



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Medición del grado de humedad en agregados de concreto
por medio de frecuencias de microondas**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico Eléctrico

Luis Antonio La Madrid Shimokawa

Asesor(es): Dr. William Ipanaqué Alama

Piura, febrero 2020

Dedicatoria

A mi familia, por ser soporte de mi crecimiento personal y profesional.



Prólogo

La importancia del contenido de humedad en la materia es un factor que muchos sectores industriales buscan controlar, su determinación se puede llevar a cabo por procesos básicos como la diferencia de pesos luego de someterse a la evaporación del agua en horno, hasta métodos más tecnológicos relacionando su imagen hiperespectral con propiedades propias de la materia a estudiar o con su coeficiente dieléctrico.

El porcentaje de humedad en la materia prima de las empresas del rubro de la construcción es requerido al ser el hormigón un compuesto empleado, el cual se caracteriza por su bajo costo y presentar características similares al ladrillo. Por lo tanto, existe una variabilidad en su composición para obtener una mezcla que otorgue la mejor calidad, siendo el agua un componente de alto impacto en las propiedades requeridas.

Resumen Analítico-Informativo

Medición del grado de humedad en agregados de concreto por medio de frecuencias de microondas

Luis Antonio La Madrid Shimokawa

Asesor(es): Dr. William Ipanaqué Alama

Tesis.

Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura,

Palabras claves: agregados/ humedad/ frecuencias/ microondas/ concreto.

Introducción: Estudio y análisis del comportamiento y relación entre el coeficiente dieléctrico de los agregados de concreto conforme varía su contenido de humedad, su importancia radica en el bajo costo del hormigón y resistencia similar o mayor que el ladrillo. La variabilidad en sus propiedades y calidad se debe al desconocimiento del contenido de humedad en los agregados, afectando la relación de producción en agua/cemento del material.

Metodología: El estudio es parte del proyecto titulado “Tecnologías facilitadoras basadas en técnicas de microondas para la medición en tiempo real del contenido de humedad en materiales de la construcción”, convenio de subvención N°108-2017-FONDECYT, el cual brindó el apoyo económico para realizar las visitas técnicas y ensayos en laboratorio. Se constata de la medición de la señal entre un transmisor y receptor de frecuencias microondas, luego de atravesar el material analiza su variabilidad y relación con su contenido de humedad.

Resultados: Se logra predecir mediante el análisis estadístico el contenido de agua según su coeficiente dieléctrico, esto gracias al modelo matemático elaborado, además se mostró cierta proximidad en los valores de relación entre las canteras de Cajamarca y Santa Cruz. En cuanto a la cantera Pariñas, se encontraron valores diferentes entre sí, lo que correspondería a una granulometría muy variada, composición química o factores adversos no controlables.

Conclusiones: La medición en vacío es un paso previo obligatorio para calibrar el sistema, esto debido a que las reflexiones generan datos erróneos en el valor del coeficiente dieléctrico que deben ser almacenados en el sistema para considerarlos en el análisis de variables vectoriales, de esta forma se logra una curva de calibración con menos puntos errados y por ende un valor de constante dieléctrica más exacto.

Fecha de elaboración del resumen: 03 de setiembre de 2019

Analytical-Informative Summary

Medición del grado de humedad en agregados de concreto por medio de frecuencias de microondas

Luis Antonio La Madrid Shimokawa

Asesor(es): Dr. William Ipanaqué Alama

Tesis.

Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura,

Keywords: aggregates / humidity / frequencies / microwave / concrete.

Introduction: Study and analysis of the behavior and relationship between the dielectric coefficient of concrete aggregates as their moisture content varies, their importance lies in the low cost of concrete and resistance similar or greater than brick. The variability in its properties and quality is due to the lack of moisture content in the aggregates, affecting the ratio of water / cement production of the material.

Methodology: The study is part of the project entitled “Facilitating technologies based on microwave techniques for real-time measurement of moisture content in construction materials”, grant agreement No. 108-2017-FONDECYT, which provided financial support for Perform technical visits and laboratory tests. The measurement of the signal between a transmitter and receiver of microwave frequencies is verified, after crossing the material it analyzes its variability and relation with its moisture content.

Results: It is possible to predict by means of the statistical analysis the water content according to its dielectric coefficient, this thanks to the mathematical model developed, also showed some proximity in the relationship values between the quarries of Cajamarca and Santa Cruz. Regarding the Pariñas quarry, different values were found among each other, which would correspond to a very varied grain size, chemical composition or uncontrollable adverse factors.

Conclusions: Vacuum measurement is a mandatory preliminary step to calibrate the system, this because the reflections generate erroneous data in the value of the dielectric coefficient that must be stored in the system to be considered in the analysis of vector variables, in this way it is achieved a calibration curve with fewer wrong points and therefore a more accurate dielectric constant value.

Summary date: September 3, 2019

Tabla de contenido

Introducción.....	1
 Capítulo 1 Precedentes matemáticos de los principios electromagnéticos	5
1.1. Definición: Ondas electromagnéticas y su modelo	5
1.2. Características de las ondas electromagnéticas.....	6
1.3. Espectro electromagnético	8
1.4. Parámetros dieléctricos de los materiales	9
1.5. Ecuaciones de Maxwell.....	12
1.6. Propagación de las ondas electromagnéticas y medios de propagación	13
1.6.1. Medio de propagación sin pérdidas.....	14
1.6.2. Medio de propagación con pérdidas.....	16
1.6.3. Expresiones de la constante de propagación para diferentes tipos de medio.....	18
1.6.4. Propagación de ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos con pérdidas pequeñas	21
1.6.5. Medio de propagación con un buen conductor.	22
1.7. Reflexión y refracción de las ondas electromagnéticas	24
1.8. Impacto de la molécula del agua en las ondas electromagnéticas	26
1.9. Mezcla dieléctrica	28
 Capítulo 2 Tecnologías implementadas en la medición de parámetros dieléctricos	31
2.1. Beneficios del empleo de señales microondas para la medición de la constante dieléctrica	31
2.2. Técnica de resonancia	31

2.3. Procedimientos de medición mediante sonda coaxial abierta por un extremo	33
2.4. Procedimiento de línea de transmisión/reflexión.....	34
2.5. Procedimiento empleando placas paralelas	35
2.6. Técnica de espacio libre.....	37
2.6.1. Sistema Wavetester	38

Capítulo 3 Sistemas empleados para la elaboración de hormigón en concreteiras

y medición del porcentaje de humedad en agregados de concreto.....	43
3.1. Importancia e influencia de los componentes en la fabricación del hormigón	43
3.2. Clase de hormigón empleado en el sector de la construcción	45
3.3. Influencia del porcentaje de humedad en los agregados de concreto	47
3.4. Propiedades requeridas para el diseño de mezclas	47

Capítulo 4 Caracterización de arena y piedra de humedad y parámetros físicos

determinantes por métodos tradicionales.....	53
4.1. Metodología empleada.....	53
4.2. Análisis de regresión lineal en Statgraphics	54
4.3. Evaluación de la data	58
4.4. Evaluación de la normalidad de los residuos	68
4.5. Evaluación de la heterocedasticidad - variables como dependientes.	69
4.6. Evaluación de la heterocedasticidad – variables como independientes.....	70

Conclusiones	75
---------------------------	-----------

Referencias bibliográficas.....	79
--	-----------

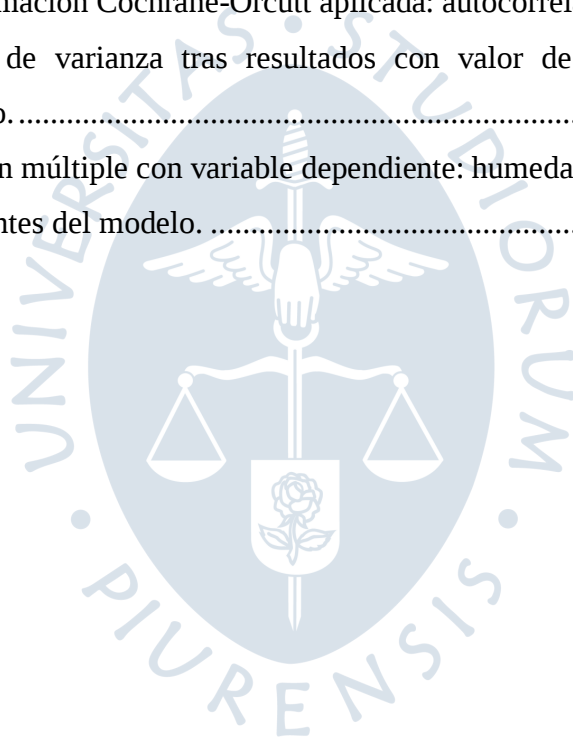
Anexos	81
---------------------	-----------

Anexo A. Data recolectada proveniente de la cantera Pariñas, Santa Cruz, Trujillo y Cajamarca.....	83
Anexo B. Granulometría obtenida de las canteras: Pariñas, Santa Cruz, Trujillo y Cajamarca.....	87
Anexo C. Curva granulométrica de Pariñas, Santa Cruz, Trujillo y Cajamarca.....	91

Lista de tablas

Tabla 1.	Valores de las constantes universales.	12
Tabla 2.	Ecuaciones de Maxwell en sus formas diferencial, integral y fasores	13
Tabla 3.	Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial para medios sin pérdidas no conductores libres de fuentes	15
Tabla 4.	Resumen de la velocidad y la constante de propagación para diferentes casos.	19
Tabla 5.	Ecuaciones para determinar las constantes de atenuación y de fase en un material dieléctrico con pérdidas.	20
Tabla 6.	Resumen de ecuaciones	23
Tabla 7.	Constantes dieléctricas para diferentes materiales.....	28
Tabla 8.	Sustancias nocivas en el agua.	44
Tabla 9.	Tamaño de tamices ASTM comúnmente utilizados para análisis de agregados.	49
Tabla 10.	Resultados de Statgraph – Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.	59
Tabla 11.	Resultados de Statgraph – Análisis de varianza Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.	59
Tabla 12.	Resultados de Statgraph R-cuadrada Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.	60
Tabla 13.	Residuos atípicos - Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.	61
Tabla 14.	Puntos influyentes. Influencia media de un solo punto 0.07.	61
Tabla 15.	Resultados de Statgraph - Canteras Pariñas y Trujillo.....	63
Tabla 16.	Resultados de Statgraph – Análisis de varianza - - Canteras Pariñas y Trujillo.	63
Tabla 17.	Resultados obtenidos de Statgraph – - Canteras Pariñas y Trujillo.	64
Tabla 18.	Residuos atípicos - - Canteras Pariñas y Trujillo.....	66

Tabla 19.	Resultados de puntos atípicos - - Canteras Pariñas y Trujillo.	67
Tabla 20.	Puntos influyentes - - Canteras Pariñas y Trujillo	67
Tabla 21.	Data de análisis en Statgraphs - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.	68
Tabla 22.	Regresión múltiple – Residuos C^2 - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.	69
Tabla 23.	Resultados de Statgraph - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.	70
Tabla 24.	Análisis de varianza - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.....	70
Tabla 25.	Resultados de Statgraph - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.	70
Tabla 26.	Resultados con valor de Durbin-Watson corregido - Humedad.....	71
Tabla 27.	Transformación Cochrane-Orcutt aplicada: autocorrelación=0.646848	72
Tabla 28.	Análisis de varianza tras resultados con valor de Durbin-Watson corregido.....	72
Tabla 29.	Regresión múltiple con variable dependiente: humedad.	72
Tabla 30.	Coeficientes del modelo.	73



Lista de figuras

Figura 1.	Representación gráfica del campo eléctrico y magnético.	6
Figura 2.	Gráfica referencial del espectro electromagnético.	8
Figura 3.	Circuito equivalente de un medio de propagación sin pérdidas.	14
Figura 4.	Representación de una onda electromagnética viajando en un medio sin pérdidas.	14
Figura 5.	Circuito equivalente de un medio de propagación con pérdidas.	17
Figura 6.	Representación de una onda electromagnética viajando en un medio con pérdidas.	17
Figura 7.	Comportamiento de la propagación de una onda electromagnética frente a un cambio de medio.	24
Figura 8.	Esquema de la estructura molecular del agua.	26
Figura 9.	Comportamiento de la permitividad compleja del agua frente a diferentes frecuencias.	27
Figura 10.	Resonador de guía de onda.	32
Figura 11.	Resonador de cavidad cilíndrica con dieléctrico.	32
Figura 12.	Técnica de sonda coaxial abierta en un extremo en contacto con la muestra.	34
Figura 13.	Método de línea de transmisión usando guía de onda y cable coaxial.	35
Figura 14.	Ubicación de la muestra.	35
Figura 15.	Circuitos equivalentes en serie y paralelo.	36
Figura 16.	Técnica de espacio libre.	37
Figura 17.	Módulo Wavetester.	38
Figura 18.	Interpretación gráfica del funcionamiento del Wavetester.	38
Figura 19.	Ejemplo de cómo se muestran los resultados de medición.	40

Figura 20.	Rango de proporciones de componentes para la fabricación del hormigón.....	43
Figura 21.	Clasificación de las formas de los agregados.	48
Figura 22.	Estados de humedad de los agregados.....	50
Figura 23.	Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Pariñas.	56
Figura 24.	Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Santa Cruz.....	57
Figura 25.	Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Trujillo.....	57
Figura 26.	Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Cajamarca.	57
Figura 27.	Humedad.....	62
Figura 28.	Residuos.....	62
Figura 29.	Humedad – Canteras Cajamarca y Santa Cruz.....	65
Figura 30.	Residuos – Canteras Cajamarca y Santa Cruz.....	65
Figura 31.	Probabilidad Normal con 95% límites.....	69
Figura 32.	Autocorrelaciones parciales estimadas para residuos.....	71

Introducción

Las empresas del rubro de la construcción demandan mucho tiempo en la medición del contenido de humedad de los agregados, se busca optimizar el tiempo de proceso durante la producción de moldes de concreto, llegando a reducir el tiempo de medición a tan solo 1 segundo y realizarlo de forma continua.

El objetivo del presente trabajo de tesis es el estudio y análisis del comportamiento y relación entre el coeficiente dieléctrico de los agregados de concreto conforme varía su contenido de humedad.

La importancia de conocer el porcentaje de humedad en el hormigón es debido a que, al ser un compuesto empleado en la construcción, se caracteriza por su bajo costo y por poseer una resistencia similar o mayor que el ladrillo. Además, posee propiedades que lo convierten en un excelente aislante acústico y resistente al fuego. Para su fabricación se requiere de agregados finos o arena (35%), agregado grueso o grava (44%), cemento (15%) y agua (6%). Sin embargo, existe una variabilidad en la calidad de los lotes de hormigón, que suele ocasionar una reducción significativa en el producto final. Esto se debe a un desconocimiento del contenido de humedad en la arena y los agregados, que afecta la relación agua/cemento del material.

Actualmente es requerido disminuir los tiempos muertos en los procesos en línea de suministro de agregados de concreto, los cuales son aproximadamente de 1 hora para la toma de medición de grado de humedad. Es posible determinar el grado de humedad de los agregados de concreto relacionándolos con su constante dieléctrica mediante sistemas que emplean radiofrecuencias debido a que el contenido de humedad de un material es proporcional a la constante dieléctrica. Las características físicas de los materiales de agregados de concreto (densidad, humedad, temperatura, etc.) están directamente relacionadas con sus propiedades dieléctricas, específicamente su permitividad y

permeabilidad. De esta forma, el tiempo de medición de humedad de un sólido puede reducirse a segundos y de forma continua.

Esta tesis se estructura de la siguiente forma:

En el primer capítulo se estudia el análisis de coeficientes dieléctricos a través de microondas para determinar diferentes propiedades en materiales y sustancias está en un rápido crecimiento dentro de la ciencia moderna e ingeniería sostenible al no ser un ensayo destructivo o que demande excesivos tiempos. La optimización y el éxito de los diferentes diseños que se tienen en la actualidad es imposible sin los estudios teóricos de los procesos físicos de las ondas electromagnéticas con la pérdida de valor en el coeficiente dieléctrico (Komarov, 2012). Complementariamente, se estudia el comportamiento de la molécula del agua frente a la presencia de un campo electromagnético.

En el segundo capítulo se desarrollan las diferentes técnicas de medición para determinar el valor de la constante dieléctrica, siendo la medición de permitividad con dispositivos que emplean microondas más beneficiosas con respecto a aquellos que necesariamente deben interactuar con el material, ya que los ensayos empleando microondas no son destructivos ni dañinos para el material, además, el tiempo que requiere es menor que en métodos tradicionales como en el método de determinar humedad por medio de secar la muestra en un horno.

En el tercer capítulo se trata sobre los sistemas empleados para la elaboración de hormigón en concretas, y las principales técnicas actuales de medición de parámetros referidos a los agregados de concreto que influyen en la medición del coeficiente dieléctrico. Siendo la forma tradicional para determinar la humedad en los agregados mediante un ensayo, que debe realizarse en los laboratorios y tiene una duración aproximada de 24 horas. El tiempo que tarda el ensayo ocasiona que los resultados de la medición de humedad no sean precisos, ya que se determina la humedad del agregado tomada del día anterior, es decir, no se puede medir la humedad on-line en el proceso.

En el cuarto capítulo se detalla la metodología empleada y los resultados de la data recolectada en las canteras seleccionadas para la evaluación del porcentaje de humedad relacionándola con su coeficiente dieléctrico. Se encuentran diferentes tipos de hormigón según la planta que las produzca o esté dedicada, estos pueden tener mayor o menor efecto en la cantidad de energía consumida, materias primas utilizadas, emisiones líquidas y gaseosas producidas, además de los residuos generados.

Por último, se dan las conclusiones obtenidas a partir de las pruebas realizadas. Además, se presenta una lista de recomendaciones para futuras investigaciones o proyectos de tesis los cuales otorgarían una mayor información e influencia en la determinación precisa del porcentaje de humedad relacionándolo al coeficiente dieléctrico.

La presente tesis se concluye que es factible la aplicación del sistema de medición mediante frecuencias de microondas en las empresas para la determinación del contenido de humedad en tiempo real. Este informe es basado en anteriores proyectos que relacionan la humedad de la harina de pescado con su coeficiente dieléctrico.



Capítulo 1

Precedentes matemáticos de los principios electromagnéticos

1.1. Definición: Ondas electromagnéticas y su modelo

Son caracterizadas porque están conformadas por el conjunto entre campo eléctrico y el campo magnético, estos permiten que las ondas puedan transmitirse por el espacio independientemente de cuál sea su frecuencia a la velocidad de la luz, esta particularidad para desplazarse por el espacio se le denomina técnicamente como propagación de las ondas electromagnéticas. (Herrzeich, 2009)

Desde principios del siglo XIX se conocía por parte de los físicos que la luz se propaga como una onda transversal, por lo tanto, estas requerían un medio para desplazarse a lo que le llamaban la existencia del éter. Poco tiempo después, Maxwell validó como innecesaria esa suposición con su expresión matemática a los descubrimientos sobre la relación entre campos eléctricos y magnéticos realizados por Michael Faraday (quien propuso en 1847 que la luz era una vibración electromagnética de alta frecuencia). Con esto, James Maxwell planteó que cada cambio del campo eléctrico engendra en su proximidad un campo magnético, y recíprocamente cada variación del campo magnético originaría uno eléctrico. Ambos campos, periódicamente variables están constantemente perpendiculares entre sí y a la dirección común de su propagación. Estas ondas transversales son semejantes a las de la luz, mientras que las ondas electromagnéticas se transmiten con la misma velocidad de la luz. De esta forma, Maxwell concluyó que la luz era una perturbación electromagnética. Fue Heinrich Hertz quien 20 años después comprobó experimentalmente que las propiedades de las ondas luminosas eran las mismas que las ondas de origen electromagnético, con esto se estableció la identidad de ambos fenómenos. (Silva Belletti, 2016) (Figura 1)

1.2. Características de las ondas electromagnéticas

Basándose en la teoría una onda puede ser expresada por una función seno o coseno en cualquier instante del tiempo y espacio o mediante un fasor. Cumpliéndose la siguiente ecuación al desplazarse por el eje Z:

$$E(t, z) = A \sin(\omega t - \beta z) \quad (1.1)$$

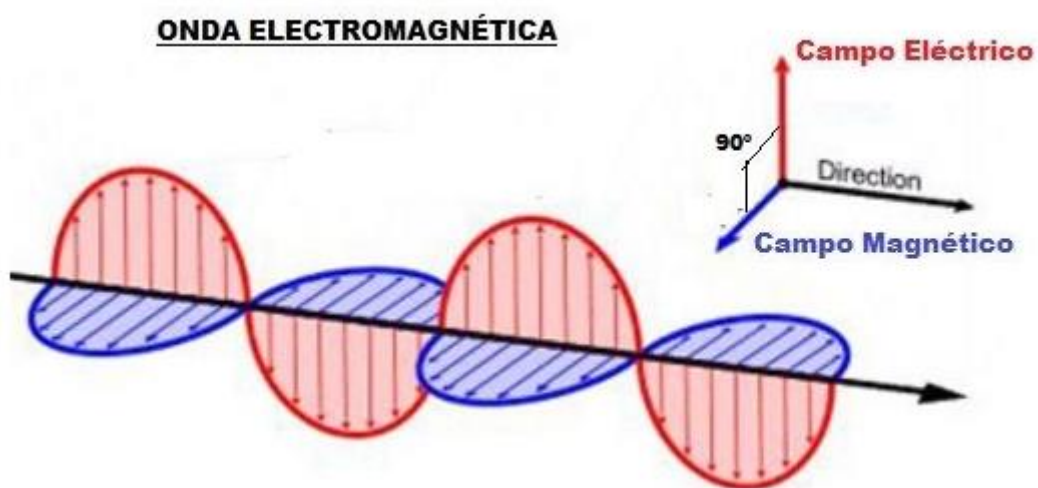


Figura 1. Representación gráfica del campo eléctrico y magnético.
Fuente: Área tecnología. <https://www.areatecnologia.com/>

Donde A es la amplitud o intensidad de campo eléctrico y la parte $(\omega t - \beta z)$ es la fase de la onda expresada en radianes, siendo t el tiempo y z el espacio. Así, ω expresa la frecuencia angular y β es la constante de fase.

La definición para los parámetros que definen a las ondas son:

- Amplitud (A): Máximo valor de la perturbación generada por la onda.
- Frecuencia (f): Número de ciclos sinusoidales por unidad de tiempo, depende de la velocidad de fase (c) de la onda sobre el medio por donde se propaga.

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ [Hz]} \quad (1.2)$$

De acuerdo a la ecuación, la frecuencia es la inversa de longitud de onda (λ), así cuando hay una mayor longitud de onda le corresponde una frecuencia más baja y viceversa.

- Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos crestas o picos consecutivos en una función.
- Periodo (T): Es la inversa de la frecuencia y es el tiempo que le toma en recorrer una longitud de onda.

$$T = \frac{1}{f} [s] \quad (1.3)$$

- Velocidad de fase (c): Es la velocidad de la longitud de onda entre el tiempo que le toma recorrerla en un medio determinado. No depende de la frecuencia, pero se ve influenciada con el medio por el cual se propaga. Sí la onda se propaga por el vacío su velocidad será igual a la velocidad de la luz.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.4)$$

- Frecuencia angular (ω):

$$\omega = 2\pi f \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (1.5)$$

- Impedancia intrínseca de la onda (η): Característica dependiente del medio sobre el cual las ondas se propagan:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} [\Omega] \quad (1.6)$$

Donde μ es la permeabilidad, ϵ es la permitividad y σ es la conductividad.

- Número de onda: Es el número de ondas que se generan en un periodo 2π .

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{rad}{min} \right] \quad (1.7)$$

1.3. Espectro electromagnético

Se trata de la distribución energética de ondas electromagnéticas a las cuales corresponden según su frecuencia o longitud de onda. Se les encuentran desde frecuencias muy bajas, como aquellas generados por aparatos de comunicación, hasta frecuencias superiores a los 1024 (Hz). (Figura 2)

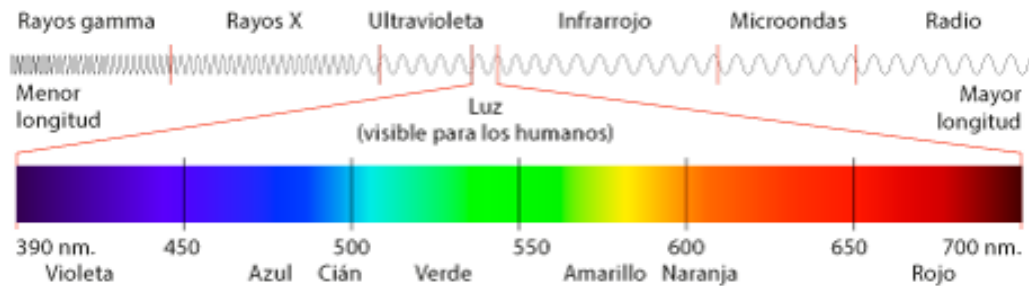


Figura 2. Gráfica referencial del espectro electromagnético.

Fuente: Glosario gráfico. <http://www.glosariografico.com/>

A continuación, se presentan definiciones y características de los tipos de ondas.

- Ondas de radio: Son aquellas que viajan a la velocidad de la luz y tienen como medio de propagación al aire. Son generadas por medio de circuitos oscilantes. Se emplea en radiodifusiones y telecomunicaciones.

Rango: Desde 30 KHz hasta 3 GHz.

- Microondas: Generadas debido a la vibración molecular del cuerpo. Clasificadas en bandas L, S, C, X y Ku. Las ondas correspondientes a la banda C, son capaces de penetrar las nubes, nieve, polvo o lluvia para mostrar la superficie de la tierra. Para los sistemas de posicionamiento es utilizada las ondas de banda L. Para la comunicación de satélites se utilizan el resto de las bandas.

Rango: Abarca frecuencias superiores a 1 GHz hasta 3 THz.

- Rayos infrarrojos: Generados cuando un cuerpo sufre una modificación en su movimiento rotacional o vibratorio molecular o atómicos. Están relacionadas con la transferencia de calor.

Rango: Abarcan desde 0.3 THz hasta 400 THz.

NIR: desde 120 hasta 400 THz.

MWIR: desde 30 THz hasta 120 THz.

LWIR: 300 GHz hasta 30 THz.

- Luz invisible: Aquellas que pueden percibirse por el sentido de la vista. Son provocadas por las oscilaciones más externas de los átomos.

Rango: Varían entre 400nm (violeta) y 700 nm (rojo).

- Rayos ultravioletas: No son visibles para el ojo humano, sin embargo, algunos animales son capaces de detectarlas. El sol es la principal fuente de generación de este tipo de rayos, el cual se subdivide en: UVA, UVB y UVC.

Rango: Los rayos UV-C abarcan longitudes de onda de 200nm-280nm. Son absorbidos por la atmósfera.

Los rayos UV-B abarcan las longitudes de onda de 280nm – 320 nm. Son aquellos que dañan la piel por sobreexposición.

Los rayos UV-A abarcan las longitudes de onda de 320 nm – 400 nm. Son menos nocivos que los UV-B.

- Rayos X: Producidos cuando ocurre la desaceleración de un haz de electrones y estas colisionan con una placa metálica.

Rango: Desde 3×10^{16} Hz a 3×10^{22} Hz.

- Rayos Gamma: A pesar de tener la longitud de onda más pequeña, son los que tienen mayor cantidad de energía. Generadas por objetos muy calientes, como el sol, y también por grandes descargas de energía.

Rango: Desde 3×10^{19} Hz hasta 3×10^{22} Hz.

1.4. Parámetros dieléctricos de los materiales

Los parámetros dieléctricos del medio son los encargados de determinar la propagación de una onda electromagnética, además de su atenuación, desfase, reflexión y absorción, características propias de las ondas electromagnéticas cuando traspasan un medio o hay una variación de este. Los parámetros dieléctricos son: conductividad (σ), permitividad eléctrica (ϵ) y permeabilidad magnética (μ).

- Conductividad (σ): Este parámetro depende de la concentración y movilidad de los electrones y huecos en el medio de propagación. Se define como la capacidad que posee el medio para conducir corriente eléctrica debido a la interacción de las cargas libres ante la presencia de un campo eléctrico externo (E) (Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, 1998). Este es el valor proporcional que

multiplicar por el campo eléctrico dando como resultado la densidad de volumen de corriente eléctrica. Usando el principio de la ley de Ohm:

$$J = \sigma E \quad (1.8)$$

Donde,

$$J = [A/m^2]$$

$$\sigma = [S/m]$$

$$E = [V/m]$$

La conductividad puede ser relacionada con la parte imaginaria de la permitividad, de forma que a mayor conductividad la parte imaginaria incrementará.

$$\sigma = \varepsilon'' \omega \quad (1.9)$$

ω : es la frecuencia angular expresada en rad/seg.

- Permitividad eléctrica (ε): Es polarización dada por el medio cuando se está en presencia de un campo eléctrico. Expresada como la densidad de flujo eléctrico (D) y el campo eléctrico externo (E).

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (1.10)$$

A su vez, este se expresa generalmente con relación a la del vacío, donde la permitividad relativa está definida como:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1.11)$$

La permitividad eléctrica puede ser expresada como una magnitud compleja:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.12)$$

Así, según el factor de Clasiuss – Mossotti, la permitividad eléctrica y la conductividad estarán relacionados por:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.13)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (1.14)$$

De esta forma, la constante dieléctrica (ϵ') cuantifica la intensidad de energía que se encuentra en un material luego de su interacción frente a un campo eléctrico externo. También se le conoce como un factor de pérdidas y es la intensidad de energía total perdida por el medio de propagación o por el material (Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, 1998).

El valor de la constante de permitividad en el vacío será:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} = 8.854 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \quad (1.15)$$

La permitividad relativa con respecto a la permitividad en el vacío está representada según:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1.16)$$

- Permeabilidad magnética (μ): Es la capacidad que posee el medio para dejar pasar un campo magnético. Se relaciona la inducción magnética (B) con la intensidad de campo magnético (H) (Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, 1998).

$$B = \mu H \quad (1.17)$$

De esta forma, la permeabilidad magnética de un medio se expresa también en relación a la permeabilidad magnética del vacío. Hallándose la permeabilidad relativa (μ_r) como el factor de proporcionalidad según:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \rightarrow \mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.18)$$

También se puede expresar la permeabilidad magnética como una magnitud compleja:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (1.19)$$

Así, la parte real se trata de permeabilidad magnética elástica indicando la energía magnética almacenada en el material, mientras que la parte imaginaria determina las pérdidas magnéticas.

Cabe mencionar que se cumple casi siempre $\mu \approx \mu_0$ y $\mu_r \approx 1$ excepto en algunos materiales como los ferromagnéticos. (Agilent Technologies, 2006)

Para el espacio vacío la permeabilidad es:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.26 \times 10^{-6} \frac{H}{m}$$

La Tabla 1 muestra el valor de las constantes anteriormente dichas:

Tabla 1. Valores de las constantes universales.

Constante universal	Símbolo	Valor	Unidad
Permitividad del espacio libre	ϵ_0	$\left(\frac{1}{36\pi}\right) \times 10^{-9}$	F/m
Permeabilidad del espacio libre	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
Velocidad de la luz en el vacío	c_0	3×10^8	m/s

Fuente: Cheng, D. 1998.

1.5. Ecuaciones de Maxwell

Fue James Maxwell (1831 – 1879) y otros científicos anteriores a él, quienes por sus investigaciones permitieron predecir la existencia de la energía electromagnética. Maxwell investigó y trabajó en base a estudios realizados por científicos como Ampere (1775 – 1836), Faraday (1791 – 1867) y Gauss (1777 – 1855), relacionó los aportes de cada uno agrupándolos en lo que hoy conocemos como las ecuaciones de Maxwell (Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, 1998).

Estas ecuaciones relacionan los campos eléctricos y magnéticos proporcionando una base teórica en cuanto a la explicación sobre los fenómenos de conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética. Estas se expresan en la Tabla 2:

Tabla 2. Ecuaciones de Maxwell en sus formas diferencial, integral y fasores

Leyes de Maxwell	Forma diferencial	Forma integral	Forma fasores
Ley de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt}$	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$
Ley de Ampere	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E}$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{D} = p_v$	$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q$	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{p_v}{\epsilon}$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	$\nabla \cdot \vec{H} = 0$

Fuente: Cheng, D. 1998.

Siendo los parámetros descritos en la Tabla 2 expresados en sus unidades en el sistema internacional de unidades (SI):

- $\vec{E}$: Intensidad de campo eléctrico (V/m).
 $\vec{H}$: Intensidad de campo magnético (A/m).
 $\vec{B}$: Densidad de flujo magnético (T).
 $\vec{D}$: Densidad de flujo eléctrico o desplazamiento eléctrico (C/m²).
 $\vec{J}$: Densidad de corriente eléctrica (A/m²).
 p_v : Densidad volumétrica de carga eléctrica (C/m³).

Un campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico, y este a su vez se produce a partir de la variación de un campo eléctrico en el tiempo o por medio de corrientes eléctricas. (Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, 1998)

1.6. Propagación de las ondas electromagnéticas y medios de propagación

La propagación de las ondas electromagnéticas puede realizarse en cualquier medio ya sea en el vacío o una materia. Es la estructura molecular del medio la que determina la interacción de las ondas electromagnéticas. Para el estudio en esta tesis, se considerará primero un medio de propagación sin pérdidas y luego se considerará un medio con pérdidas el cual sería el más acercado a una sustancia húmeda. (Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, 1998)

1.6.1. Medio de propagación sin pérdidas

Un medio sin pérdidas es caracterizado por no tener conductividad, es decir, $\sigma = 0$ por lo tanto el paso de corriente es $J=0$. Además, se considera como un material no magnético, por lo que la permitividad relativa será igual a 1 y la permitividad depende del material. Como se observa en las Figura 3 y Figura 4.



Figura 3. Circuito equivalente de un medio de propagación sin pérdidas.
Fuente: Rodríguez-Ariesméndiz Rodolfo, Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios, 2017, p. 30.

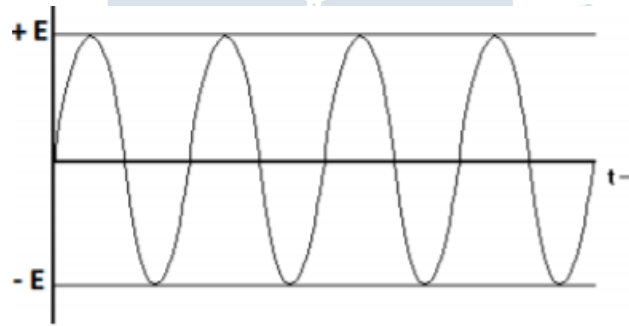


Figura 4. Representación de una onda electromagnética viajando en un medio sin pérdidas.
Fuente: Rodríguez-Ariesméndiz Rodolfo, Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios, 2017, p. 30.

En un medio isotrópico como el vacío la relación entre la intensidad de campo eléctrico (E) y su densidad de flujo (D_0) es:

$$D_0 = \epsilon_0 E \quad (1.20)$$

De la misma forma, corresponde para el campo magnético en el espacio libre:

$$B_0 = \mu_0 H \quad (1.21)$$

Las ecuaciones de Maxwell se cumplen para medio no conductores y libres de fuentes, caracterizados por ε y μ .

Las ecuaciones de la Tabla 3, son ecuaciones diferenciales de primer grado las cuales combinadas generan una ecuación de segundo grado usando solo los términos E o H.

Tabla 3. Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial para medios sin pérdidas no conductores libres de fuentes

Ley de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$
Ley de Ampere	$\nabla \times \vec{H} = -\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{E} = 0$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{H} = 0$
Fuente: Cheng, D. 1998.	

Así, se obtiene una ecuación vectorial homogénea de Helmholtz para E de la forma:

$$\nabla^2 E + K^2 E = 0 \quad (1.22)$$

Donde K es el número de onda que para un medio sin pérdida se expresa como:

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu} = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\text{rad}}{\text{min}} \right) \quad (1.23)$$

Para una onda plana la cual se propaga a lo largo del eje Z y cuyo campo eléctrico es paralelo al eje X, se puede expresar como lo siguiente:

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = \mu \varepsilon \frac{d^2 E_x}{dt^2} \quad (1.24)$$

Resolviendo,

$$\vec{E}(z,t) = \vec{a}_x E_0 \cos(\omega t - kz) \quad (1.25)$$

Esta ecuación representa a una onda senoidal que se propaga a velocidad c_0 , la cual se expresa como:

$$c_0 = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1.26)$$

1.6.2. Medio de propagación con pérdidas

Se les denomina a aquellos materiales en donde las ondas electromagnéticas se debilitan en su propagación. Esto debido a la baja conductividad del material. Se considera que un material con pérdidas no es magnético, entonces la permeabilidad relativa es igual a 1. Mientras que, en un medio dieléctrico con pérdidas, la permitividad de un material dieléctrico se toma en su forma compleja y se cumple $\mu \approx \mu_0$. (Figura 5 y Figura 6).

La ecuación (1.27) describe la propagación en un dieléctrico conductivo, expresado en su forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.27)$$

Esta misma ecuación escrita en régimen armónico será:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} = j\omega\left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right)\vec{E} = j\omega\epsilon_c\vec{E} \quad (1.28)$$

Donde,

$$\epsilon_c = \epsilon - \frac{j\sigma}{\omega} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (1.29)$$

Se obtiene una conductividad equivalente la cual representa todas las pérdidas en el medio:

$$\sigma = \omega\epsilon'' \quad (1.30)$$

La tangente de pérdidas es una medida de la pérdida de potencia en el medio y está definida como:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (1.31)$$

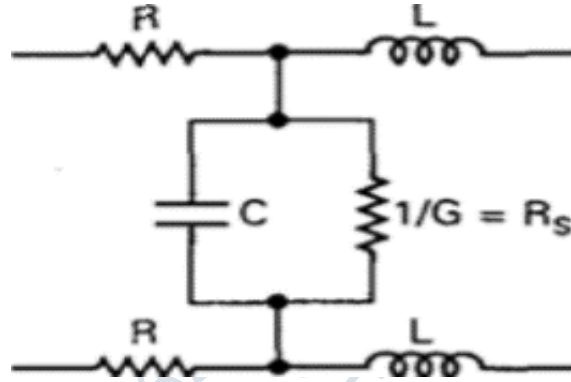


Figura 5. Circuito equivalente de un medio de propagación con pérdidas.

Fuente: Rodríguez-Ariesméndiz Rodolfo, Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios, 2017, p. 30.

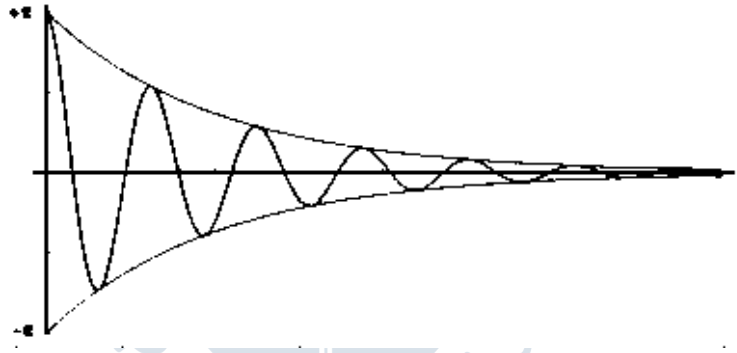


Figura 6. Representación de una onda electromagnética viajando en un medio con pérdidas.

Fuente: Rodríguez-Ariesméndiz Rodolfo, Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios, 2017, p. 30.

Las ecuaciones de la Tabla 2 no cambian para sustancias dieléctricas, por lo tanto, aquellas obtenidas para medios sin pérdidas serán usadas también en medios con pérdidas sustituyendo en dichas ecuaciones ε por la permitividad compleja ε_c o conocida como permitividad efectiva.

Así se obtiene,

$$\nabla^2 \vec{E} + k_c^2 \vec{E} = 0 \quad (1.32)$$

Donde,

$$k_c = \omega \sqrt{\varepsilon_c \mu} \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (1.33)$$

Reemplazando, se logra obtener la expresión compleja de la constante de propagación.

$$y = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu \varepsilon'} \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega \varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.34)$$

Usando la definición de tangente de pérdidas y reemplazando en la ecuación anterior se obtiene,

$$y = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu \varepsilon'} \left(1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.35)$$

Reemplazando,

$$\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\gamma z} = E_0 e^{-j\beta z} \quad (1.36)$$

La ecuación (1.36) representa una onda senoidal con atenuación y desfase. El primer término exponencial será la atenuación de la onda plana en un medio con pérdidas. El segundo término exponencial representa un factor de fase controlado por la constante de fase expresada en rad/m. La constante de atenuación y constante de fase serán α y β respectivamente, ambas son cantidades positivas.

1.6.3. Expresiones de la constante de propagación para diferentes tipos de medio

La permitividad, permeabilidad y conductividad para materiales dieléctricos sin pérdidas, con pérdidas y buenos conductores se definen según lo siguiente:

- Dieléctricos sin pérdidas:

$$\sigma = 0 \quad (1.37)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (1.38)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.39)$$

- Dieléctricos con pérdidas:

$$\sigma \neq 0 \quad (1.40)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (1.41)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.42)$$

- Buenos conductores:

$$\sigma = \infty \quad (1.43)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \quad (1.44)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.45)$$

Se expresa en las Tabla 4 y Tabla 5

Tabla 4. Resumen de la velocidad y la constante de propagación para diferentes casos.

Tipo de medio	Velocidad [m/s]	Constante de propagación [m ⁻¹]
Medios sin pérdida		
Espacio libre		
$\sigma = 0$	$v = c_0 = \frac{1}{(\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2}} = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = j\beta$
$\varepsilon = \varepsilon_0$		$\alpha = 0$
$\mu = \mu_0$		

Dieléctrico perfecto		
$\sigma = 0$	$v = \frac{c_0}{(\epsilon_r \mu_r)^{1/2}} = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = j\beta = j\omega(\epsilon\mu)^{\frac{1}{2}}$
$\epsilon = \epsilon_t \epsilon_0 = \epsilon', \epsilon = 0$		$= j\omega(\epsilon, \epsilon_0, \mu_r, \mu_0)^{\frac{1}{2}}$
$\mu = \mu_r \mu_0$		$\alpha = 0$
Medios con pérdida		
Dieléctrico		
$\sigma \neq 0$	$v = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega(\epsilon'\mu)^{\frac{1}{2}}[1$
$\epsilon = \epsilon' - j\left(\frac{\sigma}{\omega}\right)$		$-j\frac{\sigma}{\omega\epsilon'}]^{\frac{1}{2}}$
$\mu = \mu_r \mu_0$		
Dieléctrico de bajas pérdidas		
$P = \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon'}\right) \ll 1$	$v = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega(\epsilon'\mu)^{\frac{1}{2}}\left[1 - j\frac{\sigma}{2\omega\epsilon'}\right]$
Buen conductor		
$P = \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon'}\right) \gg 1$	$v = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = \alpha + j\beta = (\pi f \mu \sigma)^{\frac{1}{2}}(1 + j)$
Fuente: Cheng, D. 1998.		

Tabla 5. Ecuaciones para determinar las constantes de atenuación y de fase en un material dieléctrico con pérdidas.

Constante de atenuación (α)	Constante de fase (β)
$\alpha = \omega(\mu\epsilon')^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon'} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$	$\beta = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon'} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$
$\alpha = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$	$\beta = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$
$\alpha = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + (\tan^2 \delta)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	$\beta = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + (\tan^2 \delta)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$

Fuente: Cheng, D. 1998.

1.6.4. Propagación de ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos con pérdidas pequeñas

Tal como se mencionó anteriormente, al no ser el medio conductor un aislante imperfecto o conductor imperfecto, tiene un valor de conductividad diferente de cero.

$$\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right) \ll 1 \quad (1.46)$$

Considerando lo anterior se expresa la constante de propagación como:

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \omega \sqrt{\mu\epsilon'} + j\omega \sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2\right] \quad (1.47)$$

La constante de atenuación y la constante de fase estarán definidas por:

$$\alpha = \frac{\omega\epsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \quad (1.48)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2\right] \quad (1.49)$$

Para una onda electromagnética que está propagándose por un material dieléctrico con pérdidas no significativas puede definirse por la siguiente ecuación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2\right] \quad (1.50)$$

De igual manera, la impedancia intrínseca de un medio aislante con pequeñas pérdidas será:

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \left(1 + j \frac{\epsilon''}{2\epsilon'}\right) \quad (1.51)$$

1.6.5. Medio de propagación con un buen conductor.

Para este caso, la conductividad será muy alta o la frecuencia de trabajo puede ser muy baja ($\sigma \gg \omega\epsilon$).

La constante de propagación en condiciones iniciales se define como:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu\sigma} \quad (1.52)$$

Por lo tanto, la constante de atenuación y la constante de fase poseerán el mismo valor:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (1.53)$$

En un buen conductor por donde se propaga una onda electromagnética será definida su velocidad según:

$$c = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (1.54)$$

La impedancia intrínseca de un buen conductor será:

$$n = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} < 45^\circ \quad (1.55)$$

El ángulo de 45° significa que el campo magnético se encuentra retrasado 45° con respecto a la intensidad de campo eléctrico.

Tabla 6. Resumen de ecuaciones

	Medio sin pérdidas ($\sigma = 0$) ($J = 0$)	Espacio libre ($\sigma = 0$)	Medio con pérdidas ($\sigma \neq 0$)	Medio dieléctrico con pequeñas pérdidas ($\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$)	Buen conductor ($\sigma \gg \omega\epsilon$)
Constante de propagación	$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}$	$\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$	$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 - j \frac{\epsilon''}{2\epsilon'} + \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right]$	$\gamma \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 - j \frac{\epsilon''}{2\epsilon'} + \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right]$	$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \sqrt{\omega\mu\sigma} < 45^\circ$
Constante de atenuación	$\alpha = 0$	$\alpha = 0$	$\alpha = \frac{\omega\epsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}}$	$\alpha = \frac{\omega\epsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}}$	$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \beta$
Constante de fase	$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$	$\beta = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = \frac{\omega}{c}$	$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right]$	$\beta \cong \omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right]$	$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \beta$
Impedancia	$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} < 0^\circ$	$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi < 377\Omega$	$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} (1 + j \frac{\epsilon''}{2\epsilon'})$	$\eta \cong \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} (1 + j \frac{\epsilon''}{2\epsilon'})$	$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \angle 45^\circ$
Velocidad de fase	$c = \frac{\omega}{\beta} = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$	$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 3 \times 10^8$	$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right]$	$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right]$	$c = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$

Fuente: Cheng, D. 1998.

1.7. Reflexión y refracción de las ondas electromagnéticas

Tal como se mencionó en los apartados anteriores, la difusión de ondas electromagnéticas se da en diferentes ambientes e incluso en regiones que comprenden más de dos medios. Por lo tanto, las propiedades dieléctricas serán diferentes según la región que esté interactuando, dándose el caso que el medio 1 ($\mu_1, \varepsilon_1, \sigma_1$) y el medio 2 ($\mu_2, \varepsilon_2, \sigma_2$) separados por un plano infinito, las propiedades variarán con respecto a la otra.

Se puede observar mejor estas diferencias en la Figura 7:

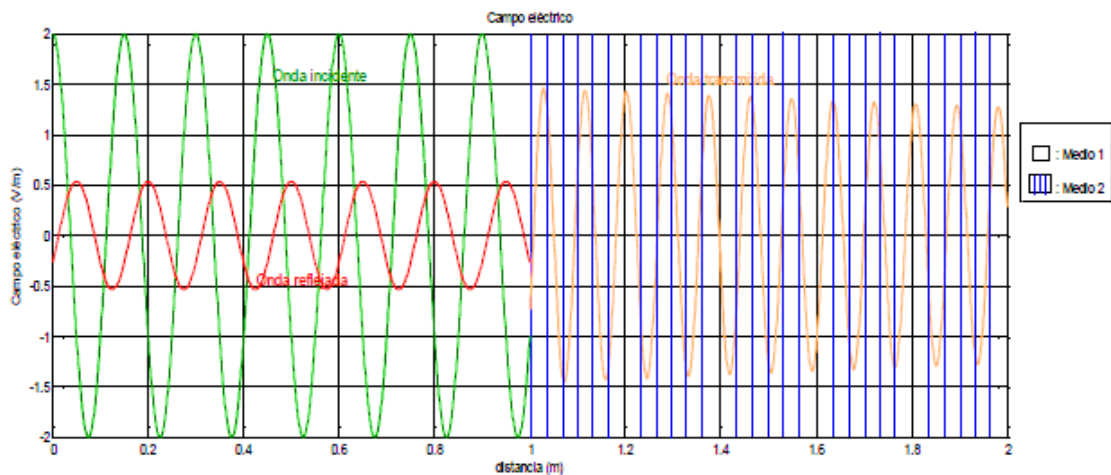


Figura 7. Comportamiento de la propagación de una onda electromagnética frente a un cambio de medio.

Fuente: K. Durand, Aplicación del sistema Wavetester para la medición de humedad en sólidos: instalación, operación y mantenimiento, 2014.

En la Figura 7 se observan dos regiones diferentes representadas por el fondo blanco y un fondo de rayas color azul, la zona blanca presentará una permitividad relativa de valor 1, mientras que la segunda será de valor 3. Al momento que la onda electromagnética atraviese el límite de ambos medios, una parte será propagada por el medio 1 y otro por el medio 2, la onda que es propagada por el medio está de color naranja llamada onda propagada, mientras que la onda de color rojo es la onda reflejada que se propaga por el medio 1. La onda generada que viaja en sentido de izquierda a derecha se representa de color verde, observando la variación de amplitud y frecuencia según el medio al que se atraviesa.

El coeficiente de reflexión Γ relaciona la onda reflejada y la onda incidente del campo eléctrico, definido por:

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad (1.56)$$

Reemplazando, la ecuación de onda para el campo eléctrico quedaría:

$$E_r(z) = \Gamma E_0 e^{y_1 z} a_x \quad (1.57)$$

La ecuación del campo magnético de la onda reflejada y esta va dirigida en sentido contrario al campo eléctrico:

$$H_r(z) = \Gamma \frac{E_0}{n_1} e^{y_1 z} (-a_y) \quad (1.58)$$

Al momento que cambia de medio, aparece el coeficiente de transmisión (τ) el cual modifica las ecuaciones para el campo eléctrico y magnético de la siguiente forma:

$$E_r(z) = \tau E_0 e^{y_2 z} a_x \quad (1.59)$$

$$H_r(z) = \tau \frac{E_0}{n_2} e^{y_2 z} (-a_y) \quad (1.60)$$

En el medio 1, las ondas propagadas serán la onda incidente más la onda reflejada.

$$E_1 = E_i + E_r \quad (1.61)$$

$$H_1 = H_i + H_r \quad (1.62)$$

Mientras que en el medio 2, se cumple que la onda propagada es la onda transmitida.

$$E_2 = E_t \quad (1.63)$$

$$H_2 = H_t \quad (1.64)$$

Los coeficientes de transmisión y reflexión según Cheng, D. K. son las siguientes ecuaciones, donde estas son deducidas porque las componentes tangenciales del campo eléctrico son continuas en la interfaz.

$$\tau = \frac{2n_2}{n_2 + n_1} \quad (1.65)$$

$$\Gamma = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (1.66)$$

Relacionándolos,

$$1 + \Gamma = \tau \quad (1.67)$$

Entonces, se concluye que un conductor perfecto se presenta con una conductividad infinita e impedancia intrínseca del medio nula. De esta forma, al propagarse una onda por un medio no conductor hacia un conductor perfecto, el coeficiente de transmisión será cero mientras que el coeficiente de reflexión será negativo ocasionando la reflexión de la onda en su totalidad.

1.8. Impacto de la molécula del agua en las ondas electromagnéticas

El agua al ser la biomolécula más abundante e influyente en la Tierra, es importante conocer sus propiedades. Su elevada constante dieléctrica permite la disociación de la mayoría de las sales inorgánicas en su seno y permite que las disoluciones puedan conducir la electricidad. La molécula de agua está conformada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, estos están unidos mediante de dos enlaces covalente polar. Su estructura es tal que forma un tetraedro regular, siendo el átomo de oxígeno el centro y forma un ángulo de 104.5° con los átomos de hidrógeno. (Lozano Teruel, 2012)

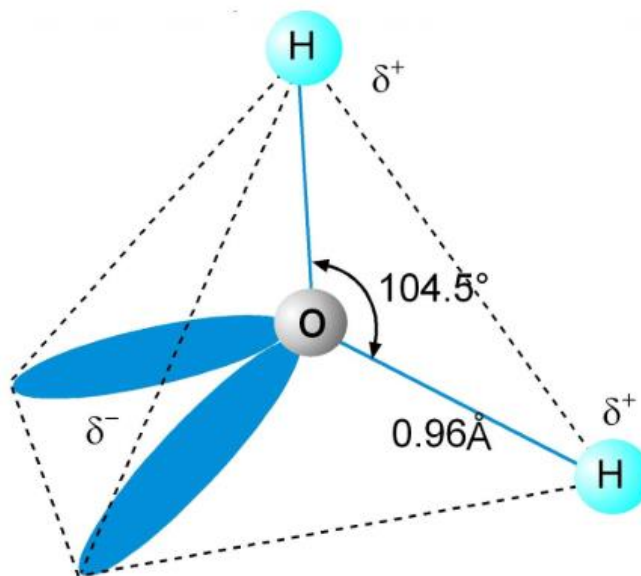


Figura 8. Esquema de la estructura molecular del agua.
Fuente: Aula fácil. <https://www.aulafacil.com/>

El agua como sustancia de vida es resaltada porque está involucrada en el ámbito ecológico y climático, esto debido a que ocupa el 71% de la superficie terrestre. Por esto es necesario comprender sus propiedades dieléctricas de su molécula que explican su interacción con un campo electromagnético e influencia en la permitividad de una sustancia húmeda. (Rodríguez-Arismendiz, 2017)

La molécula de agua absorbe energía, sin importar su procedencia debido a su bipolaridad, quiere decir que al ser aplicado en un campo electromagnético las moléculas tienden a alinearse según el campo inducido, dicho de otra forma, se polarizan. Es cuantificable este efecto por la permitividad eléctrica. (Rodríguez-Arismendiz, 2017)

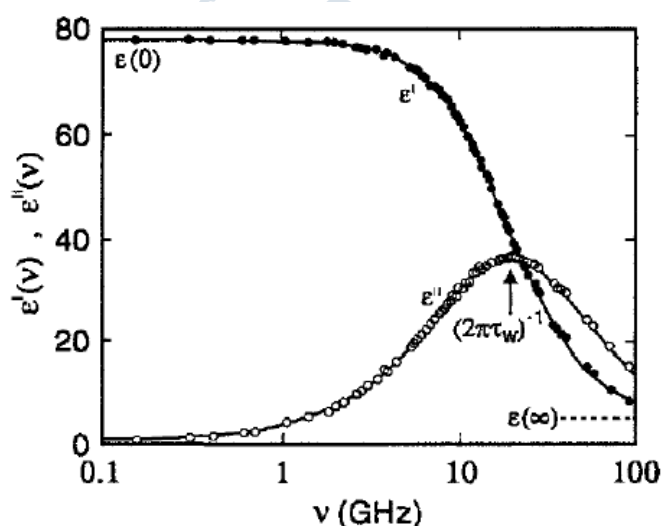


Figura 9. Comportamiento de la permitividad compleja del agua frente a diferentes frecuencias.
Fuente: Cheng, D. 1998.

Solo se considera el valor de la Constante Dieléctrica ya que el factor de pérdidas es inferior y puede considerarse despreciable. El valor de la constante dieléctrica del agua es aproximadamente 80 para frecuencias menores de 1 GHz, en un material húmedo aumenta este valor con respecto al porcentaje de humedad comparado con el valor de cuando el material está seco. En la Tabla 7 se muestran los valores de diferentes constantes dieléctricas para diferentes materiales que poseen diferente porcentaje de humedad. (Rodríguez-Arismendiz, 2017)

Tabla 7. Constantes dieléctricas para diferentes materiales.

Material o sustancia	CD	Material sustancia ^o	CD
Vacío y aire	1.0	Harina de trigo	5.0
Semillas de algodón	1.4	Carne de pescado	8.0
Granos de café	1.5	Granos de soya	8.1
Teflón	2.0	Acetona	21.0
Petróleo crudo	2.1	Alcohol etílico	24.0
Harina de maíz	2.5	Metanol	33.6
Arena seca	2.8	Glicerina	47.0
Arroz	3.0	Agua pura	80.3
Aceite de algodón	3.1	Agua de mar	88.0
Harina de soya	3.5		

Fuente: Rodríguez-Arismendiz, 2017.

Cabe mencionar la importancia que tiene el agua en la industria, tanto como en el sector alimentario y en el de construcción. Donde el porcentaje de humedad de la sustancia o material cumple un rol determinante en las propiedades que se desean adquirir. Para el sector alimentario, el control del contenido de agua influye para el posterior almacenamiento y que la sustancia no se descomponga. Además, de tener influencia en el peso ya que para la exportación de productos el costo por envío está determinado por el peso en conjunto.

En el sector de construcción tiene una gran influencia en cuanto a la preparación de hormigón, donde el porcentaje de humedad de los diferentes agregados de concreto influye en las propiedades físicas del lote por realizar.

1.9. Mezcla dieléctrica

En la industria alimenticia, las propiedades que llegan a presentar los alimentos son muy importante debido a las normativas y estándares de calidad que son exigidos. Como muchos productos alimenticios no son homogéneos, se tiene que generar una mezcla dieléctrica de sus varios componentes, para lo cual se tienen algunas ecuaciones para poder

cuantificar el valor de la constante dieléctrica de las mezclas de dos o más componentes. Siendo el valor de constante dieléctrica ϵ_1 y ϵ_2 , con volumen fraccional v_1 y v_2 , donde $v_1 + v_2 = 1$. (Rodriguez-Arismendiz, 2017)

- Ecuación de índice de refracción compleja:

$$\sqrt{\epsilon_m} = v_1\sqrt{\epsilon_1} + v_2\sqrt{\epsilon_2} \quad (1.68)$$

- Ecuación de Landau y Lifshitz:

$$\epsilon_m^{\frac{1}{3}} = v_1\epsilon_1^{\frac{1}{3}} + v_2\epsilon_2^{\frac{1}{3}} \quad (1.69)$$

- Ecuación de Bottcher:

$$\frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{3\epsilon_m} = v_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_m} \quad (1.70)$$

- Ecuación de Bruggeman:

$$\frac{\epsilon_m - \epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - v_2 \quad (1.71)$$

- Ecuación de Rayleigh:

$$\frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{\epsilon_m + \epsilon_2} = v_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad (1.72)$$

- Ecuación de Lichtnecker:

$$\ln \epsilon_m = v_1 \ln \epsilon_1 + v_2 \ln \epsilon_2 \quad (1.73)$$

Capítulo 2

Tecnologías implementadas en la medición de parámetros dieléctricos

2.1. Beneficios del empleo de señales microondas para la medición de la constante dieléctrica

- Los métodos basados en microondas se emplean en la obtención de información interna del material.
- Medición en tiempo real y en línea con el proceso.
- Uso empleado en la evaluación de las propiedades moleculares de la materia.
- No se generan perturbaciones o interferencias con la señal recepcionada en ambientes saturados o contaminados con otros gases.
- Mejor precisión.
- Obtención de una lectura completa del material.
- Medición sin contacto con el material.
- Medición no destructiva del material a medir.

2.2. Técnica de resonancia

Empleando esta técnica es posible realizar la medición en sólidos y líquidos, pero no en gases, además, es posible trabajar con altas frecuencias mayores hasta 100 GHz, pero con una banda angosta. Se puede emplear en esta técnica principalmente tres tipos de resonadores: (Durand, 2014)

- Cavidades reentrantes.
- Divisores de resonadores cilíndricos.

- Cavidades resonadoras.
- Resonador de guía de onda.

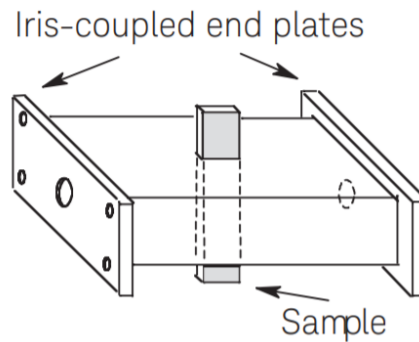


Figura 10. Resonador de guía de onda.
Fuente: A. Technologies, 2006, p.25

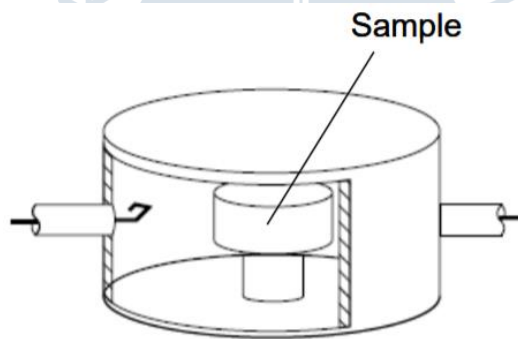


Figura 11. Resonador de cavidad cilíndrica con dieléctrico.
Fuente: Cheng,L, 2004, p. 225.

Dentro de esta técnica, el método más empleado es el de perturbaciones. Midiendo el factor de calidad con la frecuencia resonante al evaluar cavidad vacía (f_0, Q_0) y de misma forma halla los mismos parámetros con la muestra a evaluar (f_1, Q_1). (Durand, 2014)

Estas se relacionan para determinar el valor de la permitividad completa del material.

$$\varepsilon' = 1 + \frac{V_c \Delta f}{2V_s f_s} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon'' = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (2.2)$$

Siendo V_c el volumen de la cavidad resonante y V_s el volumen de la muestra.

Esta técnica permite medir la constante dieléctrica incluso en materiales magnéticos y materiales con pérdidas medias o altas. Sin embargo, se requiere estar en contacto con la muestra y realizar una preparación de la muestra ya que deben ser de muy pequeñas dimensiones. (Durand, 2014)

2.3. Procedimientos de medición mediante sonda coaxial abierta por un extremo

Con este procedimiento se puede conocer la permitividad compleja del material cuantificando el coeficiente de reflexión de la muestra. Previamente es necesario realizar una calibración estándar de la sonda coaxial para luego calibrar usando dos materiales con propiedades dieléctricas ya estudiadas, generalmente se usa agua destilada y metanol. (Durand, 2014)

Se debe considerar la permitividad del conector plano empleado en el extremo de la sonda, ya que al ser más elevada es la permitividad del conector habrá un mayor campo eléctrico que se confina en el interior del conector y habrá una menor interacción con la muestra. (Durand, 2014)

Sin embargo, esta técnica no permite realizar la medición en materiales con propiedades dieléctricas bajas como por ejemplo en aceites, plásticos, etc. Además, es necesario un contacto directo con la muestra lo que genera un desgaste en el conector y se descalibra fácilmente. (Durand, 2014)

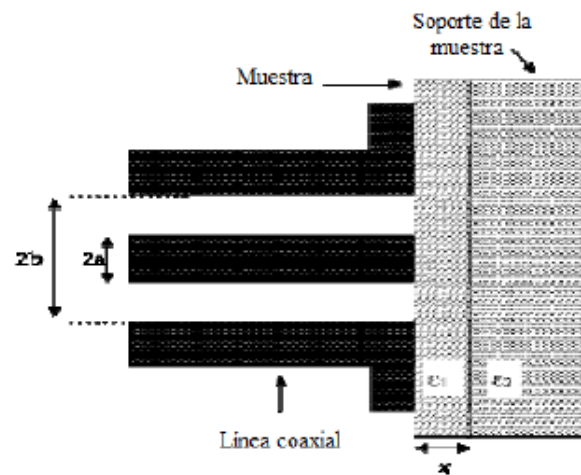


Figura 12. Técnica de sonda coaxial abierta en un extremo en contacto con la muestra.

Fuente: Kassem, H., Vigneras, V, 2010, p.291.

2.4. Procedimiento de línea de transmisión/reflexión

Se utilizan parámetros de dispersión para obtener los valores de permitividad y permeabilidad.

Este método es caracterizado por la ubicación del material a sensar ya que forma parte de la línea de transmisión pudiendo ser como guía de onda, un cable coaxial, una línea microtira (stripline). (Durand, 2014)

Al obtener los parámetros por medio de un analizador de redes vectorial (VNA) se emplea un software el cual arroja los coeficientes de permitividad y permeabilidad. Existen dos categorías dentro de esta técnica: la primera se basa en una sección transversal constante intermedia entre la muestra y el contenedor, mientras que, la segunda se basa en una sección transversal discontinua intermedia entre la muestra y el contenedor.

• Primera categoría:

Son los procedimientos que emplean líneas coaxiales, sistemas guías de onda conformados por dos puertos y líneas microtira. Siendo el procedimiento de línea coaxial la que permite determinar las pérdidas en un material.

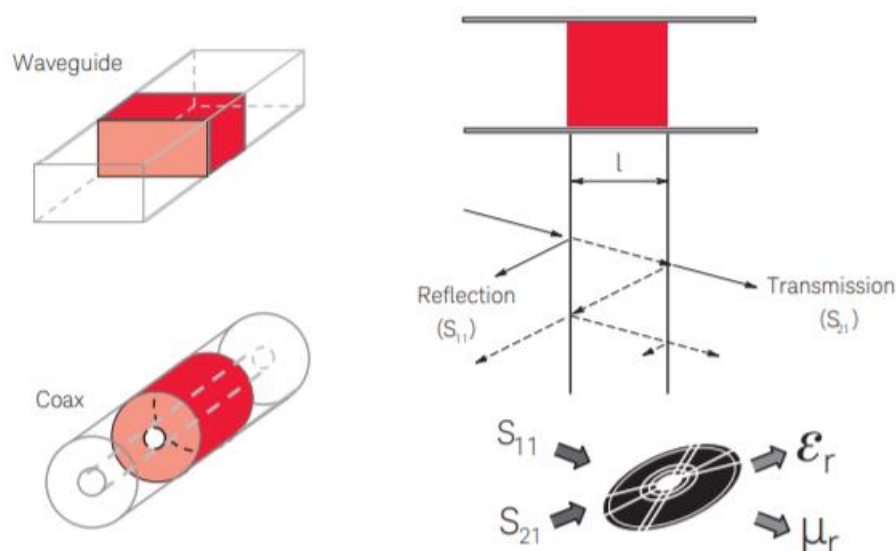


Figura 13. Método de línea de transmisión usando guía de onda y cable coaxial.
Fuente: A. Technologies, 2006, p.20.

- **Segunda categoría:**

Conformado con una sonda coaxial abierta y un sistema guía de onda abierta al lado opuesto. Para el empleo de la sonda coaxial abierta en un extremo, un extremo de la línea es puesta en contacto con el material. Esta técnica es menos intrusiva con el material que en el caso de la primera categoría por lo que no es necesario hacer una preparación de la muestra, solo asegurar una superficie lisa.

2.5. Procedimiento empleando placas paralelas

Consta de ubicar la muestra entre dos electrodos para formar el capacitor. El circuito resultante puede ser en serie o paralelo, pero para determinar la permitividad relativa se requiere emplear un circuito en paralelo. (Figura 14 y Figura 15)

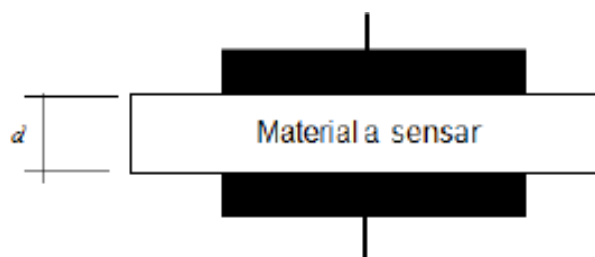


Figura 14. Ubicación de la muestra.
Fuente: Raymond, W. J. K, 2003, p.3798.

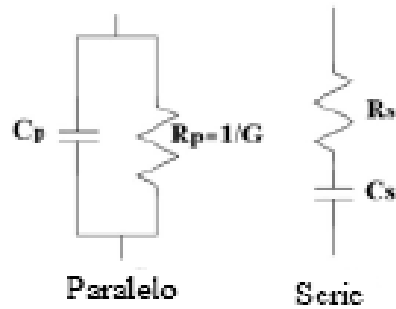


Figura 15. Circuitos equivalentes en serie y paralelo.
Fuente: Raymond, W. J. K, 2003, p.3798.

Esta técnica se puede realizar hasta 100 MHz, ya que el capacitor a mayores frecuencias se comporta como un inductor al estar sobre la frecuencia de resonancia, la cual depende del material. Es importante mencionar que para esta técnica las dimensiones de la muestra deben ser diminutas.

La siguiente ecuación arroja el valor de la permitividad:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.3)$$

Donde,

C: capacitancia (nF).

ϵ_0 : Permitividad en el vacío.

ϵ_r : Permitividad relativa del medio.

d: Distancia entre los platos capacitivos.

A: área efectiva de la superficie de los platos m^2

Este procedimiento es caracterizado al ser económico, de construcción viable y rápida, y la preparación de la muestra a medir no requiere complejos requisitos ya que solo debe asegurar que sea plana y delgada. Pero presenta la desventaja que la medición solo es posible en un angosto rango de frecuencias.

2.6. Técnica de espacio libre

La permitividad del material se logra cuantificar incluso trabajando en ambientes hostiles mediante el uso de señales microondas, además su operación es viable en banda ancha y altas frecuencias. Al ser una medición no destructiva, no habrá un deterioro en las antenas, resto del sistema o en la muestra.

El método de esta técnica es colocando la muestra entre la antena receptora y emisora, donde se detecta el efecto de onda que impacta en el material y luego se propaga por el espacio libre entre una antena emisora y otra receptora. Esto luego es analizado midiendo la variación de amplitud de fase y de la señal con lo cual se logra determinar la permitividad. Figura 16

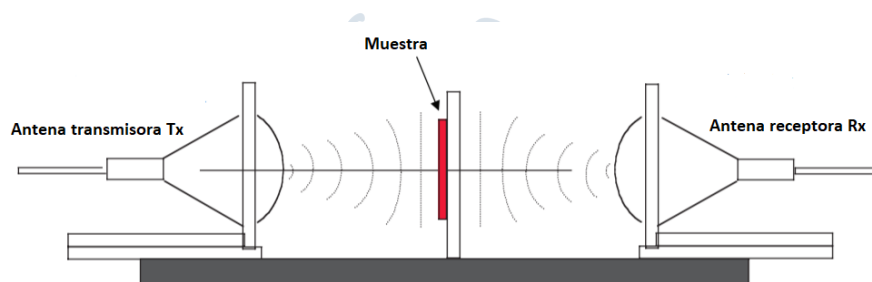


Figura 16 Técnica de espacio libre.
Fuente: A. Technologies, 2006, p.23.

Para el análisis de desfase y amplitud de onda se utiliza un analizador de redes vectoriales (Vector Network Analyzer – VNA), dos antenas (transmisora TX y receptora RX) y el software para determinar la permitividad. Primero se procede a medir la señal en vacío (sin muestra) para determinar su amplitud y fase de la señal transmitida, posteriormente al realizar la medición con muestra se compara el desfase y se halla la atenuación de la señal obtenida con muestra y sin muestra.

Con este método no es necesaria una preparación en la muestra, siendo una técnica rápida, eficaz y no destructiva. Además, es posible emplear en materiales que no tienen una estructura homogénea como en el caso de los granos de trigo, cacao, harina, etc. Así también se puede implementar en industrias para monitorear y controlar la calidad en la línea de producción.

Sin embargo, para garantizar una eficiente medición es necesario que no haya objetos no deseados cerca al lugar de la medición, esto con la finalidad de evitar los disturbios y cambios en el ambiente que ocasionen interferencias.

Las consideraciones son:

- Se debe presentar una superficie plana perpendicular a la señal de la onda generada por la antena TX.
- Distancia entre antenas y la muestra debe ser mayor a $\frac{2D^2}{\lambda}$, donde D es la dimensión más larga de la apertura de la antena y λ es la longitud de onda de la frecuencia de trabajo.
- El espesor de la muestra debe ser mayor que la longitud de onda con que se trabaja.

2.6.1. Sistema Wavetester

En la actualidad empresas como Meet, emplean las señales microondas para la determinación de diferentes propiedades de los materiales, principalmente la humedad. El sistema que ellos llaman es Wavetester (WT), tal como se mencionó este fue desarrollado por la empresa suiza Meet Electronic Engineering con el apoyo y supervisión de la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI).



Figura 17. Módulo Wavetester.

Fuente: Meet, Electronic Engineering. Web: www.meet-electronics.com/products/wavetester

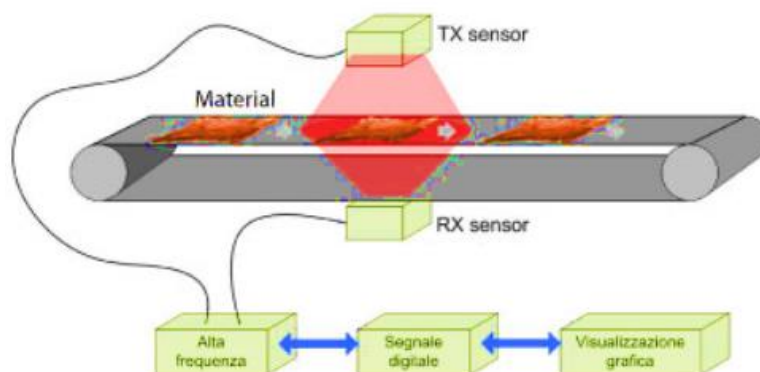


Figura 18. Interpretación gráfica del funcionamiento del Wavetester.

Fuente: meet, Electronic Engineering. Web: www.meet-electronics.com/products/wavetester

Wavetester es una idea innovadora cuya operación no requiere algún contacto con el material a ser analizado, permitiendo escanear el volumen del material en su totalidad.

Su funcionamiento se basa en la emisión de una baja señal de microonda enviada por un sensor y luego recepcionada por otro que esté a su misma distancia. El sistema compara la potencia de la señal transmitida con la recepcionada por medio de un sofisticado procesamiento de algoritmos logrando procesar más de 3 señales por segundo. Las áreas de aplicación son:

- Control de calidad de productos.
- Sistemas cerrados de medición.
- Optimización de costos y control de calidad en procesos de secado.

Monitoreo de productos orgánicos. El sistema Wavetester se trata de un sistema completo para la medición continua de muestras en el contenido de humedad de materiales. Está diseñado para ser aplicado en transportadores o en las salidas de silos. Este se conforma por una unidad de adquisición y control a la que están conectados sensores encargados de enviar y recibir la señal microondas, para luego ser procesados por medio una de PC.

Tal como se menciona anteriormente, debido a que no es necesario un contacto directo con la muestra a medir, hace que el sistema sea muy confiable y libre de mantenimiento ya que no hay un desgaste o envejecimiento por abrasión en las antenas. La particularidad de este sistema se debe a que, a diferencia de otros sistemas existentes, se logra analizar la totalidad del espesor de la muestra debido a un sistema de doble antena.

El contenido de humedad es determinado debido a la interacción de las ondas microondas con las partículas de agua, donde habrá una mayor o menor interacción dependiendo del porcentaje de humedad. Gracias al Wavetester y a técnicas sofisticadas de modulación junto con el procesamiento digital dedicado (DSP) del sistema, se logra una medición repetible y confiable.

El sistema Wavetester ha sido desarrollado como respuesta a las necesidades del mercado, lograr una medición en línea de medidas integrales con alta precisión en el porcentaje de humedad de materiales, mientras que al mismo tiempo se evita el contacto físico con el material bajo prueba y sin generar tiempo muertos en la línea de producción.

Los resultados que genera el Sistema Wavetester, son mostrados en una interfaz amigable donde permite el seguimiento en tiempo real de la medición y facilita la adquisición de datos al almacenarlos en formato .txt y .xml.

Este sistema emplea el uso de dos algoritmos que determinan la constante dieléctrica los cuales son algo_C y algo_F; su principio de operación consta de diferentes principios: la velocidad de propagación de las microondas que determinan la constante dieléctrica y midiendo las pérdidas de propagación de las señales microondas.

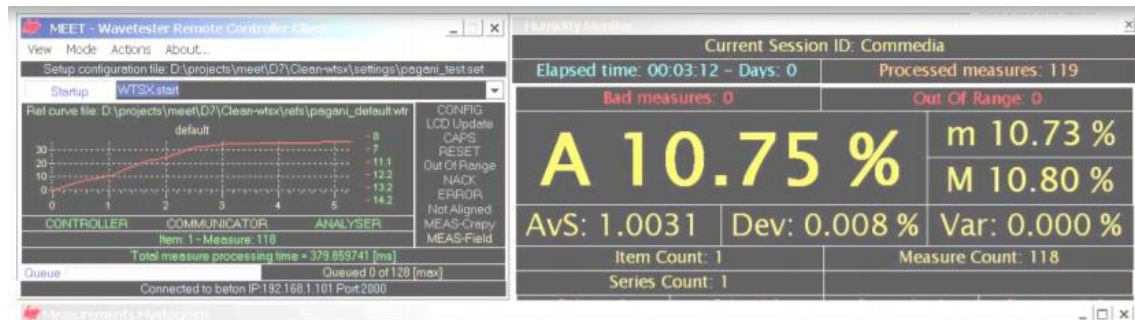


Figura 19. Ejemplo de cómo se muestran los resultados de medición.
Fuente: Elaboración propia.

Su funcionamiento es el siguiente: el centro de mando del Wavetester genera una señal microondas que irradia por un emisor hasta impactar un material expuesto (el cual deberá estar perpendicular a la posición de la emisión de la señal). Debido a la reflectividad del material, una parte de la señal será reflejada y otra transmitida atravesando el material y captado por la antena receptora.

Previamente a la medición de la muestra se debe realizar una medición en vacío para determinar la señal transmitida/reflejada sin muestra, esta será almacenada en el UC del Wavetester, posteriormente esta se tomará como referencia para el análisis y medición de la señal obtenida cuando se hace el ensayo con la muestra entre las dos antenas.

Conociendo que la permitividad de un material está compuesta por dos variables, siendo la parte real la constante dieléctrica (ϵ') y mientras que la parte imaginaria es el factor de pérdidas (ϵ''), las cuales se relacionan según:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.4)$$

Por lo tanto, considerando que el factor de pérdidas es menor que la constante dieléctrica en la frecuencia trabajada, se puede considerar la constante dieléctrica como el valor de la permitividad. Cabe mencionar que el Wavetester emplea un rango de

frecuencias 1GHz – 2GHz usando 200 muestras y mostrando el promedio de estas como resultado.

Las reflexiones representarán puntos donde se ha obtenido una mala medición, esta variará según el algoritmo utilizado. De forma que a menor reflexión se obtenga en la curva de calibración se tendrán menos puntos errados de la constante dieléctrica durante la medición de la muestra y por lo tanto el valor promedio será más exacto. Sin embargo, en muestras con contenido alto de humedad, el coeficiente de transmisión no debe ser alto debido a la presencia de moléculas de agua.



Capítulo 3

Sistemas empleados para la elaboración de hormigón en concreteiras y medición del porcentaje de humedad en agregados de concreto

3.1. Importancia e influencia de los componentes en la fabricación del hormigón

El diseño de una mezcla es el conjunto de las proporciones de los diferentes componentes o materiales que son combinados para dar el producto final, el hormigón. (UNACEM, 2016). A menudo el diseño de una mezcla de preparación de hormigón es realizado en un laboratorio con procedimientos establecidos para este propósito, estas deben estar en el siguiente rango:

Aire y Aditivos	2-5%
Agua	6-12%
Cemento	15-20%
Agregado fino	25-35%
Agregado grueso	35-45%

Figura 20. Rango de proporciones de componentes para la fabricación del hormigón.
Fuente: Elaboración propia.

Componentes:

- **Aire:** No es posible eliminar por completo el aire atrapado dentro del hormigón, sin embargo, debe reducirse a lo mínimo, a niveles de 1.5 a 2%, esto se logra compactando la mezcla prolijamente.
- **Aditivos:** Este componente no siempre es utilizado en los diseños de mezclas, ya que se emplea de acuerdo a las recomendaciones del fabricante o proveedor. Estas son sustancias químicas que sirven para mejorar las propiedades del hormigón, sin embargo, si se realiza una mala dosificación puede generar complicaciones o

inconvenientes no obteniendo las propiedades requeridas. El uso de aditivos ha generado importantes avances tecnológicos en los últimos años, sin embargo, deben ser usados con precaución y familiarización de las formas y proporciones que deban emplearse. Es importante que sean especificadas las necesidades de la obra.

- **Agua:** Es importante que el agua sea limpia, libre de materia orgánica y otras sustancias químicas ya que reaccionará químicamente con el cemento. Es recomendable, enviar a un laboratorio una muestra del agua a utilizar para su análisis químico. Se debe evitar el uso de aguas negras, agua empleada en procesos industriales, aguas salobres o que hayan sido usadas en labores pecuarias o agrícolas, además de evitar que el agua contenga materia orgánica para la fabricación y curado del hormigón. Tabla 8

Tabla 8. Sustancias nocivas en el agua.

Aguas	Afectación
Aguas de desperdicios industriales	Reducen la resistencia
Impurezas orgánicas	Hacen más lento el fraguado y disminuyen la resistencia.
Aceite	Reducen la resistencia.
Agua de mar	Acelera la corrosión de las armaduras y productos eflorescencia.
Algas	Reduce la resistencia y afecta la adherencia.
Azúcar	Retarda el fraguado y reduce la resistencia.

Fuente: Elaboración propia.

- **Cemento:** Se compone de silicatos cálcicos hidráulicos cristalinos y usualmente contiene agua sulfatada y calcio hasta 5% de piedra caliza.
- **Agregados:** Son partículas duras, limpias, de diferentes formas y tamaños. Se dividen en Agregado grueso y Agregado fino.

Agregado grueso:

También se considera a la piedra triturada dentro de esta clasificación, estas deben provenir de rocas sanas, duras y estar formadas por partículas prismáticas, con forma cúbica, no alargadas. Deben estar libre de suciedad como polvo producto de la trituración.

Al igual que la grava o canto rodado debe estar limpia, libre de limo o arcilla y no tener partículas livianas como polvo. No es conveniente el uso de aquellas que sean muy lisas y tampoco aquellas planas porque son livianas y de poca resistencia. (UNACEM, 2016)

Agregado fino:

Es recomendable el uso de arena natural, aquella que puede encontrarse en antiguos lechos de ríos o de ríos de régimen actual, siempre que no esté contaminada de arcilla o de materia orgánica. La arena gruesa es preferible cuando tiene un alto contenido de partículas finas. El polvo de la trituración de piedras se puede usar como sustituto de la arena, sin embargo, se requiere una mayor atención en cuanto a la granulometría debido a encontrarse una mayor cantidad de partículas gruesas y finas. (UNACEM, 2016)

3.2. Clase de hormigón empleado en el sector de la construcción

Para la elaboración de hormigón, no se encuentra en todas las empresas que cuenten con maquinaria como una hormigonera profesional o industrial para llevar a cabo el proceso de mezclado. No obstante, es importante tener en cuenta este proceso en obras de gran envergadura, como edificios, casas, pavimentos, etc.

Además de los componentes principales, la densidad del hormigón está determinada en función de la cantidad de rocas que sean añadidas a la mezcla. Es de gran importancia debido a que le aporta resistencia necesaria requerida dependiendo del tipo de obra y las cargas que deba soportar la estructura. Por esto se encuentra:

Tipos de hormigón según su densidad:

- **Liviano:** Su peso está entre 800 y 1800 Kg/cm³, requiere añadir aire y aditivos específicos. Su uso es en el relleno o nivelación de azoteas, construcción de contra pisos, tabiques no estructurales y para cañerías.
- **Normal:** Su peso está sobre los 2000 Kg/cm³ y forma parte de las estructuras armadas en obras como cimientos, pilares, paredes, pavimentos y también se usa para elementos decorativos.
- **Pesado:** Debido a la adición de aditivos más densos, su composición supera los 3000 Kg/cm³, lo cual sirve para blindar estructuras, bloquear la radiación, contrapesos para puentes, etc.

Tipos de hormigón según su conformado:

- **Hormigón en masa:** Es vertido directamente en moldes previamente preparados y dan macizos sometidos a esfuerzos de compresión.
 - **Hormigón ciclópeo:** Es un tipo de material de construcción usado generalmente en cimentaciones, lechos marinos o de río. Es muy poco usado en la actualidad. Este tipo contiene en su interior piedras que superan los 30 cm.
 - **Hormigón ligero:** Material de poca densidad, formado por áridos de pequeña densidad. Utilizado en la obtención de elementos que no requieran grandes resistencias, como tabiques, forjados de pisos, fachadas de revestimiento y como aislante de calor y sonido.
 - **Hormigón armado:** Contiene en su interior una armadura metálica y trabaja también a flexión. Las barras de acero van en el interior de la pieza de hormigón. Se resisten las tracciones y las compresiones.
 - **Hormigón pretensado:** Contiene acero sometido a fuerte tracción previa y permanente. La idea básica del pretensado es someter a compresión al hormigón ante de cargarlo, esto se hace en todas las áreas que se produzca una tracción.
 - **Hormigón post - tensado:** Parecido al hormigón pretensado, la armadura de acero es tensada luego que el cemento haya endurecido y fraguado.
 - **Hormigón ordinario:** Es la mezcla entre cemento Portland, agua y elemento áridos de diferentes tamaños que sean superiores o inferiores a 5 mm, además de grava y arena.
 - **Hormigón autocompactante:** No requiere de compactación debido a una dosificación precisa de aditivos superplastificantes que facilitan la compactación por su propio peso.
 - **Hormigón sin finos:** Esta mezcla solo contiene agregados gruesos, evitando la arena.
 - **Hormigón celular o aireado:** Para su obtención se debe incorporar aire u otros gases a la mezcla, esto ocasiona que el concreto tenga baja densidad.
 - **Hormigón de alta densidad:** Su fabricación se realiza con áridos de densidad superior como barita, hematita o magnetita, contrario al hormigón aireado.
- (UMACON, 2017)

3.3. Influencia del porcentaje de humedad en los agregados de concreto

En el volumen del concreto cerca del 70 a 80% lo ocupan los agregados minerales, por tal motivo tienen una gran influencia en sus propiedades, los cuales son provenientes de roca natural, roca chancada o grava natural y arena. Los agregados son usados para optimizar la estabilidad dimensional y la resistencia a la erosión. La resistencia a compresión y el diseño de mezclas son esencialmente independientes de la composición de los agregados, sin embargo, la durabilidad del concreto podría ser afectada. Sin embargo, para ciertos casos un tipo de roca en particular podría ser requerido para obtener ciertas propiedades del concreto, como por ejemplo alta densidad o bajo coeficiente de expansión térmica. Sin embargo, si no hubiera requerimiento de ese tipo, solo se tendría que cumplir con la Norma ASTM C33 ó la NTP 400.037-2002.

Los agregados deben cumplir en ser duros, resistentes y libres de impurezas indeseables. Aquellos que sean porosos y blandos limitarán la resistencia a compresión y la resistencia al desgaste, además podrían quebrarse durante el mezclado y afectar significativamente su trabajabilidad debido al incremento de la cantidad de finos. Por tanto, se debe evitar el uso de agregados que contengan una cantidad considerable de partículas débiles y friables. Además, los agregados deben estar libres de impurezas tales como: arcillas, limos o materia orgánica. Si las impurezas recubrieran la superficie de los agregados, interferirían con la adherencia cemento – agregado, además de incrementar la cantidad necesaria de agua en el concreto, sobre todo si se trata de materia orgánica ya que impediría la hidratación del cemento.

3.4. Propiedades requeridas para el diseño de mezclas

- **Forma y textura:** Afecta en cuanto a la trabajabilidad del concreto fresco influyendo en la cantidad de pasta requerida, ya que se deberán recubrir los agregados y proporcionar lubricación para disminuir la interacción entre las partículas del agregado durante la mezcla. Es ideal que estos tengan forma esférica con superficie lisa. Se puede encontrar este tipo de agregados en arenas naturales y grava de los ríos. Aquellos con forma angular y textura rugosa interfieren en el movimiento de las partículas adyacentes, además al poseer una mayor relación superficie a volumen se requiere mayor cantidad de pasta para recubrirlos por completo. Incluso la presencia

de partículas chatas o alargadas, en una roca chancada, significaría la presencia de planos de debilidad. La roca chancada tiende a presentar una textura más rugosa que la arena y grava natural ya que no ha sido erosionada y alisada por efecto del agua y el clima.

En cuanto a los agregados finos afectan solo en la trabajabilidad, en comparación con los agregados gruesos que influyen en las propiedades mecánicas del concreto a través de afectar la adherencia mecánica.

La forma influye favorablemente a la resistencia al incrementar la cantidad de área superficial disponible para la unión con la pasta para un contenido de agregado dado, mientras que la forma rugosa mejora la componente mecánica de la unión.

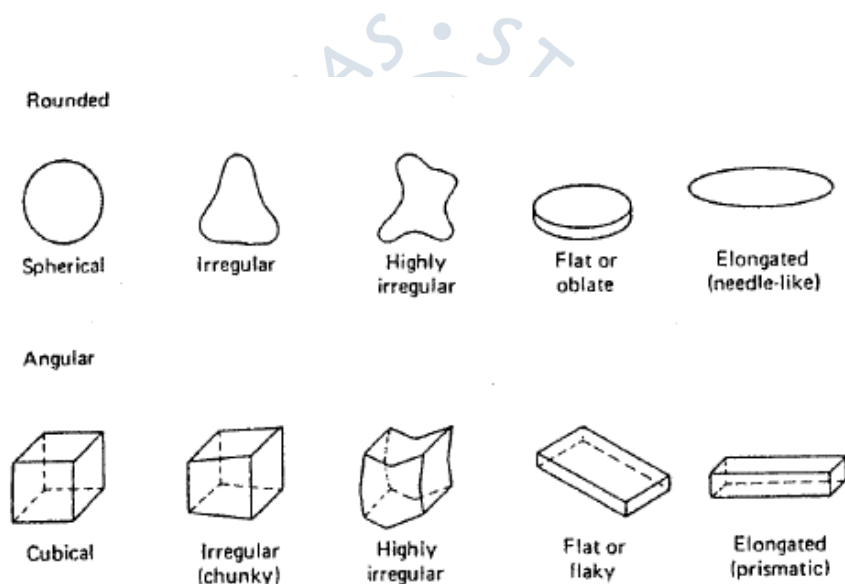


Figura 21. Clasificación de las formas de los agregados.

Fuente: Separata del curso Tecnología del concreto, Universidad de Piura, p. 02.

- **Granulometría:** Es importante conocer la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado debido a que determina los requerimientos de la pasta para lograr un concreto trabajable. Al ser el cemento el componente más costoso, es necesario, minimizar el costo del concreto empleando la cantidad óptima de pasta consistente con la producción de un concreto que pueda ser manejado, compactado, acabado y proporcionar la resistencia y durabilidad necesaria.

La granulometría es determinada por un ensayo de tamices, donde una muestra representativa del agregado es pasada a través de una columna de tamices ordenados según el tamaño de la abertura de la malla de cada uno. Para efectos de ordenamiento es conveniente dividir el agregado en una fracción gruesa y una fina, donde la fracción

gruesa será retenida hasta el tamiz #4 (4.76 mm abertura de la malla) mientras que la fracción fina es aquella que logra pasar el tamiz mencionado anteriormente.

De acuerdo con la NTP 400.012-2001, se procedió a realizar el ensayo de granulometría de los agregados grueso (piedra redondeada y triturada) y fino. Mediante este ensayo podemos determinar la distribución por tamaño de las partículas que conforman los agregados. Ver Tabla 9

Tabla 9. Tamaño de tamices ASTM comúnmente utilizados para análisis de agregados.
Fuente: Elaboración propia.

Agregado grueso	Designación ASTM del tamiz	Tamaño nominal de la abertura del tamiz	
		mm	pulgadas
	3 pulgadas	75	3
	2 1/2 pulgadas	63	2.5
	2 pulgadas	50	2
	1 1/2 pulgadas	37.5	1.5
	1 pulgada	25	1
	3/4 pulgada	19	0.75
	1/2 pulgada	12.5	0.5
	3/8 pulgada	9.5	0.375

Agregado fino	Designación ASTM del tamiz	Tamaño nominal de la abertura del tamiz	
		mm	pulgadas
	No. 4	4.75	0.187
	No. 8	2.36	0.0937
	No. 16	1.18	0.0469
	No. 30	0.6	0.0234
	No. 50	0.3	0.0124
	No. 100	0.15	0.0059

- **Contenido de humedad:** Debido a la porosidad de los agregados, el agua será absorbida hacia su interior. El agua también puede ser retenida en la superficie de los agregados en forma de una fina capa o película de humedad. Por lo tanto, es relevante conocer el estado de humedad de los agregados empleados en el concreto. En caso el agregado sea capaz de absorber, disminuirá la relación agua cemento efectiva.

Los agregados tienen cuatro estados de humedad:

- Seco al horno (OD):

Se logra cuando toda la humedad es removida del agregado cuando es calentado al horno a 105°C hasta obtener peso constante. Se considera que en este estado los poros en la superficie están vacíos.

- Seco al aire (AD):

Se obtiene al remover la humedad de la superficie del agregado, sin embargo, los poros estarán parcialmente llenos de agua.

- Saturada superficie seca (S.S.D):

En este estado todos los poros del agregado se hallan llenos de agua, pero no hay agua en la superficie del mismo.

- Mojado:

En este estado hay agua en la superficie y en los poros del agregado.

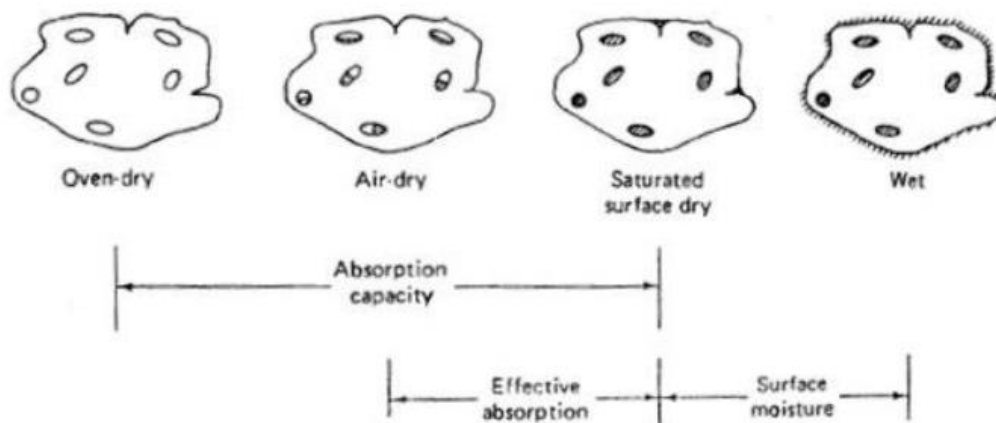


Figura 22. Estados de humedad de los agregados.

Fuente: Separata de curso Tecnología del concreto, Universidad de Piura, p. 09.

Solo los estados de Seco al horno (OD) y Saturado Superficie Seca corresponden a contenidos de humedad específicos por los tanto pueden ser utilizados como estados de referencia para los cálculos del porcentaje de humedad. El estado de Seco al aire

(AD) y mojado representan el posible porcentaje de humedad que existirá en los agregados almacenados en obra.

Sin embargo, el estado SSD se considera el mejor estado de referencia por lo siguiente:

- Representa el estado de humedad de equilibrio, de los agregados dentro del concreto en estado fresco, en el cual los agregados no absorberán ni cederán agua a la pasta de cemento.
- El contenido de humedad obtenido en los agregados en el campo es más parecido al estado SSD que al OD.

Sin embargo, la obtención del estado SSD es complicado y requiere de mucha práctica y habilidad; por tal motivo se prefiere usar la condición seca al horno como punto de referencia.

$$\%Humedad = \left(\frac{W_{en stock} - W_{SSD o OD}}{W_{SSD o OD}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

De esta forma, cuando el contenido de humedad es positivo, el agregado tiene humedad superficial, y cuando es negativo, el agregado está seco al aire, por lo tanto, se mide la capacidad de absorción del agregado.

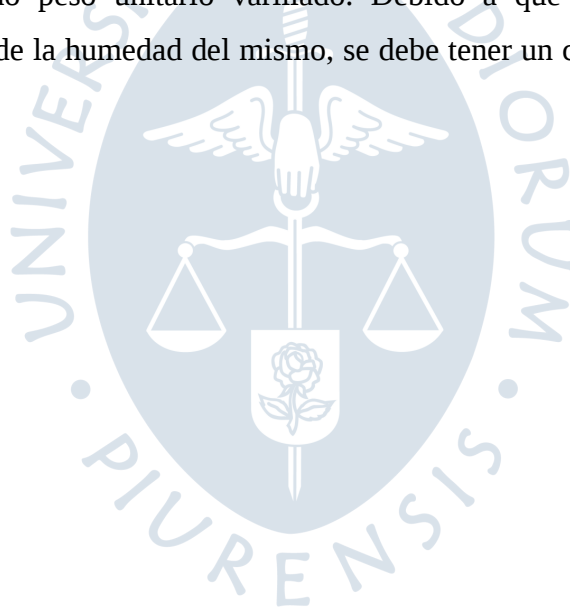
El agregado grueso está generalmente en un estado seco al aire con una absorción efectiva menor a 1%. En cambio, el agregado fino a menudo está mojado por la humedad superficial típico entre 0 y 5%. Esto se debe a que en los agregados finos se forma una delgada película de agua y se retiene agua en los intersticios entre las partículas final como producto de la formación de meniscos. Producto de la formación de estos meniscos se forma una película más gruesa de agua separando las partículas e incrementando el volumen aparente del agregado.

De acuerdo a la NTP 339.185-2002, se procedió a realizar el ensayo de determinación de contenido de humedad total de los agregados. Mediante este ensayo, es posible determinar el contenido de agua presente en los agregados, lo cual permite diseñar concreto con la relación a/c requerida según sea el caso. Este ensayo no considera el agua que pueda formar parte de la composición química de los elementos a evaluar. A continuación, se muestra brevemente el procedimiento y resultados generales. (Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI, 2002)

- **Gravedad específica:** Necesaria para la dosificación de mezclas de concreto, con este parámetro se logra determinar las relaciones entre peso y volumen. La densidad es expresada como la gravedad específica la cual es una relación adimensional de la densidad del agregado a la densidad del agua:

$$S.G = \frac{\text{Densidad del agregado}}{\text{Densidad del agua}} \quad (3.2)$$

- **Peso unitario:** Es definido como el peso de un volumen determinado de agregado. El peso unitario, mide el volumen que le agregado ocupa dentro del concreto e incluye las partículas sólidas y los espacios vacíos que quedan entre ellos. Para determinar el peso unitario se debe pesar un recipiente de volumen conocido lleno con el agregado. Su procedimiento está descrito en la norma NTP 400.017-1999. El peso unitario también es llamado peso unitario varillado. Debido a que el peso unitario del agregado depende de la humedad del mismo, se debe tener un contenido de humedad constante.



Capítulo 4

Caracterización de arena y piedra de humedad y parámetros físicos determinantes por métodos tradicionales

4.1. Metodología empleada

La presente tesis busca simplificar los tiempos muertos dentro de la línea de producción de lotes de piezas de concreto, para lo cual, como materia prima eran los agregados finos y gruesos de diferentes canteras. Estas al poseer cierta humedad inicial, representaba una desviación en el cálculo de la cantidad de agua necesaria para obtener una mezcla ideal que genere un lote de productos de alta calidad. Por lo tanto, era común que una muestra de cada cantera sea enviada a un laboratorio de análisis de suelos para determinar su nivel de humedad inicial. Este último ensayo tomaba reglamentariamente 24 horas según la Norma Técnica Peruana, lo cual generaba tiempos muertos en la producción y consecuentemente pérdidas de horas hombre y pérdidas económicas.

Como parte inicial, se hizo la evaluación sobre las diferentes hipótesis iniciales que se tuvieron sobre la medición de humedad relacionándola con el coeficiente dieléctrico. Como hipótesis inicial del proyecto, se tuvo que el porcentaje de humedad variaría conforme el coeficiente dieléctrico aumentaba al haber mayores partículas de agua; es decir, había una mayor concentración de agua. Esto fue validado y se dio por aceptada al comienzo del proyecto. Posteriormente, se busca hallar una relación y ecuación lineal que pueda predecir el nivel de humedad, esto variaría según el coeficiente dieléctrico de cada muestreo según la cantera elegida, es así que se realizó durante aproximadamente 2 meses la toma de muestras de diferentes canteras: Pariñas, Santa Cruz, Trujillo y Cajamarca.

En el presente informe se muestra el análisis estadístico de las muestras obtenidas de las 4 diferentes canteras, así como el estudio de su correlación entre sí y su validación.

Permitiendo calcular una ecuación lineal referencial con la que sea posible predecir el valor del nivel de humedad de cierto agregado fino con tan solo conocer el valor de su coeficiente dieléctrico. Este último valor es obtenido mediante el Módulo de medición Wavetester. (Ver Anexo A).

4.2. Análisis de regresión lineal en Statgraphics

Para determinar la relación entre dos variables, ya sean X e Y, cuando representan algunas características de un universo a evaluar, es posible predecir el comportamiento de la variable que sea dependiente de otra. Algunos ejemplos donde se utiliza la regresión lineal:

- Resistencia del concreto según su tiempo de envejecimiento.
- Cantidad de productos defectuosos según la rapidez de la línea de producción.
- Número de reparaciones correctivas en un auto según su kilometraje.

Se observa en los anteriores ejemplos que hay una cierta asociación entre dos variables, X e Y, una llamada variable independiente o de predicción y otra llamada variable dependiente o de respuesta. El análisis de regresión lineal solo es estudiado cuando las variables de relación no son causales. Quiere decir, que no sería correcto afirmar que el concreto poseerá cierta resistencia si se deja envejecer un tiempo x, ya que si bien la resistencia se ve influenciada, esto no determina su característica física pues esta depende de su composición química y la preparación.

Al ser X e Y variables de predicción y respuesta, no sería posible la predicción con exactitud para ciertos valores de X, pero si se puede considerar como una estimación de respuesta. Para estimar una función matemática que describa este proceso es necesario tomar una serie de mediciones correspondientes a los valores respuesta y_n de x_n .

Lo siguiente sería agrupar la data en un sistema de coordenadas cartesianas y representarlos en un gráfico de dispersión, lo siguiente sería determinar el tipo de función empleando el Método de mínimo cuadrados.

Si la función de X e Y se comportara como una función lineal, entonces se ajustaría a la recta de regresión de la población.

$$\mu_{Y/X} = \alpha + \beta X \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 es conocida como recta de regresión de Y con respecto a X. Siendo, el parámetro α la intersección de la recta con el eje Y, mientras que el parámetro β representa la pendiente de la recta, es decir cuánto incrementa Y por cada unidad de X.

Posteriormente, para el análisis de la regresión lineal es conveniente hallar la variación total de los valores Y alrededor de su media $\bar{Y}$, lo cual se divide en:

- Variación de la regresión o variación explicada: explica la relación que hay entre X e Y mediante la variabilidad de los datos estimados Y' en referencia a su media $\bar{Y}$.
- Variación del error o variación no explicada: como su nombre indica no explica la relación que hay entre X e Y, pero sí la relación existente con otros factores, esto es mediante la variabilidad de los datos Y en referencia a los valores estimados Y' .

Para la cuantificación de la variación se puede presentar 3 casos:

- Suma total de cuadrados: para medir la variación total.

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.2)$$

- Suma de cuadrados de la regresión: medir la variación de la regresión.

$$SSR = \sum (y' - \bar{y})^2 \quad (4.3)$$

- Suma de cuadrados del error: empleado para estimar la variación del error.

$$SSE = \sum (y_i - y')^2 \quad (4.4)$$

Cumpléndose lo siguiente:

$$SST = SSR + SSE \quad (4.5)$$

Mientras que el coeficiente de determinación se define como el cociente de la suma de cuadrados de la regresión y la suma de cuadrados totales, este determina la bondad del ajuste de la recta de regresión.

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (4.6)$$

No solo se presentan regresiones lineales, también puede darse el caso de una regresión simple no lineal:

- Regresión polinomial:

$$Y = \alpha + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \dots + \beta_n X^n \quad (4.7)$$

- Regresión potencial:

$$Y = \alpha x^\beta \quad (4.8)$$

- Regresión exponencial:

$$Y = \alpha \beta^x \quad (4.9)$$

Se presentan a continuación las linealidades obtenidas de los datos obtenidos de las canteras seleccionadas, para lo cual se realizó con 25 muestras con diferente humedad por cada cantera. Posteriormente, se relacionó cada muestra con el valor de su coeficiente dieléctrico obtenido según su porcentaje de humedad.

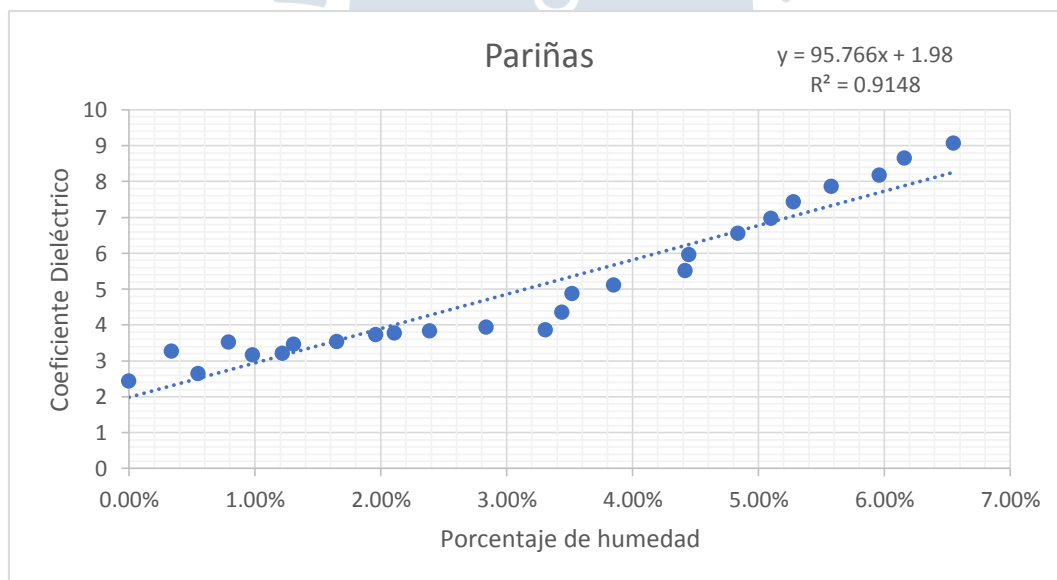


Figura 23. Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Pariñas.
Fuente: Elaboración propia.

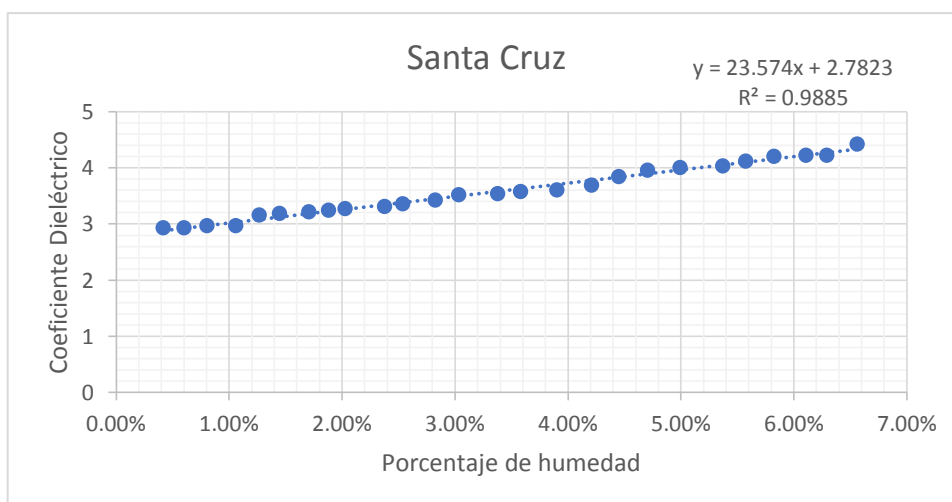


Figura 24. Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Santa Cruz.
Fuente: Elaboración propia.

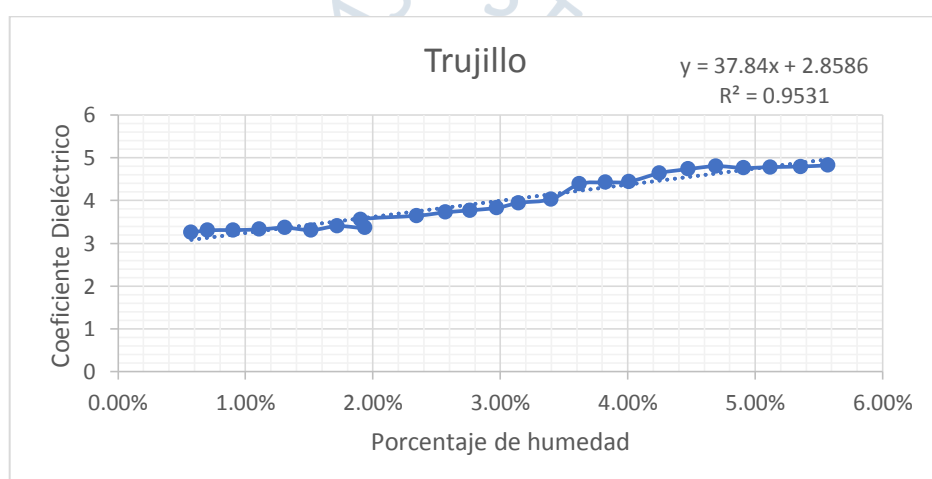


Figura 25. Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Trujillo.
Fuente: Elaboración propia.

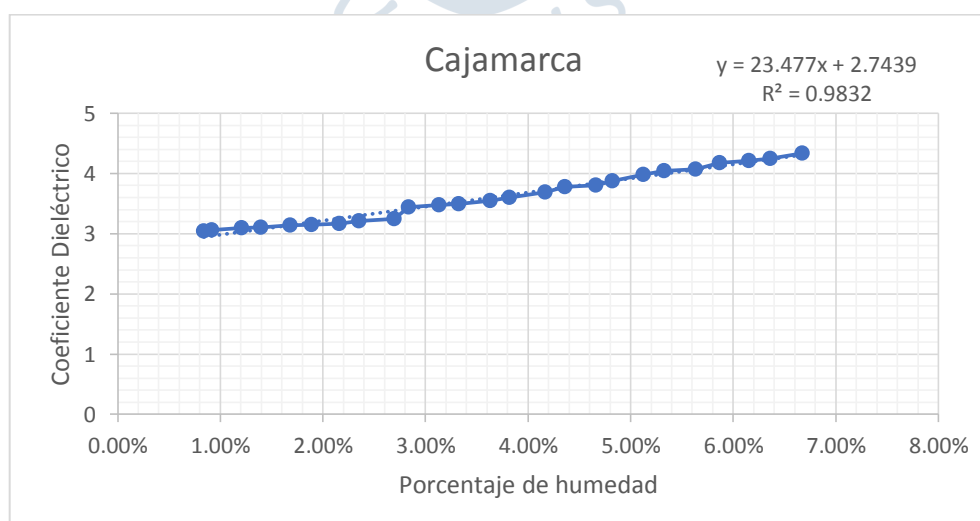


Figura 26. Linealidad representada de las muestras tomadas de la cantera Cajamarca.
Fuente: Elaboración propia.

4.3. Evaluación de la data

Como primer paso fue juntar toda la data de humedad y coeficiente dieléctrico en una sola tabla. Dando valores de C^2 , C, Zona, Humedad. Creando así una matriz, donde se le asigna el valor de 1 cuando los datos son pertenecientes a cierta cantera. (Ver Anexo 1).

Posteriormente se evaluó la Regresión Múltiple tomando como valor dependiente a la variable Humedad y como variables independientes a C^2 , C, ZonaEQ=24, ZonaEQ=3, $C*(ZonaEQ=24)$ y $C*(ZonaEQ=3)$. Donde ZonaEQ sería a que las canteras correspondientes a las zonas 2 y 4 que sean tomadas como una misma, en este caso, serían Santa Cruz y Cajamarca. Se tomó esta decisión ya que, en el gráfico de linealidad de cada cantera se muestra una tendencia positiva que cumplen ambas canteras, de igual forma, evaluando su ecuación lineal representativa se observa que los valores de pendiente son muy aproximados entre sí. Para el caso de ZonaEQ=3, significa que se evaluará como variable independiente de los datos de la cantera de Trujillo, tal que se pueda saber que tanto se aproxima su ecuación lineal representativa con respecto a las canteras de Santa Cruz y Cajamarca.

Definiciones de los siguientes términos estadísticos:

- Residuo: En la estadística se considera residuo a las diferencias encontradas entre los valores de predicción por medio de la recta de regresión y los valores dependiente observados. (Menéndez, 2002)
- Residuos studentizados: Para la definición de “studentizados” proviene de la palabra estandarización. Este término estadístico es empleado para definir si las observaciones están muy alejadas del valor previsto y para que valores se obtuviesen mediciones erróneas o desviados. Es decir, permite localizar los outliers de la relación. (Menéndez, 2002)
- T-Student: Se trata de un modelo de distribución empleado para estimar el valor de la media de una población pequeña, la cual pertenece a una población mayor que sigue una distribución normal donde se desconoce su desviación típica. Se resalta su aplicación debido a que no depende de la media y la varianza de la población sino depende de sus grados de libertad.
- Heterocedasticidad: Se determina cuando la varianza de los errores no es de forma constante y permanente.

- Valor estadístico de Durbin-Watson: Permite determinar la autocorrelación que exista en una regresión lineal o múltiple, con esto se pretende encontrar alguna dependencia de acuerdo al orden de obtención. Con este método se evalúa si los valores en función de las variables independiente son producto de azar o si hay cierta conexión.
- Distancia de Mahalanobis: Empleada para determinar la similitud entre dos variables aleatorias.

Tabla 10. Resultados de Statgraph – Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.

Transformación Cochran-Orcutt aplicada: autocorrelación = 0.494245				
		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
Constante	-0.0351236	0.00681932	-5.1506	0
C ²	-0.00077128	0.00022158	-3.48088	0.0008
C	0.0180262	0.00258387	6.97643	0
ZonaEQ=24	-0.0925634	0.00687988	-13.4542	0
ZonaEQ=3	-0.0498395	0.00750649	-6.63833	0
C*(ZonaEQ=24)	0.0300444	0.00179954	16.6956	0
C*(ZonaEQ=3)	0.0140194	0.00182051	7.70082	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Resultados de Statgraph – Análisis de varianza Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón - F	Valor - P
Modelo	0.0132544	6	0.00220906	300.65	0
Residuo	0.000683334	93	0.00000734767		
Total (Corr.)	0.0139377	99			

Fuente: Elaboración propia.

Arrojando como resultados lo siguiente en la Tabla 12:

Tabla 12. Resultados de Statgraph R-cuadrada Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.

R-Cuadrada	95.10%
R-Cuadrada (ajustada para g.l.)	94.78%
Error estándar del estudio	0.00271066
Error absoluto medio	0.00194356
Estadístico Durbin-Watson	1.85374
Autocorrelación de residuos en retraso 1	0.07006785

Fuente: Elaboración propia.

Para lo cual, el programa muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Humedad y 6 variables independientes. Donde, la ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned} \text{Humedad} &= -0.0351236 - 0.000771278 * C^2 + 0.0180262 * C - 0.0925634 * \\ \text{ZONAEQ} &= 24 - 0.0498305 * \text{ZONAEQ} = 3 + 0.0300444 * C * (\text{ZONAEQ} = \\ &24) + 0.0140194 * C * (\text{ZONAEQ} = 3) \end{aligned}$$

Y puesto que el valor $-P$ en la tabla es menor a 0.05 para la variable C^2 , se tendrá una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%. Posteriormente, se analizan los residuos atípicos los cuales enlista todas las observaciones que tienen residuos Estudentizados mayores a 2 en valor absoluto. Estos miden cuantas desviaciones estándar se desvía cada valor observado de Humedad del modelo ajustado, utilizando todos los datos excepto dicha observación. Para este caso se puede observar, que hay 5 residuos Estudentizados mayores que 2 y 2 mayores que 3. Por lo tanto, se debe examinar con mayor detención aquellos que sean mayores a 3, en caso sea necesario eliminarlos de la data recogida.

Tabla 13. Residuos atípicos - Canteras Santa Cruz, Cajamarca y Trujillo.

		Y		Residuo
Fila	Y	Predicha	Residuo	Estudentizados
3	0.02837	0.0217491	0.00457482	2.79
5	0.00791	0.0179796	-0.0108878	-4.20
13	0.0331	0.0235583	0.0102308	3.90
67	0.03621	0.0419276	-0.00460114	-2.25
77	0.0084	0.0135478	-0.0031368	-2.20

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, para analizar todos los puntos influyentes, se hará a aquellos valores que tengan una influencia mayor que 3 veces la de un punto promedio de los datos, ó que tienen un valor inusual de DFITS.

- Valor de influencia: Es un valor estadístico que mide cómo influye cada observación en la determinación de los coeficientes del modelo estimado.
- DFITS: Es un valor estadístico el cual mide de forma cuantitativa el cambio de los coeficientes estimados si la observación se eliminara del conjunto de datos.

Tabla 14. Puntos influyentes. Influencia media de un solo punto 0.07.

Fila	Influencia	Distancia de Mahalanobis	DFITS
2	0.352492	52.3597	0.616904
3	0.177983	20.2291	1.29853
5	0.0759213	7.06167	-1.20246
6	0.297822	40.5758	1.13098
13	0.0617174	5.45624	1.00076
24	0.215943	26.001	-0.215234
25	0.299845	40.979	0.391674
26	0.317209	44.5386	-0.833389
51	0.0987731	9.75076	-0.619162
52	0.351456	52.1177	-1.12609
67	0.0828247	7.8599	-0.676165
77	0.221199	26.8445	-1.17018

Fuente: Elaboración propia.

Para este caso, un punto promedio de los datos tendría de valor de influencia igual a 0.07. De la lista hay 7 puntos con más 3 veces el valor de influencia promedio, 2 con más de 5 veces. Por lo tanto, se requiere examinar de forma detallada aquellos que poseen más de 5 veces el valor de influencia promedio para determinar que tanto cambiaría el modelo si estos fueran eliminados.

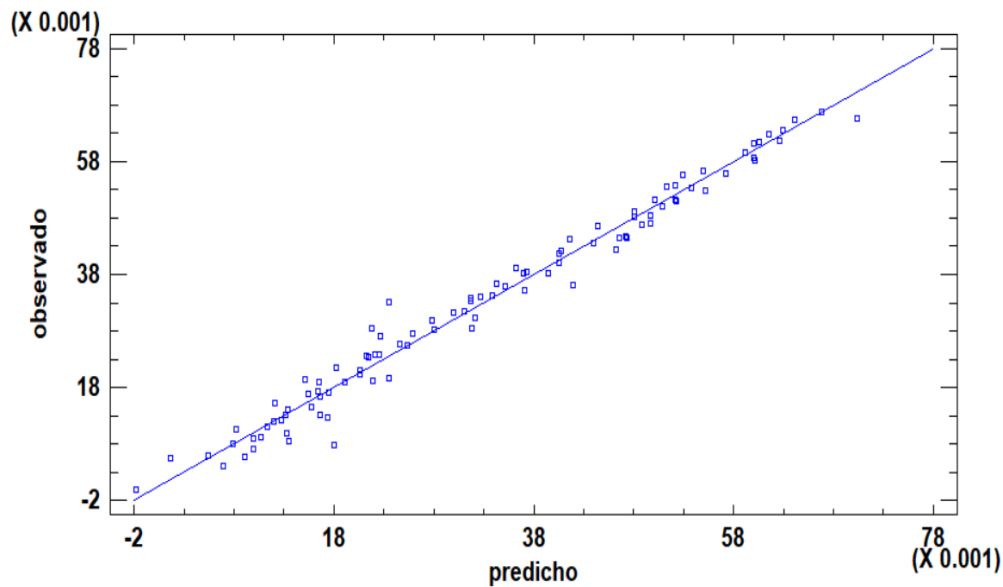


Figura 27. Humedad.
Fuente: Elaboración propia.

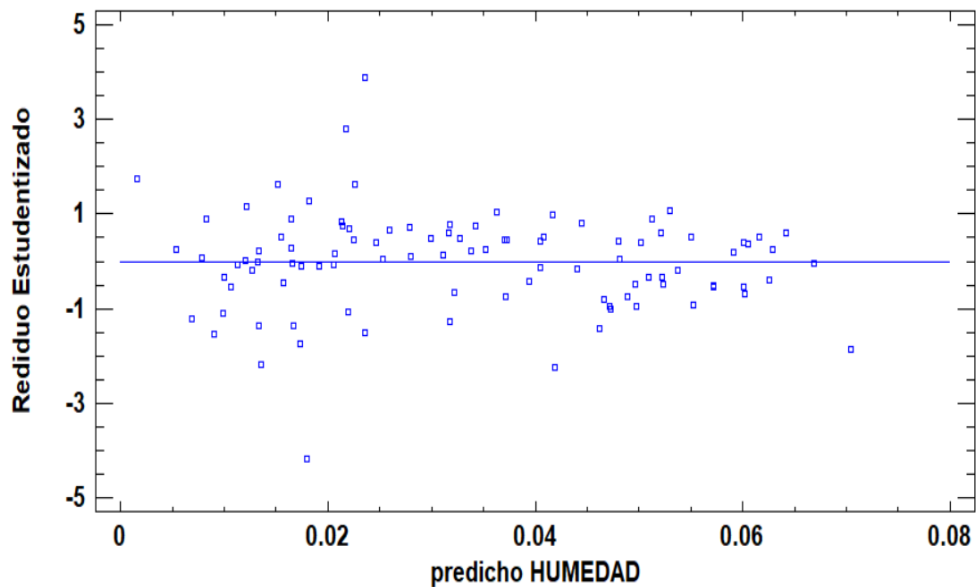


Figura 28. Residuos.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora, para validar lo anterior propuesto en Zona EQ=24, donde se muestra como hipótesis que la ecuación de predicción lineal para las canteras de Santa Cruz y Cajamarca puede ser tomadas como iguales, se deberá de hacer un estudio con dos canteras diferentes. Para esto, se procederá a evaluar de igual forma los datos de las canteras Pariñas y Trujillo. Tomando como variable dependiente a Humedad y variables independientes a C^2 , C, Zona Eq =1, ZonaEq= 3. Donde, ZonaEq=1, serán los datos referidos a la cantera Pariñas, y ZonaEq=3 son los datos referidos a la cantera Trujillo.

Tabla 15. Resultados de Statgraph - Canteras Pariñas y Trujillo.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-0.132253	0.00458755	-28.8288	0
C^2	-0.00127798	0.00020417	-6.25955	0
C	0.0512809	0.00180975	28.3359	0
ZONA EQ=1	0.0804017	0.00512096	15.7005	0
ZONA EQ=3	0.0412035	0.00580379	7.09941	0
$C^*(ZONA EQ=1)$	-0.0272172	0.00136855	-19.8876	0
$C^*(ZONA EQ=3)$	-0.0157562	0.00151267	-10.4162	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultados de Statgraph – Análisis de varianza - - Canteras Pariñas y Trujillo.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0323323	6	0.00538871	520.44	0
Residuo	0.0009733	94	1.0354E-05		
Total (Corr.)	0.0333056	100			

Fuente: Elaboración propia.

Arrojando como resultados lo siguiente:

Tabla 17. Resultados obtenidos de Statgraph – Canteras Pariñas y Trujillo.

R-Cuadrada	97.077%
R-Cuadrada (ajustada para g.l.)	96.8911%
Error estándar del estudio	0.0032178
Error absoluto medio	0.00237447
Estadístico Durbin-Watson	1.12197
Autocorrelación de residuos en retraso 1	0.391551

Fuente: Elaboración propia.

Consecuentemente, para validar la hipótesis inicial en que los datos de las canteras de Cajamarca y Santa Cruz pueden tomarse como aproximados o iguales, se sigue lo siguiente:

Se analiza la variación de suma de cuadrados residual, el cual consiste en la resta de los dos valores hallados previamente para cada caso.

- $\text{Var SCR} = 0.00003974$

Tomando como restricciones = 2.

Suma de cuadrados:

- $\text{SCRc} = 0.000933502$

Como grados de libertad nos dice el resultado:

- $\text{G.L.} = 92$

$$F = (\text{Var SCR}/r) * (\text{Var SCR}/\text{G.L.}) = 1.960921348$$

$$F^*_{r, N-1-I} = F^*_{2, 92} \rightarrow F^* = 3.09543275$$

Donde, si $F > F^*$, se rechaza la hipótesis. Y si, $F < F^*$, se acepta la hipótesis.

Por lo tanto, con los valores obtenidos, se acepta la hipótesis que los datos de valores de humedad vs Coeficiente dieléctrico entre las canteras de Cajamarca y Santa Cruz son aproximados entre sí y se les puede considerar como una sola data para obtener su ecuación de predicción lineal.

Con esto, al eliminar aquellos valores que eran mayor a 3 de los valores de Residuos atípicos Estudentizados, se obtiene la siguiente ecuación arrojada por el programa Statgraphics X64, la cual representa la ecuación de predicción del valor de humedad conociendo el valor del coeficiente dieléctrico.

$$\begin{aligned} \text{HUMEDAD} = & -0.127753 - 0.000773279 \cdot C^2 + 0.0480964 \cdot C + \quad (4.9) \\ & 0.0925592 \cdot \text{ZONA EQ=1} + 0.0428462 \cdot \text{ZONA EQ=3} - \\ & 0.0300455 \cdot C \cdot (\text{ZONA EQ=1}) - 0.0160545 \cdot C \cdot (\text{ZONA EQ=3}) \end{aligned}$$

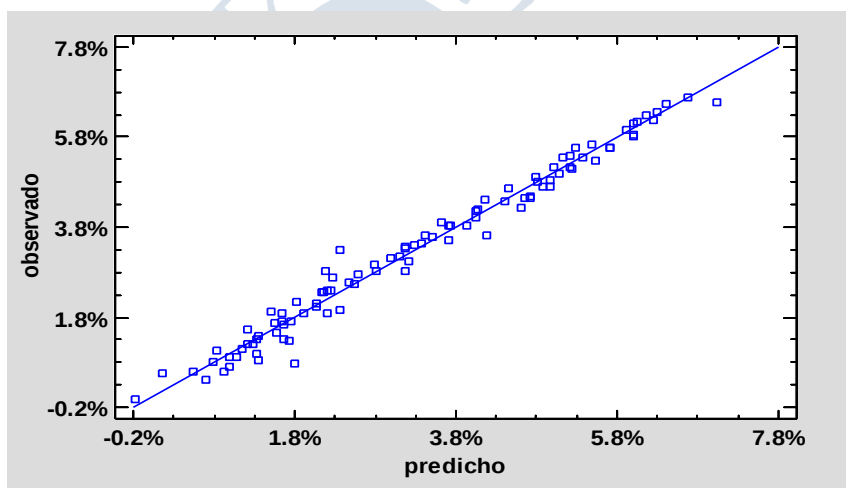


Figura 29. Humedad – Canteras Cajamarca y Santa Cruz.
Fuente: Elaboración propia.

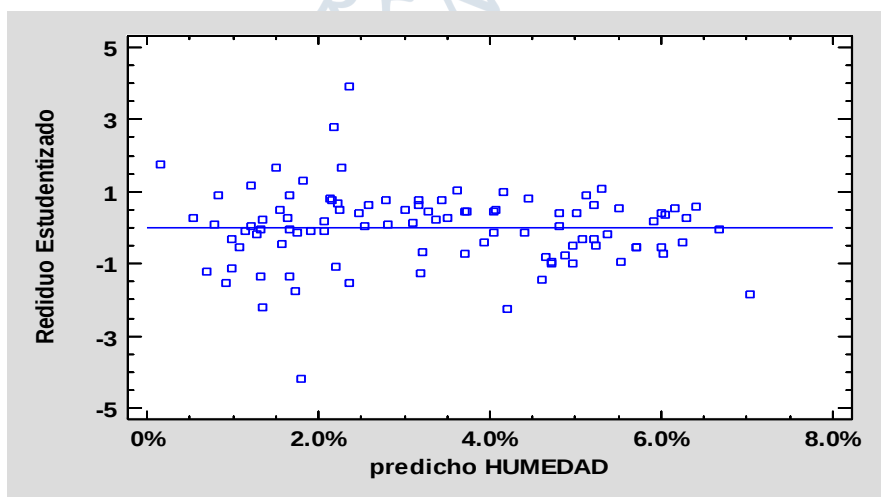


Figura 30. Residuos – Canteras Cajamarca y Santa Cruz.
Fuente: Elaboración propia.

- **Puntos atípicos:** Son observaciones que tienen una desviación muy alta (residuo) entre el valor observado por humedad y el valor estimado a partir del modelo. Se debe procurar no considerar en el modelo las observaciones que tienen un residuo estudentizado superior al valor de t student crítico para una confiabilidad de 95%.

$$\text{Residuo estudentizado} > \left| t_{N-I-2}^{\alpha/2} \right| \quad (4.10)$$

$$t_{91}^{0.025} \approx 1.98 \quad (4.11)$$

Tabla 18. Residuos atípicos - - Canteras Pariñas y Trujillo.

		Y		Residuo
Fila	Y	Predicha	Residuo	Estudentizado
3	0.0284	0.0217579	0.0066421	2.80
5	0.0079	0.0179607	-0.0100607	-4.19
13	0.0331	0.0235557	0.00954431	3.90
67	0.0362	0.0419194	-0.0057194	-2.25
77	0.0084	0.0135339	-0.00513391	-2.19

Fuente: Elaboración propia.

Luego de no considerar los primeros residuos atípicos identificados en la construcción del modelo, volvemos a calcular los coeficientes del modelo de regresión lineal e identificamos nuevos residuos atípicos. Luego repetimos el proceso hasta no tener ningún residuo atípico.

- **Puntos influyentes a posteriori:** Estos puntos son evaluados al mismo tiempo que los residuos atípicos y siguiendo un proceso cíclico hasta no tener puntos influyentes a posteriori.

Estos puntos son muy peligrosos para la estimación de los coeficientes del modelo porque su presencia o ausencia puede alterar la dirección de la relación entre una variable independiente y la variable dependiente de interés.

Para identificar los puntos influyentes a posteriori utilizamos el parámetro DFIT. Si su valor superar el t student crítico para una confiabilidad de 95% entonces tenemos un punto influyente a posteriori.

$$DFIT > \left| t_{N-I-1}^{\alpha/2} \right| \quad (4.12)$$

$$t_{N-I-1}^{\alpha/2} \approx 1.98 \quad (4.13)$$

En un primer análisis no se identificaron puntos influyentes a posteriori. La siguiente tabla muestra las observaciones potenciales que podrían ser puntos influyentes a posteriori, pero por su valor de DFIT no consideradas como tal.

Tabla 19. Resultados de puntos atípicos - - Canteras Pariñas y Trujillo.

Observación	Influencia	DFITS
2	0.352465	0.613788
3	0.177774	1.30143
5	0.0759118	-1.20061
6	0.297758	1.13493
13	0.0617154	1.00066
24	0.216029	-0.21425
25	0.300014	0.393619
26	0.316764	-0.831143
51	0.0987689	-0.616858
52	0.351032	-1.12123
67	0.0827881	-0.675965
77	0.220854	-1.165

Fuente: Elaboración propia.

Durante la evaluación de puntos atípicos del anterior análisis debemos dar seguimiento en la identificación de nuevos puntos influyentes a posteriori. La tabla siguiente muestra los resultados finales y no se han encontrado puntos influyentes a posteriori.

Tabla 20. Puntos influyentes - - Canteras Pariñas y Trujillo

Fila	Influencia	DFITS
3	0.633828	-0.266056
21	0.566365	-1.66431
43	0.816192	-0.678256
50	0.138219	-0.788737
51	0.106686	-0.673575
58	0.431545	-1.58811

Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar el análisis de residuos se concluye que no se deben considerar en la construcción del modelo las siguientes observaciones:

Tabla 21. Data de análisis en Statgraphs - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.

Nº	Coefficiente dieléctrico (C)	Humedad	ZONA: 1=Pariñas, 2=Santa Cruz, 3=Trujillo, 4=Cajamarca
1	3.259	0.34%	1
3	3.929	2.84%	1
5	3.522	0.79%	1
13	3.852	3.31%	1
14	4.355	3.44%	1
26	2.932	0.42%	2
30	3.152	1.27%	2
31	3.182	1.45%	2
51	4.421	6.57%	2
52	3.252	0.58%	3
53	3.305	0.70%	3
54	3.31	0.91%	3
55	3.326	1.11%	3
56	3.366	1.31%	3
57	3.31	1.52%	3
58	3.405	1.72%	3
60	3.56	1.91%	3
67	4.388	3.62%	3
68	4.423	3.83%	3
77	3.045	0.84%	4
78	3.061	0.92%	4
79	3.091	1.21%	4
80	3.104	1.40%	4
86	3.439	2.84%	4

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Evaluación de la normalidad de los residuos

En este punto evaluamos la normalidad de los residuos utilizando el papel probabilístico. Es importante evaluar la normalidad de los residuos porque en la construcción del modelo se asume que las variables del modelo se aproximan a una distribución normal.

Los resultados no muestran observaciones fuera del intervalo construido y el punto 0 de los residuos coincide con el 50% de los datos, entonces los residuos se aproximan a una distribución normal de media 0.

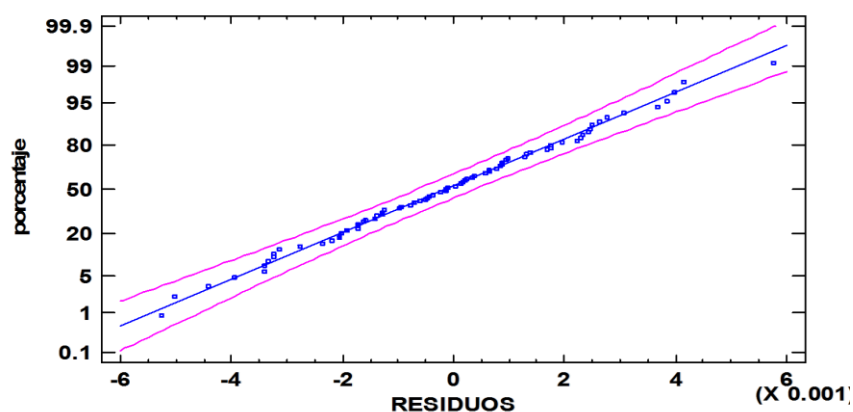


Figura 31. Probabilidad Normal con 95% límites.
Fuente: Elaboración propia.

4.5. Evaluación de la heterocedasticidad - variables como dependientes.

En la construcción del modelo de regresión lineal se asume que la varianza de la variable dependiente no es influenciada por alguna variable independiente.

Para estimar este efecto utilizamos el método de Rafael Romero realizando una regresión lineal de los residuos al cuadro sobre las variables independientes.

Los resultados no muestran variables independientes con un valor de coeficiente significativo ($p\text{-value} < 0.05$), concluyendo que la varianza de la variable dependiente no es influenciada por alguna variable independiente del modelo.

Tabla 22. Regresión múltiple – Residuos C^2 - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.

Variable dependiente:	Residuos ²
Variables independientes	C
	C^2
	Zona=1
	Zona=2
	Zona=3
Número de observaciones	77

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Resultados de Statgraph - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
Constante	0.00000301174	0.0000100062	0.300987	0.7643
C	8.74317E-7	0.00000397842	0.219765	0.8267
C^2	-9.26269E-8	3.58313E-7	-0.258508	0.7968
Zona=1	8.75351E-7	0.00000245484	0.356581	0.7225
Zona=2	-0.00000176159	0.00000211675	-0.832216	0.4081
Zona=3	0.00000246078	0.00000242894	1.01311	0.3144

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Análisis de varianza - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1.7571E-10	5	3.5142E-11	0.75	0.5862
Residuo	3.31093E-9	71	4.66328E-11		
Total (Corr.)	3.48664E-9	76			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Resultados de Statgraph - - Canteras Pariñas, Santa Cruz y Trujillo.

R-cuadrada	5.03952%
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	0
Error estándar del est.	0.00000682882
Error absoluto medio	0.00000479248
Estadístico Durbin-Watson	1.36331
	P=0.0003
Autocorrelación de residuos en retraso 1	0.309614

Fuente: Elaboración propia

4.6. Evaluación de la heterocedasticidad – variables como independientes.

Otra hipótesis del modelo es asumir que los residuos del modelo son independientes. Es decir, en este punto se debe evaluar si los resultados de una observación se van influenciados por los resultados de una observación hecha un instante anterior o en momentos anteriores.

El estadístico de Durbin-Watson sirve para evaluar la correlación entre los mismos residuos y valores cercanos a 2 reflejan la independencia de los residuos.

Los resultados obtenidos muestran un valor del Estadístico Durbin-Watson de 0.973276. Concluyendo que existe una correlación entre residuos. En la Figura 32 de autocorrelación parcial se muestra que la relación entre residuos es significativa cuando se da en un retraso de una unidad.

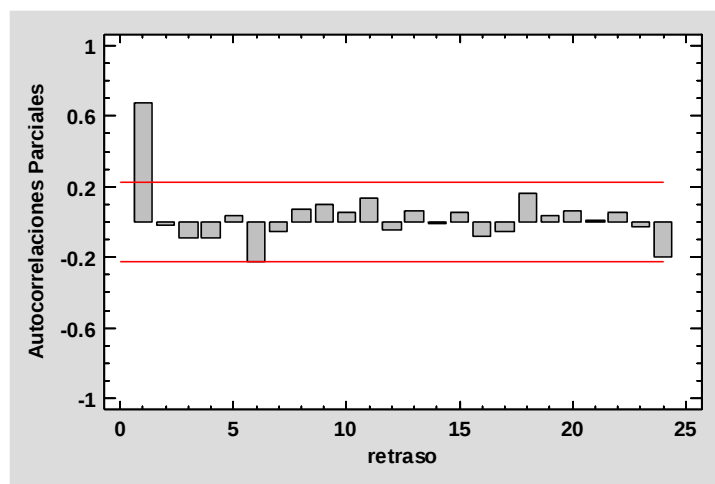


Figura 32. Autocorrelaciones parciales estimadas para residuos.
Fuente: Elaboración propia.

Para corregir este problema utilizamos el procedimiento iterativo de Cochrane-Orcutt para eliminar correlación entre residuos.

Los resultados muestran un valor del estadístico de Durbin-Watson de 1.91577:

Tabla 26. Resultados con valor de Durbin-Watson corregido - Humedad.

Variable dependiente	Humedad
Variables independientes	C
	C^2
	Zona EQ=24
	Zona EQ=3
	$C^*(\text{Zona EQ}=24)$
	$C^*(\text{Zona EQ}=3)$
Número de observaciones	76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Transformación Cochrane-Orcutt aplicada: autocorrelación=0.646848

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-0.034758	0.00594385	-5.84773	0.0000
C	0.0173928	0.0020498	8.48513	0.0000
C^2	-0.000693778	0.000169703	-4.08819	0.0001
ZONA EQ=24	-0.0865344	0.00675212	-12.8159	0.0000
ZONA EQ=3	-0.0346141	0.00772343	-4.4817	0.0000
C*(ZONA EQ=24)	0.0287453	0.00168456	17.064	0.0000
C*(ZONA EQ=3)	0.0110606	0.0017476	6.32899	0.0000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Análisis de varianza tras resultados con valor de Durbin-Watson corregido.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.00755077	6	0.00125846	402.67	0.0000
Residuo	0.000215647	69	0.00000312532		
Total (Corr.)	0.00776642	75			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Regresión múltiple con variable dependiente: humedad.

R-cuadrada	97.22330%
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	96.9819%
Error estándar del est.	0.00176786
Error absoluto medio	0.00141418
Estadístico Durbin-Watson	1.91577
Autocorrelación de residuos en retraso 1	0.0372541

Fuente: Elaboración propia.

Resumen de validación

Luego de verificar la existencia de datos atípicos y puntos influyentes a posteriori, el cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad, y luego corregir la falta de independencia de los residuos es que finalmente encontramos unos coeficientes del modelo con una mejor estimación de sus valores.

Tabla 30. Coeficientes del modelo.

Parámetro	Estimación
Constante	-0.034758
C	0.0173928
C^2	-0.000693778
Zona EQ=24	-0.0865344
Zona EQ=3	-0.0346141
C*(Zona EQ=24)	0.0287453
C*(Zona EQ=3)	0.0110606

Fuente: Elaboración propia.

Donde el valor esperado de humedad está relacionado al coeficiente dieléctrico (C), existiendo una relación incremental entre ambos que irá disminuyendo conforme aumente el valor del coeficiente dieléctrico.

Con respecto a las zonas de procedencia:

- La zona de Santa cruz y Cajamarca tienen el mismo comportamiento en la relación entre el coeficiente dieléctrico y la humedad.
- Y existe un comportamiento diferente entre las zonas de Pariñas, Trujillo con la zona de Santa Cruz y Cajamarca. Es decir, la curva de relación entre el coeficiente dieléctrico y humedad será diferente dependiendo de la zona de procedencia.

La ecuación que resume la relación es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 Humedad = & -0.034758 + 0.0173928 * C - 0.000693778 * C^2 - 0.0865344 \\
 & * (ZONAEQ = 24) - 0.0346141 * (ZONAEQ = 3) + 0.0287453 \\
 & * C * (ZONAEQ = 24) + 0.0110606 * C * (ZONAEQ = 3)
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Conclusiones

- La medición de la humedad en un material se basa en la propagación de ondas de radiofrecuencias a través de las sustancias. Esta metodología es innovadora al representar una solución a los tiempos muertos que hay en la línea de producción.
- Las ondas electromagnéticas logran transportar energía o información de un punto a otro sin necesidad de un medio de propagación, ya que logran transmitirse en el vacío.
- Las propiedades dieléctricas de los materiales son: permitividad, permeabilidad y conductividad. Las cuales varían de acuerdo con el comportamiento del campo electromagnético cuando están en un medio diferente al vacío.
- El agua pura es considerada un aislante, sin embargo, no sucede lo mismo con el agua salada o con cualquier tipo de sustancia que esté dentro ya que generará que el agua se comporte como un conductor. Incluso al ser expuesta la molécula de agua frente a un campo electromagnético, esta es capaz de absorber energía, ya sea eléctrica o magnética.
- La constante dieléctrica puede verse afectada al momento de la medición por factores externos como la temperatura, humedad en el ambiente y la cantidad del material empleado para la medición. Por ello, es recomendable que la cantidad de material a medir sea el mismo en las demás muestras, tratando de que posea el mismo volumen y peso que la primera.
- En la actualidad, la industria peruana es muy estricta con el control de calidad de los productos por tanto se requiere hacer un exhaustivo seguimiento a la calidad del mismo. Sin embargo, en productos donde sea muy importante el contenido de humedad, la determinación del porcentaje de humedad por métodos tradicionales como el de secado en horno genera tiempos muertos en la producción y consecuentemente pérdidas económicas. Ante esto, métodos de detección de humedad

por señales de microondas llegan a solucionar esto al requerir menos tiempo llegando a controlarse incluso en tiempo real, además de que en algunos métodos no es necesaria la interacción con el material, es decir, no son métodos destructivos en algunos casos.

- El sistema de Wavetester puede determinar el porcentaje de humedad relacionándolo a su constante dieléctrica en tan solo 5 segundos, comparado con el método tradicional que requiere 1 hora como mínimo de secado en horno (para queque de harina de pescado), representa una solución a los tiempos muertos en la producción mejorando los costos de la empresa.
- La medición en vacío es necesaria para calibrar el sistema en varios métodos que emplean medición mediante antenas, esto es debido a que las reflexiones generan datos erróneos del valor de la constante dieléctrica del material que deben ser almacenados en el sistema para que pueda considerarlos el analizador de variables vectoriales. Obteniendo menos reflexiones se logra una curva de calibración con menos puntos errados y por ende se tendrá un valor de constante dieléctrico más exacto.
- El análisis estadístico de las muestras de cada cantera fue posible gracias al Software Statgraphics X64, el cual permitió realizar un ajuste lineal con las muestras, así se ha obtenido un modelo matemático para aproximar la relación de dependencia entre la variable dependiente Humedad y las independientes como Coeficiente dieléctrico y Zona de Cantera. Dicho modelo matemático, indica su variabilidad de acuerdo al origen de la cantera. Del mismo modo, se logró verificar que no existen resultados de humedad aleatorios conforme incrementa el valor del coeficiente dieléctrico.
- Como resultado de dicho análisis estadístico, no solo se ha obtenido un modelo matemático que logre predecir o calcular el porcentaje de humedad, si no, además se mostró cierta proximidad en los valores de la relación entre humedad y coeficiente dieléctrico en las canteras de Cajamarca y Santa Cruz, donde según su ecuación y valor de R^2 , la pendiente de ambas muestras eran muy similares, siendo la ecuación para Santa Cruz: $Y=23.574x + 2.783$ y valor de $R^2 = 0.9885$, mientras que la ecuación de Cajamarca fue: $Y= 23.477x + 2.7439$ y el valor de $R^2 = 0.9832$. Claramente se nota una proximidad en la pendiente de sus líneas de tendencia, y se logró verificar en el análisis estadístico. Por lo tanto, los datos de ambas canteras se

unificaron en una sola muestra y así obtener un modelo matemático más consolidado al tener un mayor universo de datos.

- Se encontraron valores diferentes entre sí en la cantera de Pariñas, esto puede ser debido a su muy variada granulometría, composición química o factores adversos no controlables. Sin embargo, sería adecuado realizar en el futuro un estudio que relacione la granulometría, composición química y coeficiente dieléctrico con la humedad.



Referencias bibliográficas

- Agilent Technologies. (2006). *Basics of measuring the dielectric properties of materials*. U.S.A.
- Cheng, D. K. (1998). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Mexico: Addison Wesley.
- Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI. (2002). *Norma Técnica Peruana NTP 400.021 2002*. Lima, Perú.
- Durand, K. (2014). *Aplicación del sistema Wavetester para la medición de humedad en sólidos: instalación, operación y mantenimiento*. Piura: Universidad de Piura.
- Herrzeich. (14 de abril de 2009). *Blog de Herrzeich*. Obtenido de <https://herrzeich.wordpress.com/2009/04/14/principios-de-ondas-electromagneticas/>
- Jarvis, J. B. (1990). *Transmission/Reflection and short circuit line permittivity measurements*. Boulder, Colorado: NIST.
- Jorge C. Diaz, L. B. (2003). Caracterización de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construcción de edificaciones. *Universidad de Los Andes*.
- Komarov, V. V. (2012). *Dielectric and thermal properties of materials at microwave frequencies*. Boston: Artech House.
- Lozano Teruel, J. A. (enero de 2012). *Ciencia y salud: La estructura del agua*. Obtenido de <http://cienciaysalud.laverdad.es/la-alimentacion/la-nutricion-ciencia/la-estructura-agua-article.html>
- Meet. (2018). *meet Electronic Engineering*. Recuperado el 28 de junio de 2018, de <http://www.meet-electronics.com/products/wavetester>

Menéndez, F. (2002). *Residuos, Residuos studentizados y valores DFFIT*. Universidad de la República.

Rodriguez-Arismendiz, R. (2017). *Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios*. Piura: Universidad de Piura.

Silva Belletti, M. E. (2016). *Ondas electromagnéticas*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.

UMACON. (17 de enero de 2017). *UMACON*. Obtenido de <http://www.umacon.com/noticia.php/es/principales-10-aplicaciones-y-tipos-de-hormigon/428>

UNACEM. (2016). Guía práctica: Fabricación de hormigones de alta calidad. *UNACEM*, 6 - 8.



Anexos



Anexo A. Data recolectada proveniente de la cantera Pariñas, Santa Cruz, Trujillo y Cajamarca.

Tabla A1. Cantera Pariñas.

Lugar:	Muestra:	Agua	Peso inicial: [gr.]	Peso final: [gr.]	Nivel de Humedad: [%]	Coefficiente dieléctrico pre- secado:
Cantera 1: Pariñas	Origen	6.7	2000	1993.3	0.34%	3.259
	Muestra Seca		1993.3	1993.3	0%	2.431
	Humedad #1	56	2000	1944	2.84%	3.929
	Humedad #2	38.62	2000	1961.38	1.96%	3.722
	Humedad #3	15.56	2000	1984.44	0.79%	3.522
	Humedad #4	10.84	2000	1989.16	0.55%	2.632
	Humedad #5	19.31	2000	1980.69	0.98%	3.154
	Humedad #6	23.65	2000	1976.35	1.22%	3.211
	Humedad #7	25.81	2000	1974.19	1.31%	3.455
	Humedad #8	32.51	2000	1967.49	1.65%	3.538
	Humedad #9	41.58	2000	1958.42	2.11%	3.771
	Humedad #10	47.1	2000	1952.9	2.39%	3.822
	Humedad #11	65.22	2000	1934.78	3.31%	3.852
	Humedad #12	67.78	2000	1932.22	3.44%	4.355
	Humedad #13	69.36	2000	1930.64	3.52%	4.865
	Humedad #14	75.87	2000	1924.13	3.85%	5.109
	Humedad #15	87.1	2000	1912.9	4.42%	5.512
	Humedad 16	87.69	2000	1912.31	4.45%	5.962
	Humedad 17	95.38	2000	1904.62	4.84%	6.549
	Humedad 18	100.5	2000	1899.5	5.10%	6.965
	Humedad 19	104.05	2000	1895.95	5.28%	7.426
	Humedad 20	109.96	2000	1890.04	5.58%	7.853
	Humedad 21	117.45	2000	1882.55	5.96%	8.165
	Humedad 22	121.39	2000	1878.61	6.16%	8.652
	Humedad 23	129.07	2000	1870.93	6.55%	9.059

Fuente: Elaboración propia

Tabla A2. Cantera Santa Cruz.

Lugar:	Muestra:	agua	Peso inicial	Peso final: [gr.]	Nivel de Humedad: [%]	Coefficiente dieléctrico pre- secado:
Cantera 2: Santa Cruz	Origen	3.94	935	931.26	0.42%	2.932
	Humedad #1	5.63	935	929.37	0.61%	2.932
	Humedad #2	7.50	935	927.50	0.81%	2.967
	Humedad #3	9.85	935	925.15	1.06%	2.97
	Humedad #4	11.73	935	923.27	1.27%	3.152
	Humedad #5	13.35	935	921.60	1.45%	3.182
	Humedad #6	15.70	935	919.25	1.71%	3.215
	Humedad #7	17.41	935	917.69	1.89%	3.241
	Humedad #8	18.63	935	916.37	2.03%	3.267
	Humedad #9	21.61	935	913.26	2.38%	3.309
	Humedad #10	23.13	935	911.80	2.54%	3.354
	Humedad #11	25.94	935	909.26	2.83%	3.421
	Humedad #12	27.96	935	907.41	3.04%	3.518
	Humedad #13	30.58	935	904.39	3.38%	3.532
	Humedad #14	32.35	935	902.62	3.59%	3.579
	Humedad #15	35.18	935	899.82	3.91%	3.605
	Humedad #16	37.81	935	897.19	4.21%	3.686
	Humedad #17	39.87	935	895.10	4.46%	3.845
	Humedad #18	42.04	935	892.92	4.71%	3.953
	Humedad #19	44.46	935	890.47	5.00%	4.005
	Humedad #20	47.47	935	887.29	5.38%	4.026
	Humedad #21	49.37	935	885.58	5.58%	4.113
	Humedad #22	51.50	935	883.50	5.83%	4.203
	Humedad #23	53.86	935	881.14	6.11%	4.216
	Humedad #24	55.43	935	879.62	6.30%	4.225
	Humedad #25	57.70	935	877.39	6.57%	4.421

Fuente: Elaboración propia

Tabla A3. Cantera Trujillo

Lugar:	Muestra:	agua [ml]	Peso inicial	Peso final: [gr.]	Nivel de Humedad: [%]	Coefficiente dieléctrico pre-secado:
Trujillo	Original	7.75	1350	1344.63	0.58%	3.252
	Humedad 1	9.42	1350	1340.55	0.70%	3.305
	Humedad 2	12.11	1350	1337.89	0.91%	3.31
	Humedad 3	14.8	1350	1335.18	1.11%	3.326
	Humedad 4	17.49	1350	1332.52	1.31%	3.366
	Humedad 5	20.18	1350	1329.82	1.52%	3.31
	Humedad 6	22.87	1350	1327.15	1.72%	3.405
	Humedad 7	25.56	1350	1324.33	1.94%	3.365
	Humedad 8	28.25	1350	1324.72	1.91%	3.56
	Humedad 9	30.94	1350	1319.06	2.35%	3.645
	Humedad 10	33.63	1350	1316.17	2.57%	3.725
	Humedad 11	36.32	1350	1313.68	2.76%	3.771
	Humedad 12	39.01	1350	1310.99	2.98%	3.831
	Humedad 13	41.7	1350	1308.82	3.15%	3.9455
	Humedad 14	44.39	1350	1305.61	3.40%	4.033
	Humedad 15	47.08	1350	1302.82	3.62%	4.388
	Humedad 16	49.77	1350	1300.23	3.83%	4.423
	Humedad 17	52.46	1350	1297.94	4.01%	4.442
	Humedad 18	55.15	1350	1294.95	4.25%	4.643
	Humedad 19	57.84	1350	1292.16	4.48%	4.736
	Humedad 20	60.53	1350	1289.47	4.69%	4.804
	Humedad 21	63.22	1350	1286.78	4.91%	4.761
	Humedad 22	65.91	1350	1284.23	5.12%	4.782
	Humedad 23	68.6	1350	1281.35	5.36%	4.796
	Humedad 24	71.29	1350	1278.73	5.57%	4.823

Fuente: Elaboración propia

Tabla A4. Cantera Cajamarca

Lugar:	Muestra:	agua [ml]	Peso inicial	Peso final: [gr.]	Nivel de Humedad: [%]	Coefficiente dieléctrico pre- secado:
Cajamarca	Original	8.50	1100	1094.5	0.84%	3.045
	Humedad 1	10.12	1100	1089.88	0.92%	3.061
	Humedad 2	13.16	1100	1086.99	1.21%	3.091
	Humedad 3	15.17	1100	1084.83	1.40%	3.104
	Humedad 4	18.22	1100	1081.78	1.68%	3.137
	Humedad 5	20.24	1100	1079.60	1.89%	3.145
	Humedad 6	23.28	1100	1076.72	2.16%	3.164
	Humedad 7	25.30	1100	1074.70	2.35%	3.214
	Humedad 8	28.33	1100	1071.10	2.70%	3.248
	Humedad 9	30.36	1100	1069.64	2.84%	3.439
	Humedad 10	33.39	1100	1066.61	3.13%	3.475
	Humedad 11	35.42	1100	1064.58	3.33%	3.498
	Humedad 12	38.45	1100	1061.45	3.63%	3.548
	Humedad 13	40.48	1100	1059.52	3.82%	3.602
	Humedad 14	43.51	1100	1056.00	4.17%	3.689
	Humedad 15	45.54	1100	1054.06	4.36%	3.774
	Humedad 16	48.57	1100	1051.03	4.66%	3.804
	Humedad 17	50.59	1100	1049.41	4.82%	3.871
	Humedad 18	53.63	1100	1046.37	5.13%	3.982
	Humedad 19	55.65	1100	1044.35	5.33%	4.039
	Humedad 20	58.69	1100	1041.31	5.64%	4.072
	Humedad 21	60.71	1100	1039.05	5.87%	4.174
	Humedad 22	63.75	1100	1036.25	6.15%	4.209
	Humedad 23	65.77	1100	1034.23	6.36%	4.249
	Humedad 24	68.81	1100	1031.19	6.67%	4.339

Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Granulometría obtenida de las canteras: Pariñas, Santa Cruz, Trujillo y Cajamarca

Tabla B1. Cantera Pariñas

Abertura mm	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
62.7	2 1/2 "				
50.8	2 "				
38.1	1 1/2 "				
24.4	1 "				
19.1	3/4 "				
12.7	1/2 "				
9.5	3/8 "	0.00	0.00	0.00	100
4.76	4	10.60	1.94	1.94	98
2.38	8	78.20	14.30	16.23	84
1.19	16	124.00	22.67	38.90	61
0.59	30	148.40	27.13	66.03	34
0.297	50	119.50	21.85	87.88	12
0.149	100	46.00	8.41	96.29	4
0.074	200	9.60	1.76	98.04	2
	Fondo	10.20	1.86		
	Total	546.50			
	Peso inicial	547.00			
	Pérdida	0.50			

Fuente: Elaboración propia

Tabla B2. Cantera Santa Cruz

Abertura mm	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
62.7	2 1/2 "				
50.8	2 "				
38.1	1 1/2 "				
24.4	1 "				
19.1	3/4 "				
12.7	1/2 "				
9.5	3/8 "				
4.76	4	0.00	0.00	0.00	100
2.38	8	72.00	13.31	13.31	87
1.19	16	55.50	10.26	23.58	76
0.59	30	78.50	14.52	38.09	62
0.297	50	198.70	36.74	74.83	25
0.149	100	112.40	20.78	95.62	4
0.074	200	13.00	2.40	98.02	2
	Fondo	10.30	1.90		
	Total	540.40			
	Peso inicial	540.80			
	Pérdida	0.40			

Fuente: Elaboración propia

Tabla B3. Cantera Trujillo

Abertura mm	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
62.7	2 1/2 "				
50.8	2 "				
38.1	1 1/2 "				
24.4	1 "				
19.1	3/4 "				
12.7	1/2 "				
9.5	3/8 "				
4.76	4	1.60	0.00	0.00	100
2.38	8	10.90	2.66	2.66	97
1.19	16	40.30	9.82	12.48	88
0.59	30	114.50	27.90	40.38	60
0.297	50	133.10	32.43	72.81	27
0.149	100	75.40	18.37	91.18	9
0.074	200	22.40	5.46	96.64	3
	Fondo	4.10	1.00		
	Total	402.30			
	Peso inicial	410.40			
	Pérdida	8.10			

Fuente: Elaboración propia

Tabla B4. Cantera Cajamarca

Abertura mm	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
62.7	2 1/2 "				
50.8	2 "				
38.1	1 1/2 "				
24.4	1 "				
19.1	3/4 "				
12.7	1/2 "				
9.5	3/8 "	0.00	0.00	0.00	100
4.76	4	63.50	11.41	11.41	89
2.38	8	88.50	15.90	27.31	73
1.19	16	63.10	11.34	38.65	61
0.59	30	50.80	9.13	47.78	52
0.297	50	116.60	20.95	68.73	31
0.149	100	127.00	22.82	91.55	8
0.074	200	31.20	5.61	97.16	3
	Fondo	15.00	2.70		
	Total	555.70		2.85	
	Peso inicial	556.50			
	Pérdida	0.80			

Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Curva granulométrica de Pariñas, Santa Cruz, Trujillo y Cajamarca.

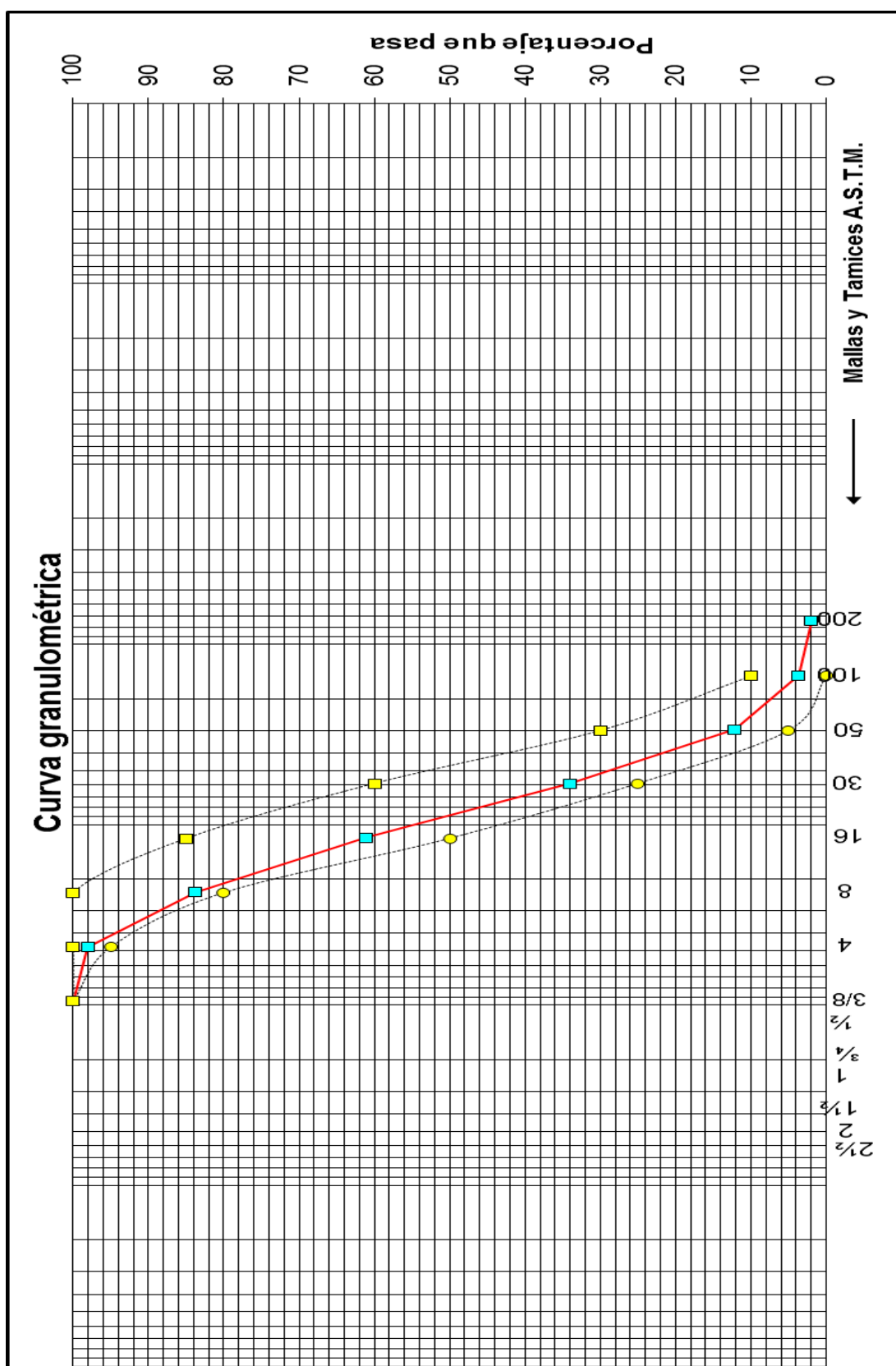


Figura C1. Curva granulométrica de cantera Pariñas

Fuente: Elaboración propia

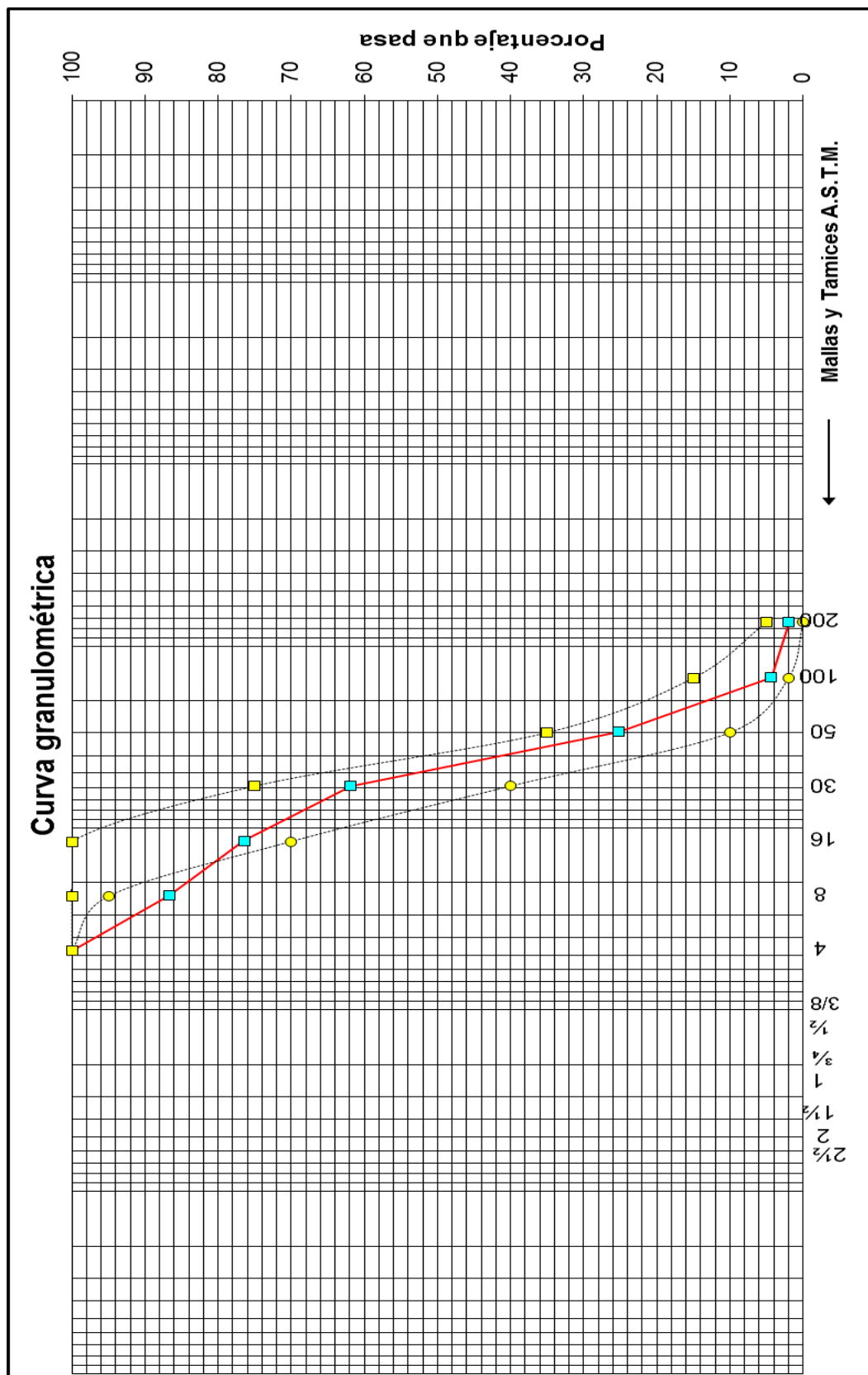


Figura C2. Curva granulométrica de cantera Santa Cruz
Fuente: Elaboración propia

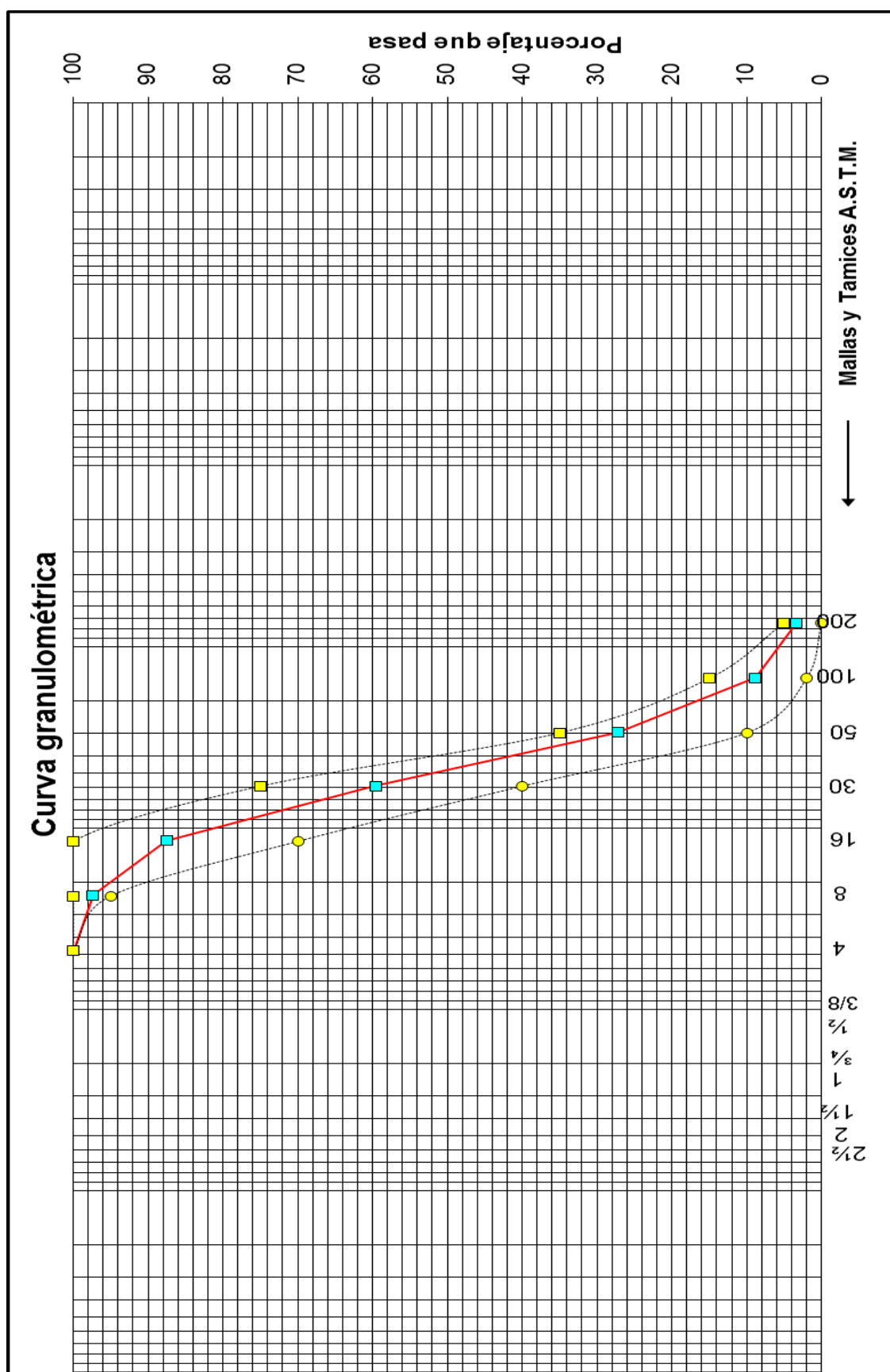


Figura C3. Curva granulométrica de cantera Trujillo
Fuente: Elaboración propia

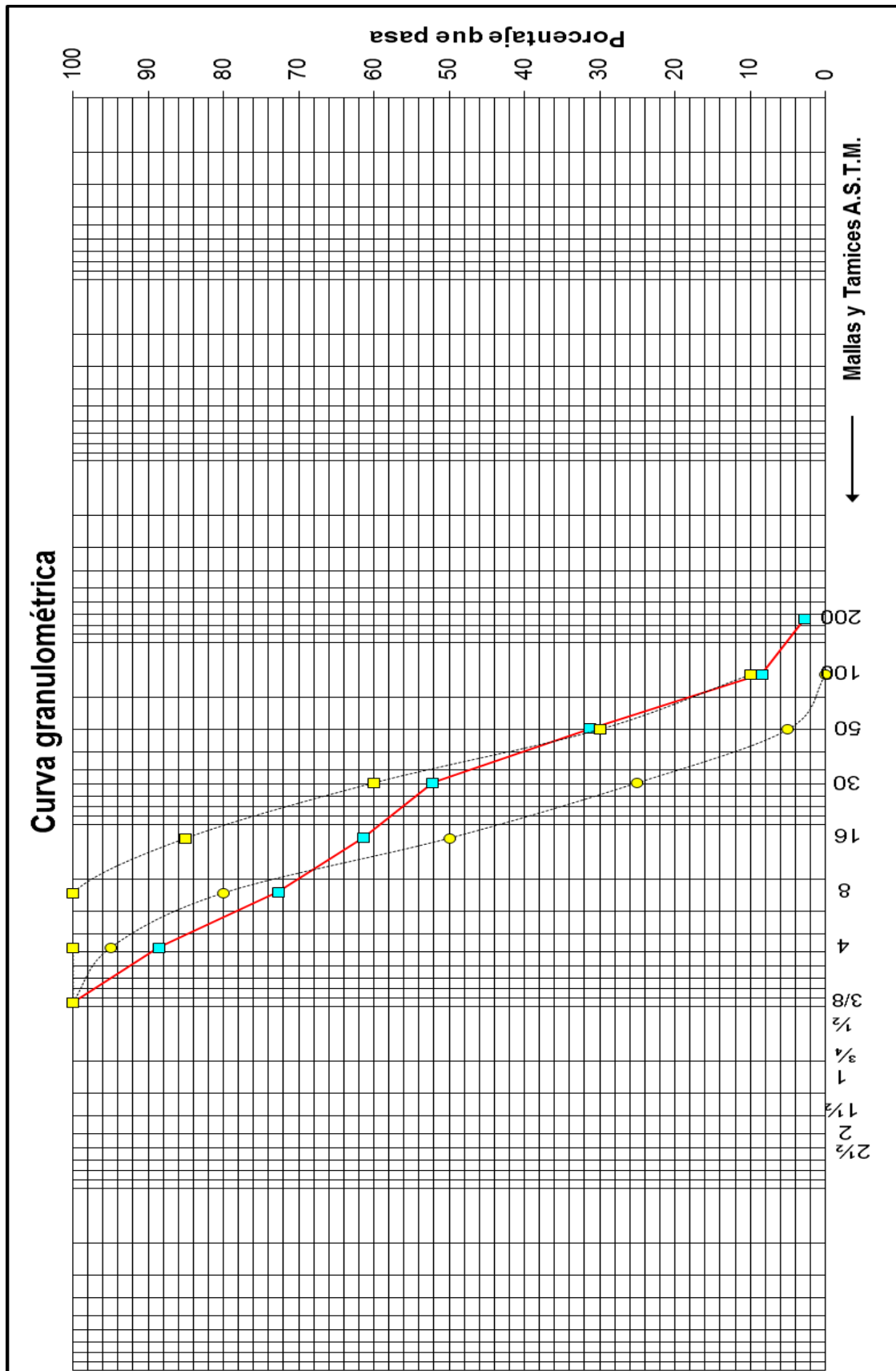


Figura C4. Curva granulométrica de cantera Cajamarca
Fuente: Elaboración propia