDULO DE CONTROL	1	15000	15000	527780
7.2	COMPRESOR	1	1000	1000	528780
7.3	CILINDRO NEUMÁTICO	6	150	900	529680
7.4	MÓDULO FRL	1	100	100	529780
7.5	VÁLVULA DIRECCIONAL	2	100	200	529980
8	SISTEMA DE INYECCIÓN DE GEL DE ACOUPLE*				
8.1	MÓDULO DE CONTROL	1	5000	5000	534980
8.2	BOMBA INYECTORA	1	500	500	535480
8.3	BOQUILLA DE INYECCIÓN	6	30	180	535660
9	EQUIPOS Y COMPONENTES NO CONSIDERADOS			100000	635660

*ESTOS ITEMS SON NECESARIOS EN CASO DE UTILIZAR TRANSDUCTORES DE CONTACTO

CON TRANSDUCTORES S/CONTACTO	COSTO TOTAL [US\$]:	612780
CON TRANSDUCTORES C/CONTACTO	COSTO TOTAL [US\$]:	635660

Este estimado no tiene en cuenta los costos operativos. Estos últimos dependen de la cantidad de material a extraer, del costo de la energía eléctrica y del

¹³ Los precios de equipos se han estimado en base a valores de referencia, extraídos de sitios web de comercialización de equipos industriales (ver bibliografía).

combustible, entre muchos otros. Es importante aclarar, que este costo operativo será muy alto, debido al gran consumo energético que tiene la generación de las ondas ultrasónicas, como ya se puso en manifiesto en el capítulo 12.

RENTABILIDAD DEL PROYECTO

Aquí se hará una breve reseña de cómo debería analizarse la rentabilidad de este proyecto. Omitiré utilizar números y cálculos concretos, ya que aquí se presenta la idea del proceso y no un proyecto ejecutable en sí, pero conceptualmente es posible indicar un procedimiento básico (general) para el análisis posterior.

Como todo proyecto de inversión, para conocer su viabilidad de manera anticipada se deben analizar ciertos indicadores financieros. Estos son el VAN (Valor Actual Neto) y la TIR (Tasa Interna de Retorno). Si bien no puedo prever valores como flujo de caja, puedo anticipar algunos factores positivos y negativos:

Factores negativos:

- Se deberá considerar para el análisis la inversión y tiempo durante las investigaciones previas para el desarrollo de la tecnología. Además se requieren desarrollos tecnológicos paralelos, como ser el de transductores de alta frecuencia. Un estimado de este período de tiempo podría ser de 5 a 10 años.
- Se debe considerar la inversión en la obtención de la patente (inicial y pago de tasas anuales).
- Las unidades vendidas serán muy pocas en los primeros 5 años.

Factores positivos:

- Positivamente, al ser una nueva tecnología con patente propia, se tendrá exclusividad en el mercado. Este período podría ser de unos 10 años, dada la complejidad del proceso¹⁴. Adicionalmente, si no se desarrollan alternativas apreciablemente diferentes, este período puede extenderse a 20 años (este es generalmente el tiempo que brinda la exclusividad de explotación por posesión de una patente).
- Puede considerarse el costo de la unidad como el estimado anteriormente, con una disminución progresiva en los años subsiguientes si es que se prevé un aumento de las ventas, y con la estandarización de los componentes que constituyen el equipo (por ejemplo, los transductores de alta frecuencia).
- Habrá ingresos por asistencia técnica y capacitación a compradores.

¹⁴Según el artículo técnico "Formas de apropiación de las ganancias de una innovación", de Esteban F. Sánchez, Universidad de Oviedo [UNIVERSIA BUSINESS REVIEW], el período de tiempo para la imitación de una innovación se encuentra entre los 0.9 y 15 años, con un promedio de 7 u 8.

Es claro que serán necesarios varios años de inversión (flujo de caja negativo) antes de obtener ganancias, por lo que este es un proyecto a largo plazo. Esquemáticamente, y sin especificar valores, se podría considerar un flujo de caja como el siguiente:

AÑO	ETAPA	FLUJO DE CAJA PARCIAL	FLUJO DE CAJA ANUAL PREVISTO
1 a 5	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO	NEGATIVO	MUY NEGATIVO
6	OBTENCIÓN DE PATENTE	NEGATIVO	NEGATIVO
	LANZAMIENTO AL MERCADO	NEGATIVO	
7 a 10	PAGO TASA ANUAL DE PATENTE	NEGATIVO	POSITIVO
	VENTA DE PRIMERAS UNIDADES	POSITIVO	
	EXCLUSIVIDAD DE EXPLOTACIÓN DEL MERCADO	POSITIVO	
11 a 26	PAGO TASA ANUAL DE PATENTE	NEGATIVO	MUY POSITIVO
	VENTA DE UNIDADES	POSITIVO	
	EXCLUSIVIDAD DE EXPLOTACIÓN DEL MERCADO	POSITIVO	
26 en adelante	VENTA DE UNIDADES	POSITIVO	POSITIVO
	INGRESO DE LA COMPETENCIA	NEGATIVO	

Consideraciones para financiar el proyecto

Como factor negativo se mencionó la necesidad de inversión en investigación, con el desarrollo paralelo de equipos que actualmente no existen en el mercado (este desarrollo no forma parte del proyecto, sino que sería independiente al mismo). Si es posible esperar un tiempo prudencial antes del inicio del proyecto, habrá posibilidad de contar con la tecnología necesaria al momento de la investigación previa. Esto acortará considerablemente este tiempo (en años). Esto significará un gran impacto positivo en la posibilidad de financiar el proyecto. Además para entonces ya se sabría que tecnología está disponible en el mercado y podría cuantificarse esta estimación de flujo de caja, y realizar un análisis de rentabilidad concreto.

Otro aspecto que puede mejorar la viabilidad de la inversión es la de patentar la invención después de la etapa de investigación y antes lanzar el producto al mercado. Esto asegura dos cosas: la primera disminuir el flujo de caja negativo los primeros años. La segunda es que la exclusividad de explotación de la invención durará más tiempo desde que el producto es comercializado, ya que este período no incluye la etapa de investigación.

Analizando el cuadro anterior, considero que el proyecto sería viable si fuera posible amortizar la inversión aproximadamente en el 20° año desde que se pide el crédito. Esta sería la etapa de mayores ingresos. Aprovechando la exclusividad en el mercado y siendo que este proceso ofrece una solución a un problema que actualmente no la tiene, el precio de comercialización puede ser tal que deje amplias ganancias. Sería una vez que la patente deje de dar sus beneficios, que el mercado se normalizará, aparecerá la competencia, y las ganancias serán menores, pero ya con amplio mercado a favor y experiencia.

Procedimiento de análisis de inversión

Una vez que se han estimado los flujos de caja (por el momento y para la presente tesis, sólo me es posible realizar una previsión como la del cuadro anterior), se debe calcular el VAN de la inversión. Esto es, el valor de los flujos de caja (negativo o positivo) combinados y traídos al valor del tiempo presente. Para ello se deben conocer o estimar los índices de inflación y tasas de interés, pues son los que modifican el valor del dinero a través del tiempo, y el tiempo en que son realizadas las inversiones y de los ingresos. El VAN viene dado por la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum \frac{\text{Flujo de caja del período } n}{(1+i)^n} - \text{inversión inicial} \quad (14.1)$$

Si el VAN es positivo significa que el proyecto es rentable. Si es negativo significa que el proyecto dará pérdidas. Si el VAN es cero, financieramente no habrá diferencia si se realiza el proyecto o no. Por ejemplo si se desea amortizar la inversión en 20 años, el cálculo del VAN estimando hasta el año 20 debería ser positivo o mínimamente cero.

Otro indicador de la rentabilidad del proyecto es la Tasa Interna de Retorno (TIR). Este indicador es la máxima tasa de interés a la que es posible endeudarse para financiar el proyecto sin que ésta genere pérdidas. En otras palabras, la TIR es la tasa para la cual el VAN es igual a cero.

CONCLUSIONES

CONCLUSIÓN TÉCNICA

Sin duda el carácter innovador de este proceso le otorga un potencial considerable para futuras investigaciones. A partir de lo que he desarrollado he podido concluir que se requerirá un enorme consumo de energía para su operación, pero que quizás sea compensado en gran medida por las ventajas que no otorgan otros métodos de proceso de materiales, como ser colado, sinterizado o soldado. Además los avances tecnológicos pueden acompañar este desarrollo para hacerlo cada vez más viable.

CONCLUSIÓN ACADÉMICA

El desarrollo de este proyecto ha involucrado muchísimas horas de investigación. Si bien la extensión del mismo no supera las cien páginas, existe una gran cantidad de información que tuve que investigar para luego desechar con criterio, así como desarrollos teóricos, físicos y matemáticos. En búsqueda de las alternativas para lograr el objetivo impuesto, tuve que tomar conocimientos teóricos y prácticos sobre Electromagnetismo, Ultrasonido, Física cuántica, etc, que en algunos casos finalmente no apliqué (pero entonces ya con cierto criterio). Por mencionar algunas asignaturas que he aplicado, destacaré Ensayos Especiales, Análisis Matemático, Física, Informática Aplicada, Termodinámica, Máquinas Herramientas y Tecnología de Fabricación entre otras. Para el estudio de costos y rentabilidad del proyecto he aplicado conocimientos de la cátedra de Economía y Legislación. He intentado utilizar todo mi criterio para concentrar los desarrollos más exhaustivos en los puntos importantes de la tecnología que aquí he presentado.

CONCLUSIÓN GENERAL

Ha sido para mí un gran desafío el desarrollar la presente tesis. Lamentablemente me encontré con muchas limitaciones a la hora de investigar posibles alternativas para los diferentes problemas por resolver. Los recursos disponibles a la hora de recabar información fueron un claro ejemplo, incluso ciertos datos requerían ensayos que me eran imposibles de realizar. Además, fue necesario autolimitarme y establecer una extensión a mi investigación y desarrollo, sin que esto afectara los objetivos propuestos.

Más allá de estos obstáculos, aclaro, el objetivo de este proyecto final fue el de presentar, desarrollar y definir una idea innovadora, una tecnología que rompa con las restricciones actuales presentes en la generación de geometrías internas. Como tal, se requerirían años de estudio e investigaciones para alcanzar el desarrollo de un equipo que posibilite la aplicación de esta tecnología. Aquí he tratado de definir los sistemas más importantes que caracterizarán el proceso, con su principio de funcionamiento, variables y parámetros. La base del mismo, es el sistema de

generación de las ondas ultrasónicas, que se fundamenta en el capítulo 12. Los capítulos posteriores, que se han desarrollado aunque no con tanta profundidad, pretenden dar un aspecto conceptual pero a la vez global para definir alternativas concretas al desarrollo de un futuro equipo de procesamiento. Estos últimos capítulos no serían indispensables para el funcionamiento del mismo, pero considero que eran necesarios.

Por último, mencionaré que he intentado no quitar el carácter conceptual y teórico de esta presentación, pero no omitir el desarrollo teórico que define el proceso. Ser demasiado específico en los demás aspectos habría sido contraproducente, pues los avances tecnológicos futuros podrían ofrecer mejores alternativas que las aquí sugeridas. Sí es claro, que la idea que aquí se presenta, soluciona problemas que son patentes en los procesos actuales. Considero que la limitación a la hora de realizar geometrías internas complejas en un material no debería existir hoy en día, y espero que esta idea sirva de punto de partida para un avance tecnológico, que en la actualidad se hace necesaria.

ANEXOS

ANEXO A

ALGORITMO DE MATLAB: Simulación del avance del frente de onda portadora en la zona de convergencia (caso $dg1/dg0 \leq 2.6935$)

```

clear
clc
format short g

disp('CÁLCULO DE LA DISTANCIA DE PENETRACIÓN dp DE LA ONDA PORTADORA');
disp('-----');
disp(' ');

%INGRESO DE DATOS-----
dens0=7860; %densidad normal acero [Kg/m3]
E=210000000000; %módulo de Young [N/m2]
mu=0.27; %coeficiente de Poisson
dg0=0.000000008; %menor espesor de borde de grano [m]
dg1=0.000000003; %mayor espesor de borde de grano [m]
cl=5890; %velocidad propagacion onda L [m/s]
ft0=0.1551*sqrt(E*dg0/((1+mu)*dens0*dg1^3)); %frecuencia de onda transversal óptima [Hz]
omegaL=1-(8*(1+mu)*dens0*(dg1*ft0)^2)/E; %factor (Amplitud onda L * k) máximo permitido
omegaF=1-((8*(1+mu)*dens0*(dg0*ft0)^2)/E)^(1/3); %factor (Amplitud onda L * k) mínimo
necesario para confinamiento
rel_dg1_dg0=0.385*(dg1/dg0)-0.037; %relación entre espesores de borde de grano
OK=0;

disp('MATERIAL: ACERO SAE 1010');
disp('-----');
disp('Densidad normal [Kg/m3]');
disp(dens0);
disp('Módulo de Young [N/m2]');
disp(E);
disp('Coeficiente de Poisson');
disp(mu);
disp('Espesor mínimo de borde de grano [nm]');
disp(1000000000*dg0);
disp('Espesor máximo de borde de grano [nm]');
disp(1000000000*dg1);

if rel_dg1_dg0 <= 1
    disp('Se cumple la relación (6.67)');
    disp(' ');
end
if rel_dg1_dg0 > 1
    disp('Se cumple la relación (6.68)');
    disp(' ');
end
end

```

```

disp('Frecuencia de la onda transversal (óptima) [MHz]');
disp(0.000001*ft0);
disp('Factor (Ak) utilizado (óptimo)');
disp(omegaL);

while OK==0
    fl=1000000*input('Ingrese la frecuencia de la onda longitudinal [MHz]: '); %frecuencia de onda
longitudinal [Hz]
    TL=1/fl; %período onda L [s]
    lambdaL=cl/fl; %longitud de onda L [m]
    disp(' ');
    disp('Período de la onda auxiliar [ns]');
    disp(1000000000*TL);
    disp('Longitud de onda auxiliar [micrones]');
    disp(1000000*lambdaL);
    conf=input('Confirmar frecuencia de la onda auxiliar (s/n): ','s');
    disp(' ');
    while strcmp(conf,'s')==0 && strcmp(conf,'S')==0 && strcmp(conf,'n')==0 &&
strcmp(conf,'N')==0
        conf=input('Confirmar frecuencia de la onda auxiliar (s/n): ','s');
        disp(' ');
    end
    if strcmp(conf,'s')==1 || strcmp(conf,'S')==1
        OK=1;
    end
end
kl=2*pi/lambdaL; %k de onda L [1/m]
wl=2*pi*fl;

%INICIALIZACIÓN DE LOS VECTORES Y MATRICES-----
divT=input('Ingrese cantidad de divisiones de TL para cálculo (aumentar para mayor precisión): ');
%cantidad de particiones de tiempo en cada período a simular (aumentar para mayor precisión)
dt=TL/divT; %variación de tiempo por iteración [s]
x=0;
t=0;

%ITERACION Y CÁLCULO DE dp-----
while t<TL
    coswt=cos(wl*t);
    coskx=cos(kl*x);
    dens=dens0/((1+omegaL*coswt*coskx)*(1-omegaL*coswt)^2); %densidad en x en el instante t
[Kg/m3]
    Ct=sqrt(E/(2*dens*(1+mu))); %velocidad del frente de onda portadora en ese instante [m/s]
    dx=Ct*dt; %avance en dt
    t=t+dt; %siguiente instante
    x=x+dx; %posicion actualizada
end
dp=x; %Distancia de penetración [m]
disp(' ');
disp('DISTANCIA DE PENETRACIÓN [MICRONES]');
disp(1000000*dp);

```

ANEXO B

ALGORITMO DE MATLAB: Simulación del avance del frente de onda portadora en la zona de convergencia (caso $dg_1/dg_0 > 2.6935$)

```

clear
clc
format short g

disp('CÁLCULO DE LA DISTANCIA DE PENETRACIÓN dp DE LA ONDA PORTADORA');
disp('-----');
disp(' ');

%INGRESO DE DATOS-----

dens0=7860; %densidad normal acero [Kg/m3]
E=210000000000; %módulo de Young [N/m2]
mu=0.27; %coeficiente de Poisson
dg0=0.0000000008; %menor espesor de borde de grano [m]
dg1=0.000000003; %mayor espesor de borde de grano [m]
cl=5890; %velocidad propagacion onda L [m/s]

ftMAX=sqrt(E*dg0/(8*(1+mu)*dens0*dg1^3)); %frecuencia de la onda transversal máxima
                                         permitida por el proceso [Hz]
ft0=0.1551*sqrt(E*dg0/((1+mu)*dens0*dg1^3)); %frecuencia de onda transversal óptima [Hz]
omegaL=1-(8*(1+mu)*dens0*(dg1*ft0)^2)/E; %factor (Amplitud onda L * k) máximo permitido
omegaF=1-((8*(1+mu)*dens0*(dg0*ft0)^2)/E)^(1/3); %factor (Amplitud onda L * k) mínimo
                                         necesario para confinamiento
tcTL=acos(omegaF/omegaL)/pi; %relación tc/TL máxima
densLimProp=E/(8*(1+mu)*(dg1*ft0)^2); %densidad máxima para propagación total [Kg/m3]
densMaxProp=dens0/(1-omegaL); %densidad máxima en zona de propagación [Kg/m3]
densLimConf=E/(8*(1+mu)*(dg0*ft0)^2); %densidad mínima para confinamiento total [Kg/m3]
densMaxConf=dens0/(1-omegaL)^3; %densidad máxima en zona de confinamiento [Kg/m3]

disp('MATERIAL: ACERO SAE 1010');
disp('-----');
disp('Densidad normal [Kg/m3]');
disp(dens0);
disp('Módulo de Young [N/m2]');
disp(E);
disp('Coeficiente de Poisson');
disp(mu);
disp('Espesor mínimo de borde de grano [nm]');
disp(1000000000*dg0);
disp('Espesor máximo de borde de grano [nm]');
disp(1000000000*dg1);

disp('Frecuencia operativa máxima de la onda transversal [MHz]');
disp(0.000001*ftMAX);
disp('Frecuencia de la onda transversal (óptima) [MHz]');
disp(0.000001*ft0);
    
```

```

disp('Factor (Ak) mínimo para confinamiento');
disp(omegaF);
disp('Factor (Ak) utilizado (óptimo)');
disp(omegaL);
disp('Relación tc/TL (óptima)');
disp(tcTL);
disp('Frecuencia de la onda longitudinal recomendada [MHz]');
disp(0.000000005*ft0);
fl=1000000*input('Ingrese la frecuencia de la onda longitudinal [MHz]: '); %frecuencia de onda
longitudinal [Hz]

```

```

TL=1/fl; %período de onda L [s]
lambdal=cl/fl; %longitud de onda L [m]
tc=tcTL*TL; %tiempo de confinamiento por período en cada pico de densidad [s]
kl=2*pi/lambdal; %k de onda L [1/m]
wl=2*pi*fl;
ALM=omegaL/kl; %amplitud máxima de onda L [m];

```

```

disp(' ');
disp('Período de la onda L [ns]');
disp(100000000*TL);
disp('Longitud de onda L [micrones]');
disp(1000000*lambdal);
disp('Tiempo de confinamiento por período TL en cada pico de densidad [ns]');
disp(100000000*tc);
disp('Amplitud de la onda longitudinal [micrones]');
disp(1000000*ALM);

```

%INICIALIZACIÓN DE LOS VECTORES Y MATRICES-----

```

divX=50; %cantidad de particiones en X por período (aumentar para mayor precisión)
divT=100; %cantidad de particiones de tiempo en cada período a simular (aumentar para mayor
precisión)
nTL=7; %cantidad de períodos a simular
nlambdal=4; %cantidad de longitudes de onda L a visualizar

```

```

T=0:TL/divT:nTL*TL; %vector de tiempo T [s]
ptosT=length(T); %cantidad de puntos de T
X=0:lambdal/divX:nlambdal*lambdal; %vector de coordenadas X [m]
ptosX=length(X); %cantidad de puntos de X
XMAX=max(X); %valor máximo de X [m]
DENS=zeros(ptosX,ptosT); %matriz inicial de densidad en cada X en cada T
DENSPROP=zeros(ptosX,ptosT); %matriz inicial de densidad en zona de propagación en cada X en
cada T

```

%CALCULO DE DENSIDAD EN CADA x EN CADA t-----

```

for i=1:ptosT
    t=T(i);
    coswt=cos(wl*t);

```

```

for p=1:ptosX
    x=X(p);
    coskx=cos(kl*x);
    cosky=-1;
    coskz=-1;
    C1=coswt^3*coskx*cosky*coskz;
    C2=coswt^2*(coskx*cosky+coskx*coskz+cosky*coskz);
    C3=coswt*(coskx+cosky+coskz);
    DENS(p,i)=dens0/(C1*omegaL^3+C2*omegaL^2+C3*omegaL+1); %densidad en cada x en cada
                                                    instante t [Kg/m3]
    DENSPROP(p,i)=dens0/(1+omegaL*coswt*coskx); %densidad en cada x en cada instante t en la
                                                    zona de propagación [Kg/m3]
end
end

densMAX=max(max(DENS)); %máxima densidad [Kg/m3]
densMIN=min(min(DENS)); %mínima densidad [Kg/m3]

%CALCULO DE LA POSICION DEL FRENTE DE ONDA PORTADORA EN CADA t-----

%Creación de variables y vectores
xpf=0; %posición instantánea del frente de onda
xpc=0; %posición instantánea de fin de tren de onda portadora
dt=TL/divT; %division menor de tiempo
CTF=zeros(ptosT,1); %Vector Velocidad de propagación frente de onda T
CTC=zeros(ptosT,1); %Vector Velocidad de propagación fin de la onda T
XPF=zeros(ptosT,1); %Vector de posición del frente de onda portadora en cada instante
XPC=zeros(ptosT,1); %Vector de posición de fin del tren de onda portadora en cada instante

%Inicio del cálculo
for j=ptosX:-1:1 %ubicación del frente de onda
    if DENS(j,1) >= densLimConf
        xpf=X(j);
    end
end
XPF(1)=xpf; %el frente de onda comienza en la primer coordenada de confinamiento
XPC(1)=xpc; %el fin de tren de onda comienza en la coordenada cero
tren=0; %no existe ningún tren de onda al inicio

for i=2:ptosT
    t=T(i);
    %Redondea xpf al valor del vector X mas cercano
    id_xf=round(xpf*divX/lambdal)+1;
    id_xc=round(xpc*divX/lambdal)+1;
    if id_xf>ptosX
        id_xf=ptosX;
    end
    if id_xc>ptosX
        id_xc=ptosX;
    end
end

```

```

dens_pf=DENS(id_xf,i); %densidad en la ubicación del frente de onda
XPC(i)=X(id_xc);

if dens_pf < densLimConf %Si la onda puede propagarse
    XPF(i)=xpf; %guardo la ubicación del frente de onda en el instante t
    Ctf=sqrt(E/(2*dens_pf*(1+mu))); %velocidad de propagación del frente de onda
    CTF(i)=Ctf;
    dx=Ctf*dt; %Distancia de avance
    xpf=xpf+dx; %posición actualizada para el siguiente instante
end
if dens_pf >= densLimConf %Si la onda NO puede propagarse
    %En este caso el frente de onda quedará por detrás de xpf actual
    %Buscamos la nueva posición del frente de onda y actualizamos para este instante t

    xpf=0; %condición de haber encontrado el primer punto de propagación
    for j=1:id_xf %buscamos hacia atrás en las coordenadas X
        dens_pf=DENS(j,i); %actualiza la densidad en el punto analizado
        if (dens_pf < densLimConf) %si encuentra un punto apto para propagación y es el primero
            que se encuentra
            xpf=X(j); %actualiza la ubicación del frente para este instante
        end
    end
    XPF(i)=xpf; %Guarda la posición del frente en este instante t
end
id_xf=round(xpf*divX/lambdal)+1; %reactualizo el índice de posición del frente de onda
if id_xf>ptosX
    id_xf=ptosX;
end

if XPF(i) > xpc
    for j=id_xc:1:id_xf %Busca si se corta el fin de onda en algún punto donde se supere la densidad
        de confinamiento
        dens_pc=DENS(j,i);
        if dens_pc >= densLimConf
            xpc=X(j);
            tren=1; %condición de existencia de un tren de onda
        end
    end
    dens_pc=DENS(id_xc,i); %Densidad en el punto actual del fin de onda
    Ctc=sqrt(E/(2*dens_pc*(1+mu))); %velocidad en el punto actual de fin de onda
    if XPC(i-1)+Ctc*dt <= xpc && tren==1 %si el punto actual con su avance es menor que el punto
        donde se cortaría
        XPC(i)=xpc; %la nueva posición será donde se corta la onda
    end
    if xpc~=0 && XPC(i-1)+Ctc*dt > xpc && tren==1 %si el fin de la onda ya supera al punto de
        corte
        xpc=XPC(i-1)+Ctc*dt; %la nueva posición será la calculada por propagación
        XPC(i)=xpc;
    end
end
if XPF(i) <= xpc %si el fin de tren de onda alcanza o supera al frente de onda

```

```
xpc=0;
XPC(i)=xpc;
tren=0;
xpf=0;
end
end
```

```
dp=max(XPF);
disp('Distancia de penetración [micrones]');
disp(1000000*dp);
```

%PLOTEO DE LA DENSIDAD Y TREN DE ONDA PORTADORA EN EL TIEMPO Y ESPACIO-----

```
dY=0.025*(densMAX-densMIN); %división en Y del gráfico
dX=0.025*(XMAX); %división en X del gráfico
for j=1:ptosT
    t=T(j);
    plot(X,DENS(:,j),'r');
    axis([0 X(ptosX) densMIN densMAX])
    xlabel('Coordenada X [m]')
    ylabel('Densidad [Kg/m3]')
    hold on
    plot(XPF(j),0.5*densMAX,'or');
    plot(XPC(j),0.5*densMAX,'ob');
    text(8*dX,densMAX-2*dY,'Tiempo [ns]: ', 'HorizontalAlignment','right');
    text(8*dX,densMAX-2*dY,num2str(1000000000*t), 'HorizontalAlignment','left');
    plot(X,dens0);
    plot(X,densLimConf);
    text(17*dX,densLimConf+dY,'Densidad de confinamiento', 'HorizontalAlignment','right');
    if round(j/7)==j/7
        print('-dpng',num2str(j));
    end
    anim(j)=getframe;
    hold off
end
```


BIBLIOGRAFÍA

LIBROS, MANUALES

- Benson Carlin
“ULTRASONICS”
Ed. McGraw-Hill - 1949
- Peter B. Nagy
“INTRODUCTION TO ULTRASONICS”
Año 2001
- Roald K. Wangsness
“CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS”
Ed. Limusa - 2001
- Juan C. Fernández
“ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS”
Departamento de Física, Facultad de Ingeniería de la UBA - Año 2004
- William C. Elmore - Mark A. Heald
“PHYSICS OF WAVES”
Dover Publications - 1969
- Robert Resnick
“FÍSICA VOLUMEN 2 - VERSIÓN AMPLIADA” - 4ta Ed.
Compañía Editorial Continental - Año 1992
- Tipler - Mosca
“FÍSICA PARA CIENCIA Y TECNOLOGÍA” - 3ra Ed.
Ed. Reverté - Año 1993
- Michael J. Moran - Howard N. Shapiro
“FUNDAMENTOS DE TERMODINÁMICA TÉCNICA” - 2da Ed.
Ed. Reverté - 2004
- Robert H. Perry
“MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO, TOMO I” - 6ra Ed.
McGraw-Hill - Año 1994
- James Stewart
“CÁLCULO, TRASCENDENTES TEMPRANAS” - 3ra Ed.
International Thomson Editores - Año 1999
- R. Bruzual - M. Domínguez
“SERIES DE FOURIER”
Universidad Central de Venezuela - Año 2003
- Emilio M. Sastre
“SERIES REALES DE FOURIER”
Departamento de Matemática, UNR - Año 1992
- Kurt Gieck
“MANUAL DE FÓRMULAS TÉCNICAS”
Ed. Hemus - Año 1975

ARTÍCULOS TÉCNICOS

- “MODERN ULTRASONIC TRANSDUCERS” – ULTRAN
<http://www.ultrangroup.com/index.php/products/transducers/#standard>
<http://www.ultrangroup.com/index.php/products/transducers/#non-contact>
- “ULTRASONIC TRANSDUCERS – TECHNICAL NOTES” – OLYMPUS
<http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/UT-technotes.en.pdf>
<http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/panametrics-UT.en.pdf>
- “MCT225 HA – HIGH ACCURACY METROLOGY CT” – NIKON
<http://www.nikonmetrology.com>
- “ONDAS ESTACIONARIAS” - Anónimo
- “PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES” – Anónimo
- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MOTORES PASO A PASO – Varios
- “FORMAS DE APROPIACIÓN DE LAS GANANCIAS DE UNA INNOVACIÓN” – Esteban F. Sánchez - UNIVERSIA BUSINESS REVIEW
<http://ubr.universia.net/pdfs/UBR0012004070.pdf>

APUNTES DE ASIGNATURA

- ENSAYOS ESPECIALES: Inspección por ultrasonido
- FÍSICA 3: Ondas electromagnéticas
- MÁQUINAS TÉRMICAS 2: Bombas de vacío
- INFORMÁTICA E INFORMÁTICA APLICADA: Programación en MATLAB
- ECONOMÍA Y LEGISLACIÓN: Análisis de proyectos de inversión, TIR, VAN

SITIOS WEB

- www.wikipedia.org – Búsqueda de información sobre: electromagnetismo, radiación electromagnética, ecuaciones de teoría de ondas, series de Fourier, propiedades varias de materiales, ultrasonido, transductores.
- Búsqueda de precios y características de referencia en sitios de comercialización de equipos industriales.
www.alibaba.com
www.machinio.com
www.directindustry.com
- www.tecnar.com/index.php/products/laser-ut - Tecnología Ultrasonido-Láser.